Atlas Bioenergia Bahia



Apoio:

IEE USP
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

GRUPO DE PESQUISA EM BIOENERGIA
Universidade de São Paulo | Instituto de Energia e Ambiente

SENAI CIMATEC

FIEB Federação das Indústrias do Estado da Bahia

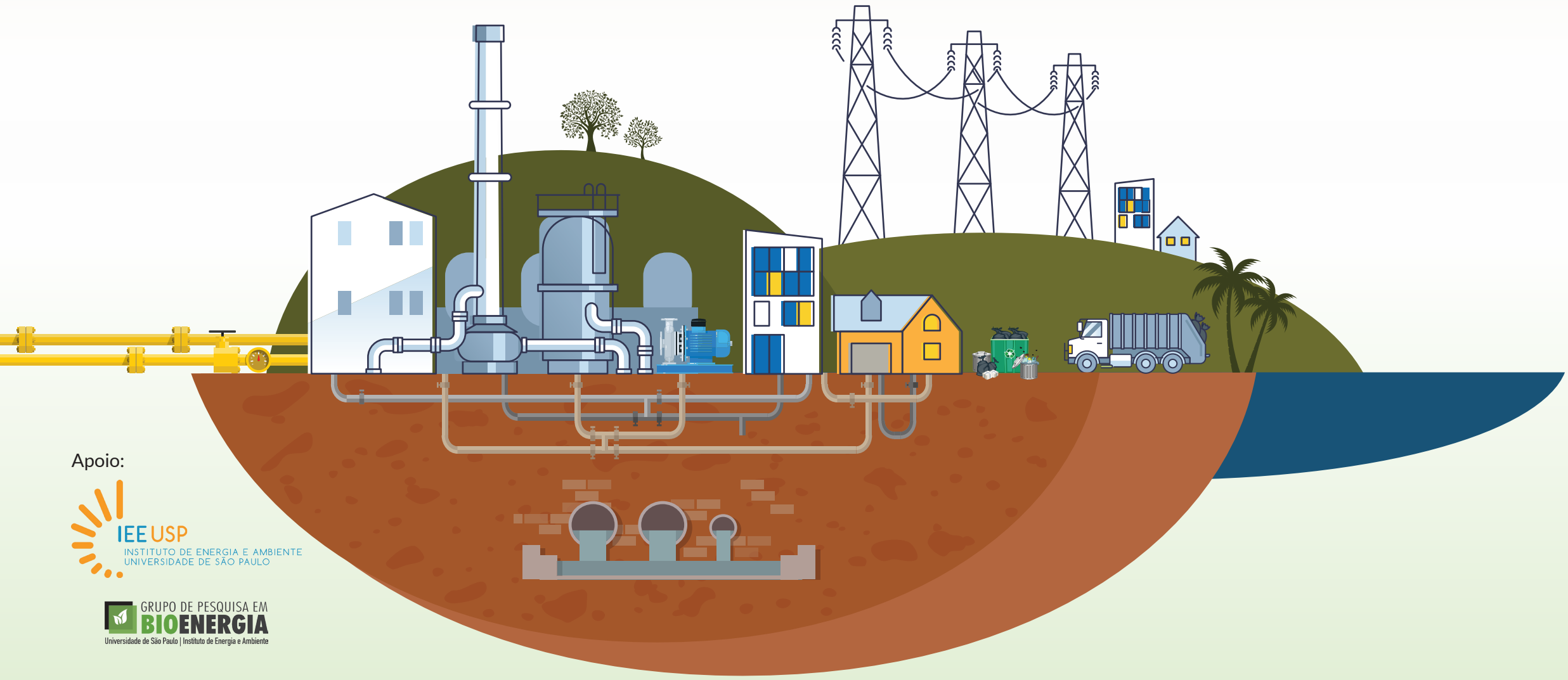
BAHIAGÁS
COMPANHIA DE GÁS DA BAHIA

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA

SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

GOVERNO DO ESTADO BAHIA
GOVERNO PRESENTE
TRABALHA PRA GENTE

Atlas Bioenergia Bahia



Apoio:

IEE USP
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

GRUPO DE PESQUISA EM BIOENERGIA
Universidade de São Paulo | Instituto de Energia e Ambiente

SENAI CIMATEC

FIEB Federação das Indústrias do Estado da Bahia

BAHIAGÁS
COMPANHIA DE GÁS DA BAHIA

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA

SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

GOVERNO DO ESTADO BAHIA
GOVERNO PRESENTE
TRABALHA PRA GENTE

Atlas Bioenergia Bahia

PRODUÇÃO
GOVERNO DO ESTADO DA BAHIA
PRODUCTION TEAM:
GOVERNMENT OF THE STATE OF BAHIA

ESTADO DA BAHIA
STATE OF BAHIA

Jerônimo Rodrigues
Governador / Governor

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA - SEINFRA
SECRETARIAT OF INFRASTRUCTURE - SEINFRA

Sérgio Luís Lacerda Brito
Secretário de Infraestrutura
Secretary of Infraestructure

Celso Reinaldo C. Rodrigues
Superintendente de Energia e Comunicação
Energy and Communication Superintendent

Gilson Amado Moraes
Diretor de Energia
Energy Director

Luciano Garcia Fraga
Coordenador de Planejamento de Obras
Construction Planning Coordinator

Aldo de Freitas Pinheiro
Consultor Técnico
Technical Consultant

Davi de Souza Freitas
Coordenador IV
Coordinator, Level IV

Dulce C. Pinheiro Longa
Analista Técnico
Technical Analyst

SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO - SECTI
SECRETARIAT OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION - SECTI

Marcius de Almeida Gomes
Secretário de Ciência, Tecnologia e Inovação
Secretary for Science, Technology and Innovation

Fernanda Rodrigues Moraes
Assessora Técnica
Technical Advisor

PRODUÇÃO: COMPANHIA DE GÁS DA BAHIA - BAHIAGÁS
PRODUCTION TEAM: BAHIA GAS COMPANY - BAHIAGÁS

Luiz Gavazza
Diretor-Presidente
CEO

Larisse Karina Stelitano Gonsalves de Oliveira
Diretora Técnica e Comercial
Technical and Commercial Director

Vitor Hill de Oliveira Alves Pessoa
Diretor-Administrativo e Financeiro
Administrative and Financial Director

Magno Bernardo do Nascimento Silva
Assessor de Tecnologia de Gás Natural
Natural Gas Technology Advisor

PRODUÇÃO SENAI CIMATEC
PRODUCTION TEAM: SENAI CIMATEC

COORDENAÇÃO EXECUTIVA / *EXECUTIVE COORDINATION*

Leone Peter Correia da Silva Andrade
Diretor-Geral
General Director

Luis Alberto Brêda Mascarenhas
Diretor de Tecnologia e Inovação
Director of Technology and Innovation

Alex Álisson Bandeira Santos
Gerente de Negócios
Business Manager

Bruno Caetano dos Santos Silva
Gerente-Executivo
Executive Manager

Miguel Andrade Filho
Executivo de Novos Negócios
New Business Executive

Walter de Freitas Pinheiro
Consultor Técnico
Technical Consultant

Marcelo Sousa de Carvalho
Gerente de Negócios
Business Manager

COORDENAÇÃO TÉCNICA / *TECHNICAL COORDINATION*

Paulo Roberto Freitas Neves
Líder Técnico
Technical Leader

Alex Álisson Bandeira Santos
Gerente de Negócios
Business Manager

Brenda Virgínia Lima Celes
Gerente de Projetos - PMO
Project Manager - PMO

EQUIPE TÉCNICA / *TECHNICAL TEAM*

Profa. Dra. Patrícia Helena Lara dos Santos Matai
(IEE/USP)
Coordenadora / Coordinator

Profa. Dra. Suani T. Coelho
(IEE/USP)
Vice-coordenadora / Vice-coordinator

Dra. Vanessa Pecora Garcilasso
(IEE/USP)

Dra. Marilin Mariano dos Santos
(IEE/USP)

Dra. Andrea Carolina Gutierrez-Gomez
(IEE/USP)

Dra. Mônica Joelma do Nascimento Anater
(IEE/USP)

Dra. Daniela Higgin Amaral
(IEE/USP)

Prof. Dr. Osvaldo Livio Soliano Pereira
(UFBA)

Dra. Tereza Virginia Mousinho Reis
(CBEM)

Gabriel Lucas Nascimento Silva
(UFBA)

Vitor Luis Andrade
(IEE/USP)

Dr. Danilo Perecin
Colaborador especial / Special collaborator

EDIÇÃO
EDITION

PRODUÇÃO GRÁFICA E EDITORIAL
GRAPHIC AND EDITORIAL PRODUCTION
Estúdios Verbus

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO
GRAPHIC DESIGN AND LAYOUT
Cristiane Martins

REVISÃO E PREPARAÇÃO DE TEXTO (PORTUGUÊS)
TEXT REVIEW AND PREPARATION (PORTUGUESE)
Amorim Leite

TRADUÇÃO / *TRANSLATION*
Alberto Gonçalves
Fernando Saker

Ficha catalográfica elaborada por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

A881 Atlas bioenergia Bahia. [recurso eletrônico] / [elaborado por] IEE-USP, SENAI CIMATEC. -- São Paulo: IEE-USP: Salvador: SEINFRA: SECTI: BAHIAGÁS: SENAI CIMATEC, 2025
230p: il. 30 cm.

ISBN 978-65-88109-60-1

1. Biomassa. 2. Bioenergia. 3. Transição energética. I. IEE-USP. II. SENAI CIMATEC. III. SEINFRA. IV. SECTI. V. BAHIAGÁS. VI. Título.

CDU 620.92

©2025 Todos os direitos desta edição reservados ao Instituto de Energia e Ambiente da USP (IEE-USP)
Qualquer parte desta publicação pode ser reproduzida, desde que citada a fonte.

AGRADECIMENTOS

A elaboração do presente *Atlas Bioenergia Bahia* contou com o essencial apoio de diversas instituições públicas e privadas do Estado, às quais dirigimos nosso profundo agradecimento. A generosa disponibilização de dados e o engajamento no processo de validação foram pilares para a qualidade e confiabilidade dos resultados aqui apresentados. É com grande gratidão que reconhecemos a colaboração da:

- Seagri - Secretaria da Agricultura, Pecuária, Irrigação, Pesca e Aquicultura *(State Secretariat for Agriculture, Livestock, Irrigation, Fisheries and Aquaculture)*
- Sedur - Secretaria de Desenvolvimento Urbano *(State Secretariat for Urban Development)*
- Adab - Agência de Defesa Agropecuária da Bahia *(Bahia State Agricultural and Livestock Defence Agency)*
- Abaf - Associação Baiana das Empresas de Base Florestal *(Bahia Association of Forest-Based Companies)*
- Acelen Energia Renovável S.A. *(Acelen Renewable Energy S.A.)*
- BahiaInveste - Empresa Baiana de Investimentos e Ativos S.A. *(Bahia Investment and Assets Company S.A.)*
- Biocombustíveis do Oeste S.A. *(Biofuels of the West S.A.)*
- Captar Agrobusiness
- Ceasa - Centrais de Abastecimento da Bahia S.A. *(Bahia Supply Centres S.A.)*
- Ceplac - Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira *(Executive Commission for Cocoa Farming Planning)*
- Embasa - Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. *(Bahia Water and Sanitation Company S.A.)*
- Faeb - Federação da Agricultura e Pecuária do Estado da Bahia *(Bahia State Agriculture and Livestock Federation)*
- Inema - Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos *(Institute for the Environment and Water Resources)*
- Inpasa Agroindustrial S.A.
- Mercado do Produtor de Juazeiro *(Juazeiro Wholesale Market)*
- Termoverde Salvador S.A.
- Usina Santa Maria Ltda. *(Santa Maria Mill Ltda.)*
- Veracel Celulose S.A. *(Veracel Cellulose S.A.)*

O compromisso de cada uma dessas entidades foi decisivo para o sucesso deste projeto. Este atlas é, portanto, um testemunho do poder da colaboração em prol do avanço energético e do desenvolvimento sustentável do nosso Estado.

ACKNOWLEDGMENTS

The development of this Bahia Bioenergy Atlas received essential support from several public and private institutions in the State, to whom we extend our deepest gratitude. Their generous provision of data and engagement in the validation process were key to the quality and reliability of the results presented here. We gratefully acknowledge the valuable collaboration of the institutions that contributed to this work. The commitment of each of these entities was crucial to the success of this project. This atlas is, therefore, a testament to the power of collaboration in promoting energy advancement and sustainable development in our State.

MESSAGE FROM GOVERNOR

It is with pride and optimism that we present the Bahia Bioenergy Atlas, a strategic tool that reaffirms our State as a leader in sustainable energy production, whether from hydro, wind, or solar sources, and now, more opportunely, from biomass. This document reflects the State of Bahia's historic commitment to diversifying its energy mix, combining economic development, social inclusion, and environmental preservation.

Bahia's energy mix is marked by diversity, combining fossil and renewable sources and playing a strategic role in the national scenario. Although fossil fuels still represent a significant portion of the energy supply, our electricity mix already stands out due to the significant share of renewable sources, which account for 96% of installed generation capacity.

This Atlas highlights an energy potential that remains largely untapped, particularly through the integration of biomass residues as a complementary source to the already established solar and wind generation. This integration contributes to expanding the diversification of the energy mix, strengthening energy security, and driving solutions aligned with the circular economy and carbon emission mitigation. With a robust agricultural and industrial base, combined with favorable natural conditions, Bahia boasts competitive advantages that can consolidate it as a national and international benchmark in bioenergy production and the transition to a more sustainable energy system.

In line with the global decarbonization goals defined in the United Nations (UN) Sustainable Development Goals (SDGs), the State Government of Bahia reaffirms its commitment to the Federal Government's guidelines, under the leadership of President Luiz Inácio Lula da Silva, in advancing a national agenda for a fair and sustainable energy transition. Aligned with the National Energy Transition Policy (PNTE) and Nationally Determined Contributions (NDCs)—such as the RenovaBio Program—and in accordance with the State Energy and Climate Plan, this Atlas guides public policies and private initiatives that reconcile energy generation with the preservation of the Caatinga and Cerrado biomes, ensuring that bioenergy is also an ally of biodiversity.

We present this work, developed in partnership with Senai Cimatec and the Bioenergy Research Group (GBio) at the Institute of Energy and Environment of the University of São Paulo (IEE/USP), available as an invitation to entrepreneurs, investors, researchers, and civil society. May it inspire new partnerships, technological innovations, and energy solutions capable of strengthening Bahia as a leading national driver of bioenergy utilization.

Let us continue together, transforming our natural resources into shared prosperity, with social and environmental justice.

Salvador, November 2025

MENSAGEM DO GOVERNADOR

É com orgulho e otimismo que apresentamos o *Atlas Bioenergia Bahia*, uma ferramenta estratégica que reafirma nosso estado como protagonista na produção sustentável de energia, seja por fontes hidráulica, eólica e solar, e, agora, de forma mais oportuna, a partir da biomassa. Este documento reflete o compromisso histórico do Estado da Bahia com a diversificação de sua matriz energética, aliando desenvolvimento econômico, inclusão social e preservação ambiental.

A matriz energética baiana é marcada pela diversidade, combinando fontes fósseis e renováveis e desempenhando papel estratégico no cenário nacional. Embora os combustíveis fósseis ainda representem parcela significativa da oferta de energia, nossa matriz elétrica já se destaca pela expressiva participação de fontes renováveis, que respondem por 96% da capacidade instalada de geração.

Este atlas evidencia um potencial energético ainda pouco explorado, sobretudo pela integração dos resíduos de biomassa como fonte complementar às já consolidadas gerações solar e eólica. Essa integração contribui para ampliar a diversificação da matriz, fortalecer a segurança energética e impulsionar soluções alinhadas à economia circular e à mitigação das emissões de carbono. Ao reunir uma base agrícola e industrial robusta, somada a condições naturais favoráveis, a Bahia reúne vantagens competitivas que podem consolidá-la como referência nacional e internacional na produção de bioenergia e na transição para um sistema energético mais sustentável.

Em sintonia com as metas globais de descarbonização, definidas nos *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU)*, o Governo do Estado da Bahia reafirma seu compromisso com as diretrizes do Governo Federal, sob a liderança do Presidente Luiz Inácio Lula da Silva, no avanço de uma agenda nacional de transição energética justa e sustentável. Alinhado à *Política Nacional de Transição Energética (PNTE)* e às *Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC's)* — a exemplo do *Programa RenovaBio* — e em consonância com o *Plano Estadual de Energia e Clima*. Este atlas orienta políticas públicas e iniciativas privadas que conciliam geração energética com a preservação dos biomas Caatinga e Cerrado, assegurando que a bioenergia seja também uma aliada da biodiversidade.

Disponibilizamos este trabalho, elaborado em parceria com o Senai Cimatec e o Grupo de Pesquisa em Bioenergia (GBio) do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP), como um convite a empreendedores, investidores, pesquisadores e à sociedade civil. Que ele inspire novas parcerias, inovações tecnológicas e soluções energéticas capazes de fortalecer a Bahia como um dos principais vetores nacionais na utilização da bioenergia.

Sigamos juntos, transformando nossas riquezas naturais em prosperidade compartilhada, com justiça social e ambiental.

Salvador, novembro de 2025

JERÔNIMO RODRIGUES
GOVERNADOR DO ESTADO DA BAHIA
GOVERNOR OF THE STATE OF BAHIA



NOTA CONJUNTA

Em consonância com a visão estratégica do Governo do Estado, as secretarias de Infraestrutura (Seinfra), de Ciência, Tecnologia e Inovação (Secti) e a Companhia de Gás da Bahia (Bahiagás) reconhecem o *Atlas Bioenergia Bahia* como instrumento essencial para o desenvolvimento econômico e ambiental do Estado. O documento consolida-se como ferramenta indutora de políticas públicas e investimentos privados, integrando de forma pioneira o planejamento de infraestrutura, o estímulo à inovação tecnológica e a expansão do mercado de energias renováveis.

Para a Seinfra, o atlas oferece subsídios cartográficos e técnicos fundamentais para o planejamento de infraestrutura logística e energética em médio e longo prazos. Permite identificar corredores estratégicos para o escoamento da produção, priorização de investimentos em malhas rodoviárias e ferroviárias que atendam os polos de bioenergia e o planejamento da expansão do sistema de transmissão e distribuição de energia, assegurando conexão eficiente e segura de novas usinas. Dessa forma, contribui para a integração entre políticas energéticas e de infraestrutura e para a evolução da participação dos bioenergéticos na estrutura da matriz estadual, alavancando o desenvolvimento sustentável em todas as regiões baianas.

Sob a perspectiva da Secti, o atlas posiciona-se como indutor da bioeconomia e da economia do conhecimento. Orienta a formulação de políticas de fomento à pesquisa, ao desenvolvimento e à inovação, apontando biomassas de maior potencial e tecnologias de conversão mais adequadas ao território baiano, além de promover a competência em pesquisa nessa temática. Seu mapeamento detalhado incentiva a colaboração entre as instituições de Ciência e Tecnologia e setor produtivo para o avanço de soluções tecnológicas, como biorrefinarias e produção de biocombustíveis avançados, transformando resíduos em valor agregado e colocando a Bahia na vanguarda da inovação em energias renováveis.

Para a Bahiagás, o *Atlas Bioenergia Bahia* reforça o papel estratégico da companhia como indutora da diversificação energética e da transição para uma economia de baixo carbono. O mapeamento detalhado de biomassas e potenciais de produção de biometano abre espaço para integrar fontes renováveis à infraestrutura já existente de gás canalizado, ampliando a segurança energética, a competitividade industrial e a atração de investimentos. Essa iniciativa projeta a Bahia como referência nacional em soluções inovadoras que unem energia, sustentabilidade e desenvolvimento territorial.

O *Atlas Bioenergia Bahia* consolida-se, assim, como base factual para a atuação sinérgica das instituições, transformando o potencial bioenergético do Estado em projetos concretos capazes de gerar investimentos, empregos verdes, receita e benefícios ambientais para a população. Com essa iniciativa, reafirmamos nosso compromisso com o desenvolvimento sustentável e com a liderança da Bahia no cenário nacional de energias renováveis.

SÉRGIO LUÍS LACERDA BRITO
SECRETÁRIO DE INFRAESTRUTURA DO ESTADO DA BAHIA (SEINFRA)
SECRETARY FOR INFRASTRUCTURE OF THE STATE OF BAHIA (SEINFRA)

MARCIUS DE ALMEIDA GOMES
SECRETÁRIO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO DO ESTADO DA BAHIA (SECTI)
SECRETARY FOR SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION OF THE STATE OF BAHIA (SECTI)

LUIZ GAVAZZA
DIRETOR-PRESIDENTE DA COMPANHIA DE GÁS DA BAHIA (BAHIAGÁS)
CEO OF THE BAHIA GAS COMPANY (BAHIAGÁS)

JOINT NOTE

In line with the State Government's strategic vision, the Secretariats for Infrastructure (Seinfra), Science, Technology, and Innovation (Secti), and the Bahia Gas Company (Bahiagás) recognize the Bahia Bioenergy Atlas as an essential instrument for the State's economic and environmental development. The document has established itself as a tool for influencing public policies and private investment, pioneering the integration of infrastructure planning, the promotion of technological innovation, and the expansion of the renewable energy market.

For Seinfra, the atlas provides essential cartographic and technical support for medium- and long-term logistics and energy infrastructure planning. It allows for the identification of strategic corridors for the flow of production, prioritization of investments in road and rail networks that serve bioenergy hubs and the planning for the expansion of the energy transmission and distribution system, ensuring efficient and safe connection of new plants. Thus, it contributes to the integration of energy and infrastructure policies and to the evolution of bioenergy's participation in the State's energy mix, leveraging sustainable development in all regions of Bahia.

From Secti's perspective, the atlas positions itself as a driver of the bioeconomy and the knowledge economy. It guides the formulation of policies to promote research, development, and innovation, identifying biomasses with the greatest potential and conversion technologies best suited to Bahia's territory, in addition to promoting research expertise in this area. Its detailed mapping encourages collaboration between science and technology institutions and the productive sector to advance technological solutions, such as biorefineries and advanced biofuel production, transforming residues into added value and placing Bahia at the forefront of renewable energy innovation.

For Bahiagás, the Bahia Bioenergy Atlas reinforces the company's strategic role as a driver of energy diversification and the transition to a low-carbon economy. The detailed mapping of biomass and biomethane production potential paves the way for integrating renewable sources into the existing pipeline gas infrastructure, increasing energy security, industrial competitiveness, and attracting investment. This initiative positions Bahia as a national benchmark for innovative solutions that combine energy, sustainability, and territorial development.

The Bahia Bioenergy Atlas thus consolidates itself as a factual basis for the synergistic action of institutions, transforming the State's bioenergy potential into concrete projects capable of generating investment, green jobs, revenue, and environmental benefits for the population. With this initiative, we reaffirm our commitment to sustainable development and Bahia's leadership in the national renewable energy landscape.

Da biomassa à energia: a Bahia na transição para uma economia de baixo carbono

A geração de energia é um dos pilares do desenvolvimento socioeconômico e, no cenário atual, enfrenta o desafio de equilibrar expansão, segurança no suprimento, competitividade e sustentabilidade. A necessidade de diversificação da matriz energética brasileira torna-se cada vez mais evidente, sobretudo diante do esgotamento do potencial hidrelétrico e das crescentes demandas ambientais e regulatórias. Nesse contexto, fontes renováveis complementares, como a solar, a eólica e, de forma estratégica, a biomassa, assumem papel central na construção de um sistema energético mais resiliente e sustentável.

A biomassa, por sua característica despachável e ampla disponibilidade, apresenta-se como um recurso de grande relevância para o atendimento das necessidades energéticas, contribuindo para a estabilidade do sistema elétrico e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Na Bahia, a diversidade de biomas, a presença de polos agroindustriais, a abundância de resíduos agrícolas, florestais, urbanos e industriais, bem como o potencial de aproveitamento de efluentes, reforçam o papel estratégico da bioenergia na transição energética estadual.

O *Atlas Bioenergia Bahia* é um instrumento inovador que consolida e divulga informações atualizadas sobre as potencialidades energéticas derivadas da biomassa no território baiano. Baseado em dados técnicos, análises setoriais e contribuições de especialistas, o documento oferece uma visão abrangente sobre os recursos disponíveis, as tecnologias aplicáveis, os impactos socioambientais e as oportunidades econômicas associadas ao uso sustentável da biomassa para geração de energia.

Seguindo a experiência bem-sucedida de outros Estados e inspirando-se em metodologias aplicadas em projetos de referência, como o *Atlas de Bioenergia do Brasil* e o *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo*, este trabalho inova ao incorporar ferramentas atualizadas, análises setoriais detalhadas e a apresentação de resultados em mapas georreferenciados. Essa abordagem permite uma compreensão clara da distribuição do potencial energético por município, facilitando o planejamento de políticas públicas e investimentos privados.

A estrutura do atlas foi organizada para fornecer uma leitura fluida e objetiva. Inicia-se com uma contextualização geral do Estado, abordando aspectos ambientais, sociais, econômicos e energéticos. Em seguida, são analisados os setores geradores de resíduos de biomassa com maior relevância para a geração de bioenergia, incluindo o sucroenergético, florestal, agrícola, pecuária, resíduos sólidos urbanos e esgoto sanitário. Para cada fonte, são avaliados potenciais de produção de biogás, biometano, hidrogênio renovável e eletricidade, bem como as tecnologias de conversão disponíveis, barreiras existentes e mapas temáticos que ilustram o potencial energético.

O documento também discute as perspectivas para os biocombustíveis do futuro, considerando inovações tecnológicas, legislações vigentes e compromissos nacionais de sustentabilidade, como os *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)* e as *Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs)*. Além disso, apresenta uma análise integrada do potencial total por fonte e recomendações estratégicas para o avanço do setor, fundamentadas em tendências globais e experiências bem-sucedidas.

Os resultados obtidos demonstram que a Bahia dispõe de um expressivo potencial bioenergético, capaz de contribuir significativamente para a segurança energética estadual, para a descentralização da geração de energia e para o fortalecimento de cadeias produtivas associadas à bioeconomia. O aproveitamento energético de resíduos promove, simultaneamente, benefícios ambientais, como a redução de emissões de gases de efeito estufa e a destinação sustentável de resíduos, e sociais, ao gerar emprego, renda e desenvolvimento regional.

Embora o estudo aponte oportunidades promissoras, também revela desafios a serem superados, incluindo barreiras econômicas, logísticas e regulatórias, que exigem políticas públicas consistentes, incentivos adequados e modelos de negócio inovadores para viabilizar a expansão dos projetos de bioenergia.

O *Atlas Bioenergia Bahia* é resultado de um esforço coletivo de pesquisadores, especialistas e instituições parceiras, que aplicaram metodologias avançadas para mensurar e mapear o potencial energético da biomassa no território baiano. Mais do que um diagnóstico, este trabalho propõe caminhos para o desenvolvimento de projetos, apoiando a formulação de políticas públicas, a tomada de decisão por investidores e a promoção de iniciativas alinhadas à economia de baixo carbono.

Com este estudo, espera-se contribuir para o fortalecimento do papel da Bahia como referência nacional na produção de energia renovável, alinhando-se às metas de descarbonização e promovendo benefícios ambientais, sociais e econômicos. Que este atlas sirva como guia para gestores públicos, empresas, pesquisadores e sociedade civil na construção de um futuro energético sustentável, inovador e inclusivo.

From biomass to energy: Bahia in the transition to a low-carbon economy

Energy generation is one of the pillars of socioeconomic development and, in the current scenario, faces the challenge of balancing expansion, supply security, competitiveness, and sustainability. The need to diversify Brazil's energy mix is becoming increasingly evident, especially given the depletion of hydroelectric potential and growing environmental and regulatory demands. In this context, complementary renewable sources, such as solar, wind, and, strategically, biomass, play a central role in building a more resilient and sustainable energy system.

Biomass, due to its dispatchability and widespread availability, is a highly relevant resource for meeting energy needs, contributing to the stability of the electrical system and reducing greenhouse gas emissions. In Bahia, the diversity of biomes, the presence of agro-industrial hubs, the abundance of agricultural, forestry, urban, and industrial residues, and the potential for effluent recovery reinforce the strategic role of bioenergy in the State's energy transition.

The Bahia Bioenergy Atlas is an innovative instrument that consolidates and disseminates up-to-date information on the energy potential derived from biomass in the State. Based on technical data, sectoral analyses, and expert contributions, the document offers a comprehensive overview of available resources, applicable technologies, socio-environmental impacts, and economic opportunities associated with the sustainable use of biomass for energy generation.

Building on the successful experience of other states and drawing inspiration from methodologies applied in landmark projects such as the Brazilian Bioenergy Atlas and the Bioenergy Atlas of the State of São Paulo, this work innovates by incorporating updated tools, detailed sectoral analyses, and the presentation of results on georeferenced maps. This approach provides a clear understanding of the distribution of energy potential by municipality, facilitating the planning of public policies and private investments.

The atlas was structured to offer a clear and concise reading experience. It begins with a general overview of the State's context, addressing environmental, social, economic, and energy aspects. The subsequent sections analyze the biomass-residue-generating sectors most relevant for bioenergy production, including the sugar-energy, forestry, agricultural, livestock, municipal solid waste, and sanitary sewage sectors. For each source, production potentials for biogas, biomethane, green hydrogen, and electricity are assessed, as well as available conversion technologies, existing barriers, and thematic maps illustrating energy potential.

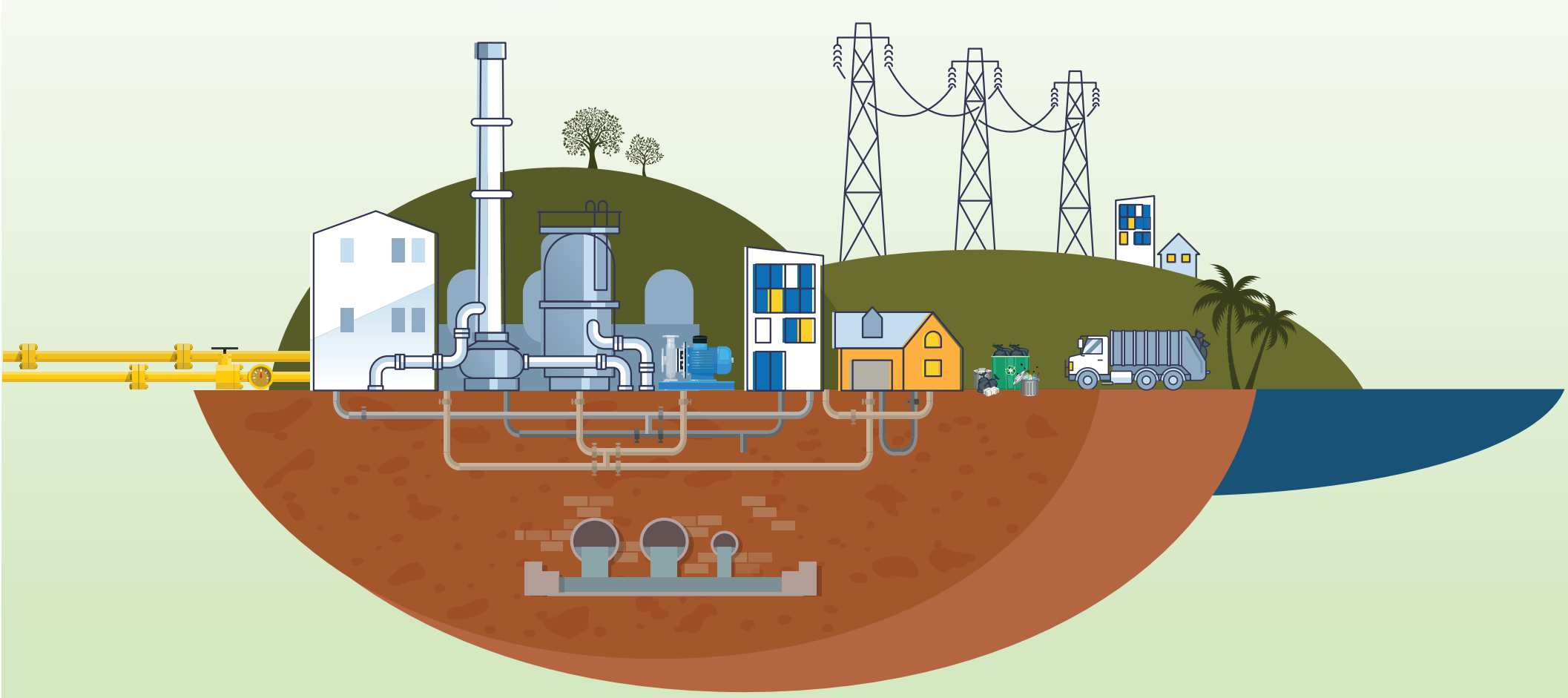
The document also discusses the outlook for future biofuels, considering technological innovations, current legislation, and national sustainability commitments, such as the Sustainable Development Goals (SDGs) and Nationally Determined Contributions (NDCs). Furthermore, it presents an integrated analysis of the total potential by source and strategic recommendations for the sector's advancement, based on global trends and successful experiences.

The results demonstrate that Bahia has significant bioenergy potential, capable of significantly contributing to the State's energy security, the decentralization of energy generation, and the strengthening of production chains associated with the bioeconomy. Waste-to-Energy use simultaneously promotes environmental benefits, such as reducing greenhouse gas emissions and ensuring sustainable waste disposal, and social benefits, by generating jobs, income, and regional development.

While the study highlights promising opportunities, it also reveals challenges to be overcome, including economic, logistical, and regulatory barriers, which require consistent public policies, adequate incentives, and innovative business models to enable the expansion of bioenergy projects.

The Bahia Bioenergy Atlas is the result of a collective effort by researchers, experts, and partner institutions, who applied advanced methodologies to measure and map the energy potential of biomass in Bahia. More than a diagnosis, this work proposes paths for project development, supporting public policy formulation, investor decision-making, and the promotion of initiatives aligned with the low-carbon economy.

This study hopes to contribute to strengthening Bahia's role as a national leader in renewable energy production, aligning with decarbonization targets and promoting environmental, social, and economic benefits. May this atlas serve as a guide for public managers, companies, researchers, and civil society in building a sustainable, innovative, and inclusive energy future.



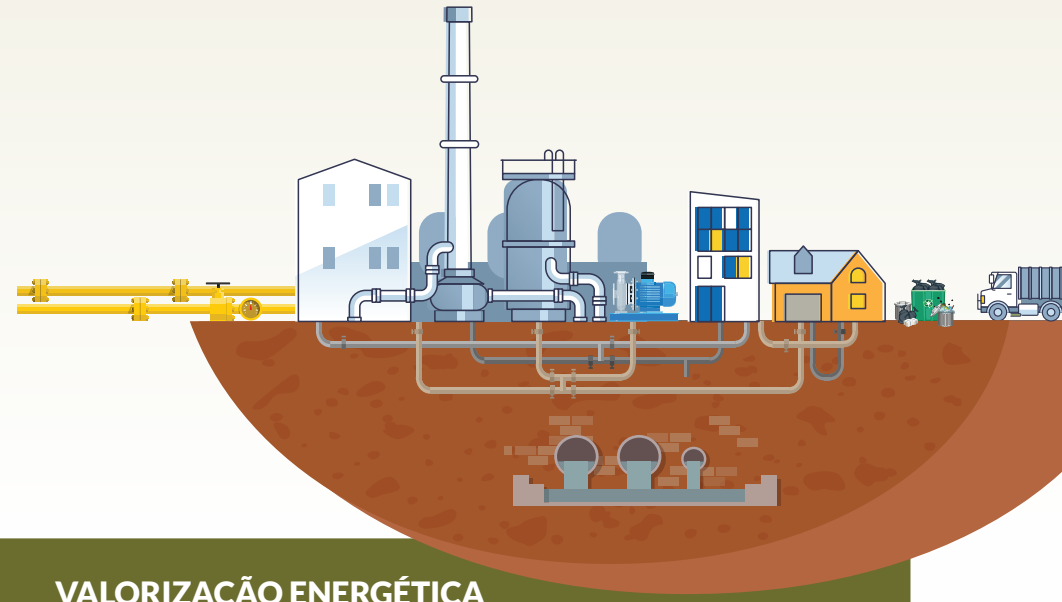
SUMÁRIO
SUMMARY

	Agradecimento / *Acknowledgments*	03
	Mensagem do Governador / Message from Governor	04
	Nota Conjunta / *Joint note*	05
	Da biomassa à energia: a Bahia na transição para uma economia de baixo carbono *From biomass to energy: Bahia in the transition to a low-carbon economy*	06 07
1	**BIOENERGIA E BIOCOMBUSTÍVEIS DO FUTURO: CONCEITOS, TECNOLOGIAS E PERSPECTIVAS** *BIOENERGY AND BIOFUELS OF THE FUTURE: CONCEPTS, TECHNOLOGIES AND PERSPECTIVES*	**12**
1.1	Apresentação geral / *General overview*	13
1.2	Biomassa e bioenergia como vetores da transição energética *Biomass and bioenergy as vectors of the energy transition*	13
1.3	Principais aspectos da sustentabilidade / *Main aspects of sustainability*	14
1.4	Contribuições da bioenergia para a mitigação das mudanças climáticas *Contributions of bioenergy to Climate change mitigation*	15
1.5	O papel da bioenergia na agenda climática e de desenvolvimento sustentável *The role of bioenergy in the climate and sustainable development agenda*	16
1.6	Fontes estratégicas de bioenergia: biocombustíveis e vetores estratégicos / *Strategic sources of bioenergy: biofuels and energy carriers*	16
1.6.1	Biogás e metano: potencial energético, aplicações e expansão no Brasil *Biogas and biomethane: energy potential, applications, and expansion in Brazil*	17
1.6.2	Bioletricidade na transição energética: estado atual e perspectivas *Bioelectricity in the energy transition: current status and prospects*	19
1.6.3	Hidrogênio renovável: perspectivas tecnológicas e o papel da biomassa *Renewable Hydrogen: technological perspectives and the role of biomass*	21
1.7	Tecnologias para conversão energética de resíduos *Technologies for energy conversion of residues and wastes*	22
1.7.1	Combustão direta e cogeração *Direct combustion and combined heat and power*	23
1.7.2	Biogestão anaerobia / *Anaerobic digestion*	23
1.7.3	Gaseificação / *Gasification*	24
1.7.4	Reforma a vapor para a produção de hidrogênio *Steam reforming for Hydrogen production*	24
1.8	Inovação e estratégia climática: bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS) *Innovation and climate strategy: bioenergy with carbon capture and storage (BECCS)*	25
1.9	Marco legal dos biocombustíveis: a lei do combustível do futuro / *Legal framework for biofuels: the "fuel of the future" law*	26
1.10	*Renovabio*: política de descarbonização e incentivo à bioenergia *Renovabio: decarbonization policy and bioenergy incentives*	27
1.11	Cenários e oportunidades para a bioenergia no Brasil e na Bahia *Scenarios and opportunities for bioenergy in Brazil and Bahia*	28
1.12	Reflexões preliminares: bioenergia em perspectiva *Preliminary reflections: bioenergy in perspective*	29
2	**A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA** *BAHIA AS STRATEGIC TERRITORY FOR BIOENERGY*	**30**
2.1	A biomassa na matriz energética brasileira: participação, produção e consumo *Biomass in the brazilian energy mix: participation, production, and consumption*	31
2.2	Caracterização do Estado da Bahia para o desenvolvimento da bioenergia / *Characterization of the State of Bahia for bioenergy development*	33
2.2.1	Território e meio ambiente: aspectos estratégicos para a bioenergia na Bahia *Territory and environment: strategic aspects for bioenergy in Bahia*	34
2.2.2	Caracterização socioeconômica e produtiva da Bahia no contexto da bioenergia *Socioeconomic and productive characterization of Bahia in the context of bioenergy*	39
2.2.3	Panorama energético da Bahia: produção, infraestrutura e fontes renováveis *Bahia's energy outlook: production, infrastructure, and renewable sources*	45 44
2.2.3.1	Produção e consumo de energéticos no Estado *Energy production and consumption in the State*	45
2.2.4	Perfil das emissões de gases de efeito estufa e o papel da bioenergia na mitigação *Greenhouse gas emissions profile and the role of bioenergy in mitigation*	48
2.2.5	Infraestruturas estratégicas ao desenvolvimento da bioenergia na Bahia *Strategic infrastructure for the development of bioenergy in Bahia*	52
2.2.6	Projetos e investimentos estratégicos em bioenergia em desenvolvimento na Bahia *Strategic bionergy projects and investments under development in Bahia*	53
2.3	Horizontes estratégicos da bioenergia na Bahia *Strategic bioenergy horizons in Bahia*	57



3 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA BAHIA 58
ENERGY RECOVERY FROM MUNICIPAL SOLID WASTE IN BAHIA

3.1	Introdução / *Introduction*	59
3.2	Cenário brasileiro dos RSU: desafios e oportunidades energéticas *Brazilian MSW scenario: energy challenges and opportunities*	59
3.3	Resíduos sólidos urbanos na Bahia: análise territorial, geração, composição e destinação final *Municipal solid waste in Bahia: territorial analysis, generation, composition, and final disposal*	65 64
3.4	Valorização energética dos RSU: benefícios e desafios no contexto brasileiro / *Energy recovery from MSW: benefits and challenges in the Brazilian context*	66
3.5	Potenciais energéticos estimados a partir dos RSU *Estimated energy potential from MSW*	67 66
3.5.1	Metodologia de cálculo *Calculation methodology*	66 67
3.5.2	Quantificação dos RSU gerados no Estado da Bahia / *Quantification of MSW generated in the State of Bahia*	67
3.5.3	Valorização energética dos RSU em aterros sanitários *Energy recovery from MSW in sanitary landfills*	68
3.5.3.1	Metodologia para a estimativa do potencial de geração de Biogás *Methodology for estimating biogas generation potential*	68
3.5.3.2	Metodologia para a estimativa do potencial de geração de biometano *Methodology for estimating biomethane generation potential*	69 68
3.5.3.3	Metodologia para a estimativa do potencial de geração de eletricidade *Methodology for estimating electricity generation potential*	69
3.5.3.4	Metodologia para a estimativa do potencial de geração de hidrogênio a partir do biometano / *Methodology for estimating the hydrogen generation potential from Biomethane*	69
3.5.4	Valorização energética dos RSU por meio de tecnologias *Waste-to-Energy* *Energy recovery from MSW through Waste-to-Energy technologies*	69
3.5.4.1	Valorização energética da Forsu por meio da biodigestão anaeróbia *Energy recovery from OFMSW through anaerobic digestion*	70
3.5.4.1.1	Metodologia para a estimativa do potencial de geração de biogás *Methodology for estimating biogás generation potential*	71 70
3.5.4.1.2	Metodologia para a estimativa do potencial de geração de biometano *Methodology for estimating biomethane generation potential*	71 70
3.5.4.1.3	Metodologia para a estimativa do potencial de geração de eletricidade *Methodology for estimating electricity generation potential*	71
3.5.4.1.4	Metodologia para a estimativa do potencial de hidrogênio a partir do biometano / *Methodology for estimating the hydrogen potential from biomethane*	71
3.5.4.2	Valorização energética dos RSU por meio de tecnologias térmicas *Waste-to-Energy* / *Energy recovery from municipal solid waste through thermal Waste-to-Energy technologies*	71
3.5.4.2.1	Metodologia para a estimativa do potencial de geração de eletricidade por meio da incineração *Methodology for estimating the potential for electricity generation through incineration*	72 71
3.5.4.2.2	Metodologia para a estimativa do potencial de geração de eletricidade por meio da gaseificação *Methodology for estimating the potential for electricity Generation through gasification*	72 71
3.5.4.2.3	Metodologia para a estimativa do potencial de geração de hidrogênio a partir da gaseificação / *Methodology for estimating the hydrogen generation potential from gasification*	72
3.6	Resultados e representação espacial dos potenciais *Results and spatial representation of potentials*	72
3.7	Considerações finais / *Final considerations*	92



4 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO ESGOTO SANITÁRIO NA BAHIA 94
ENERGY RECOVERY FROM SANITARY SEWAGE IN BAHIA

4.1	O esgoto sanitário como vetor energético na transição sustentável *Sanitary sewage as an energy source in the sustainable transition*	95
4.2	Cenário brasileiro do esgotamento sanitário: desafios estruturais e oportunidades energéticas / *Brazil´s sanitary sewage scenario: structural challenges and energy opportunities*	95
4.3	A infraestrutura de esgotamento sanitário na Bahia: avanços, limites e potencial de aproveitamento / *Sanitary sewerage infrastructure in Bahia: progress, limitations, and utilization potential*	97
4.4	Valorização energética do esgoto sanitário: caminhos para integrar saneamento, energia renovável e sustentabilidade / *Energy recovery from sanitary sewage: pathways to integrate sanitation, renewable energy, and sustainability*	98
4.5	Potenciais energéticos estimados a partir de esgoto sanitário *Estimated energy potentials from sanitary sewage*	99
4.5.1	Metodologia de cálculo / *Calculation methodology*	99
4.5.2	Quantificação do esgoto sanitário / *Quantification of sanitary sewage*	99
4.5.3	Metodologia para estimativa do potencial de biogás a partir da digestão anaeróbia / *Methodology for estimating biogas potential from anaerobic digestion*	100
4.5.4	Metodologia para estimativa do potencial de geração de biometano / *Methodology for estimating biomethane generation potential*	100
4.5.5	Metodologia para estimativa do potencial de geração de eletricidade a partir do biogás / *Methodology for estimating the potential electricity generation from biogas*	100
4.5.6	Metodologia para estimativa do potencial de geração hidrogênio via reforma do biometano / *Methodology for estimating the hydrogen generation potential through biomethane reforming*	100
4.6	Resultados e representação espacial dos potenciais / *Results and spatial representation of the potentials*	100
4.7	*Considerações finais / Final considerations*	107

SUMÁRIO
SUMMARY



5 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS NA BAHIA 108
ENERGY RECOVERY FROM AGRICULTURAL RESIDUES IN BAHIA

5.1 Resíduos agrícolas e bioenergia: caminhos sustentáveis para o campo baiano / *Agricultural residues and bioenergy: sustainable pathways for the State of Bahia* 109

5.2 Agricultura e geração de resíduos no Brasil: expansão produtiva e desafios ambientais / *Agriculture and residue generation in Brazil: productive expansion and environmental challenges* 110

5.3 Agricultura baiana em números: diversidade produtiva e estrutura fundiária / *Agriculture in Bahia: productive diversity and land structure* 110

5.4 Estimativa do potencial energético dos resíduos agrícolas: abordagem metodológica e parâmetros adotados 114
Estimating the energy potential of agricultural residues: methodological approach and parameters adopted 115

5.5 Potenciais de geração de energia elétrica por cadeia produtiva: resultados e análises / *Electricity generation potential by production chain: results and analysis* 115

5.5.1 Biomassa residual da cultura e beneficiamento do algodão como fonte de energia elétrica / *Residual biomass from cotton cultivation and precessing as a source of electrical energy* 116

5.5.2 A cultura da banana e seus resíduos: energia a partir do pseudocaule e das folhas / *Banana cultivation and its residues: energy from pseudo-stems and leaves* 118

5.5.3 Casca do cacau como insumo energético: valorização dos resíduos do beneficiamento / *Cocoa husks as an energy input: valorization of processing residue* 120

5.5.4 A cafeicultura como vetor energético: valorização da casca no Extremo Sul 120
Coffee farming as an energy source: husk valorization in the Extremo Sul 121

5.5.5 Aproveitamento energético da palha da cana-de-açúcar: potencial, limites e oportunidades na Bahia / *Energy recovery from sugarcane straw: potential, limits, and opportunities in Bahia* 122

5.5.6 Citros e bioenergia: podas como recurso energético estratégico 124
Citrus fruits and bionergy: pruning as a strategic energy resource

5.5.7 A casca do coco-da-baía como ativo energético no litoral e semiárido 126
Coconut husk as an energy asset in the coastal and semi-arid regions

5.5.8 Cachos de dendê e geração de energia: o Baixo Sul como território promissor / *Palm oil bunches and energy generation: the Lower South as a promising region* 128

5.5.9 A palha do feijão como alternativa energética no Oeste e Semiárido baianos / *Bean straw as an energy alternative in the Western and Semi-Arid regions of Bahia* 130

5.5.10 Mandioca: aproveitamento das ramas em diferentes territórios 131
Cassava: utilization of stems in different territories

5.5.11 Resíduos do milho: potencial energético em escala estadual / *Corn residues: energy potential at the state level* 133

5.5.12 Palha da soja: aproveitamento energético do resíduo agrícola / *Soybean straw: energy recovery from agricultural residues* 134

5.6 Análise do potencial técnico e implicações para a bioenergia a partir de resíduos agrícolas na Bahia / *Analysis of the technical potential and implications for bioenergy from agricultural residues in Bahia* 136

5.7 Oportunidades e desafios da bioenergia na agricultura baiana / *Opportunities and challenges of bioenergy in State agriculture* 139

6 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DO SETOR FLORESTAL NA BAHIA 140
ENERGY RECOVERY FROM FORESTRY RESIDUES IN BAHIA

6.1 Introdução / *Introduction* 141

6.2 Cenário nacional do setor florestal: produção, sustentabilidade e impactos socioeconômicos 141
National forestry sector overview: production, sustainability, and socioeconomic impacts 142

6.3 Desenvolvimento florestal na Bahia: características, desafios e oportunidades / *Forest development in Bahia: characteristics, challenges, and opportunities* 142

6.4 Valorização energética dos resíduos florestais: potencial e práticas sustentáveis 144
Energy valorization of forestry residues: potential and sustainable practices 143

6.5 Setor de papel e celulose 144
Pulp and paper sector 145

6.5.1 Produção nacional de papel e celulose 145
National Pulp and paper production

6.5.2 A indústria de papel e celulose na Bahia / *The Pulp and paper industry in Bahia* 146

6.5.3 Aproveitamento energético de efluentes industriais: oportunidades e desafios no setor de celulose / *Energy recovery from industrial effluent: opportunities and challenges in the pulp sector* 146

6.5.4 Potenciais energéticos estimados a partir de efluentes líquidos industriais / *Estimated energy potentials from industrial effluent* 147

6.5.4.1 Metodologia de cálculo 147
Calculation methodology

6.5.4.2 Quantificação dos efluentes líquidos industriais / *Quantification of industrial effluents* 148

6.5.4.3 Metodologia para a estimativa do potencial de biogás a partir da digestão anaeróbia / *Methodology for estimating the biogás generation potential from anaerobic digestion* 148

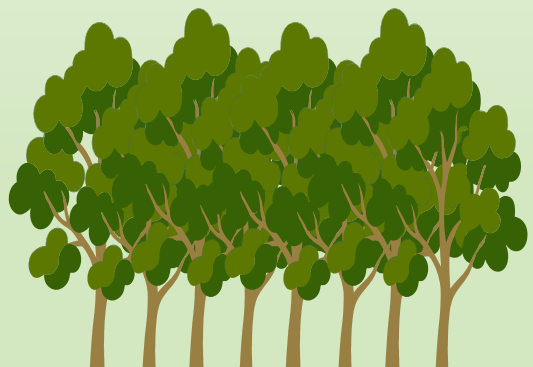
6.5.4.4 Metodologia para estimativa do potencial de geração de biometano 148
Methodology for estimating biomethane generation potential

6.5.4.5 Metodologia para estimativa do potencial de geração de eletricidade a partir do biogás / *Methodology for estimating the electricity generation potential from biogás* 148

6.5.4.6 Metodologia para estimativa do potencial de geração de hidrogênio via reforma do biometano 148
Methodology for estimating the hydrogen generation potential via biomethane reforming

6.5.5 Resultados e representação espacial dos potenciais 148
Results and spatial representation of potential 149

6.6 Considerações finais / *Final considerations* 151





7 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO NA BAHIA 152
ENERGY RECOVERY OF RESIDUES FROM THE SUGAR-ENERGY SECTOR IN BAHIA

7.1 Produção, mercado e geração de energia no setor sucroenergético brasileiro /*Production, market, and energy generation in the Brazilian sugar-energy sector* 153

7.2 Panorama do setor sucroenergético na Bahia: produção e potencial industrial / *Overview of the sugar-energy sector in Bahia: industrial production and potential* 156

7.3 Aproveitamento energético da cana-de-açúcar e seus subprodutos *Energy recovery from sugarcane and its byproducts* 158

7.4 *Metodologia de cálculo / Calculation methodology* 158

7.5 *Resultados e representação espacial dos potenciais energéticos dos resíduos do setor sucroalcooleiro / Results and spatial representation of the energy potential of residues from the sugar-energy sector* 160

7.6 *Potenciais e desafios do setor sucroenergético da Bahia: reflexões estratégicas / Potentials and challenges of the sugar-energy sector in Bahia: strategic reflections* 167

8 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL NA BAHIA 168
ENERGY RECOVERY FROM LIVESTOCK MANURE IN BAHIA

8.1 Panorama dos rebanhos no Brasil / *Overview of livestock in Brazil* 169

8.2 Pecuária baiana: produção, distribuição territorial e desafios ambientais / *Livestock in Bahia: production, territorial distribution, and environmental challenges* 171

8.3 Metodologia de cálculo / *Calculation methodology* 172

8.4 Resultados e representação espacial dos potenciais energéticos dos dejetos da produção animal na Bahia 174
Results and Spatial Representation of Energy Potential from Livestock Manure in Bahia 173

8.4.1 Potencial energético dos dejetos da bovinocultura de corte 176
Energy potential from beef cattle farming manure

8.4.2 Potencial energético dos dejetos da bovinocultura de leite 178
Energy potential from dairy cattle manure

8.4.3 Potencial energético dos dejetos da suinocultura de corte 180
Energy potential from grower-finisher pigs manure

8.4.4 Potencial energético dos dejetos de matrizes suínas 182
Energy potential from breeding sows manure

8.4.5 Potencial energético dos dejetos de avicultura de corte 184
Energy potential from broiler birds manure

8.4.6 Potencial energético dos dejetos de avicultura de postura 186
Energy potential from laying hen manure

8.4.7 Potencial energético dos dejetos da caprinocultura 188
Energy potential from goat farming manure

8.4.8 Potencial energético dos dejetos da ovinocultura 190
Energy potential from sheep farming manure

8.4.9 Potencial energético dos dejetos da bubalinocultura 192
Energy potential from buffalo farming manure

8.4.10 Potenciais energéticos totais dos dejetos de produção animal 194
Total energy potential from livestock manure

8.5 A pecuária baiana e o futuro da bioenergia: um olhar estratégico 196
Bahia's livestock industry and the future of bioenergy: a strategic look

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS 199
FINAL CONSIDERATIONS

APÊNDICES 208
APPENDICES

A **APÊNDICE A - MODELO MATEMÁTICO E PARÂMETROS USADOS NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)** 209
MATHEMATICAL MODEL AND PARAMETERS USED IN THE ENERGY RECOVERY FROM MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW)

A.1 Valores da fração de carbono degradável de acordo com os componentes no fluxo de resíduos do Estado da Bahia 209
Values of the fraction of degradable carbon according to the components in the waste stream of the State of Bahia

A.2 Especificações técnicas usadas para estimativa de produção de hidrogênio 209
Technical specifications used to estimate hydrogen production

A.3 Condições de operação dos sistemas térmicos 210
Operating conditions of thermal systems

B **APÊNDICE B - MODELO MATEMÁTICO E PARÂMETROS USADOS NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE ESGOTO SANITÁRIO** 211
MATHEMATICAL MODEL AND PARAMETERS USED IN THE ENERGY RECOVERY FROM SANITARY SEWAGE

B.1 Especificações técnicas usadas para estimativa de produção de hidrogênio 212
Technical specifications used to estimate hydrogen production

C **APÊNDICE C - MODELO MATEMÁTICO E PARÂMETROS USADOS NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS** 213
MATHEMATICAL MODEL AND PARAMETERS USED IN THE ENERGY RECOVERY FROM AGRICULTURAL RESIDUES

D **APÊNDICE D - MODELO MATEMÁTICO E PARÂMETROS USADOS NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS EFLUENTES LÍQUIDOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE** 214
MATHEMATICAL MODEL AND PARAMETERS USED IN THE ENERGY RECOVERY OF LIQUID EFFLUENTS FROM PULP INDUSTRY

D.1 Especificações técnicas usadas para estimativa de produção de hidrogênio 215
Technical specifications used to estimate hydrogen production

E **APÊNDICE E - MODELO MATEMÁTICO E PARÂMETROS USADOS NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO** 216
MATHEMATICAL MODEL AND PARAMETERS USED IN THE ENERGY RECOVERY OF RESIDUES FROM THE SUGAR-ENERGY SECTOR

E.1 Especificações técnicas usadas para estimativa de produção de hidrogênio 216
Technical specifications used to estimate hydrogen production

F **APÊNDICE F - MODELO MATEMÁTICO E PARÂMETROS USADOS NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL** 217
MATHEMATICAL MODEL AND PARAMETERS USED IN THE ENERGY RECOVERY FROM LIVESTOCK MANURE

F.1 Especificações técnicas usadas para estimativa de produção de hidrogênio 217
Technical specifications used to estimate hydrogen production

REFERÊNCIAS 218
REFERENCES



Atlas Bioenergia Bahia

BIOENERGIA E BIOCOMBUSTÍVEIS DO FUTURO: CONCEITOS, TECNOLOGIAS E PERSPECTIVAS

BIOENERGY AND BIOFUELS OF THE FUTURE: CONCEPTS, TECHNOLOGIES AND PERSPECTIVES

1.1 APRESENTAÇÃO GERAL

A partir da conversão da biomassa, a bioenergia oferece alternativas sustentáveis e com baixa intensidade de carbono para diversos usos energéticos, como calor, eletricidade, combustíveis líquidos e hidrogênio, sendo considerada um dos pilares das estratégias globais de descarbonização [1]. Além de contribuir de forma efetiva para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), a bioenergia também tem potencial para dinamizar economias locais e regionais por meio do aproveitamento de resíduos e subprodutos oriundos de diversos setores produtivos.

Resíduos agrícolas, urbanos, animais, industriais e dos setores sucroenergético e de papel e celulose podem ser convertidos em energia, promovem a economia circular e agregam valor a materiais tradicionalmente descartados. Essa transformação contribui para a redução de impactos ambientais, amplia a segurança energética e viabiliza novas cadeias produtivas.

No contexto baiano, a diversidade de atividades econômicas e a disponibilidade de recursos naturais posicionam o Estado como uma referência nacional para o desenvolvimento de soluções baseadas em biomassa. O *Atlas Bioenergia Bahia* foi elaborado com o objetivo de mapear e quantificar o potencial técnico de aproveitamento energético dos resíduos disponíveis, a partir de dados primários coletados durante visitas técnicas realizadas em 2024, complementados por informações secundárias provenientes de órgãos oficiais.

O conteúdo está organizado por setores estratégicos: sucroenergético, resíduos sólidos urbanos (RSU), esgoto sanitário, setor de papel e celulose, agricultura e criação de animais. Cada capítulo apresenta informações sobre a geração de biomassa e resíduos, as tecnologias disponíveis para conversão energética e os vetores energéticos mais adequados em cada caso, como biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade.

Ao reunir dados técnicos e análises setoriais, este atlas busca contribuir com o planejamento energético estadual, orientar políticas públicas e fomentar investimentos em bioenergia sustentável no Estado da Bahia.

1.2 BIOMASSA E BIOENERGIA COMO VETORES DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A biomassa é um recurso renovável formado por matéria orgânica animal ou vegetal, resultante de processos biológicos associados à fotossíntese [2,3]. Ela abrange uma variedade de materiais, como madeira, resíduos florestais, culturas energéticas e resíduos agroindustriais ou urbanos, os quais podem ser convertidos em diferentes formas energéticas: calor, eletricidade e biocombustíveis líquidos e gasosos, além do hidrogênio renovável [4,3].

A transição energética global, impulsionada pela urgência em mitigar as mudanças climáticas e reduzir as emissões de GEE, exige a substituição progressiva dos combustíveis fósseis por fontes renováveis e menos intensivas em carbono [5]. Nesse cenário, a biomassa se destaca como alternativa estratégica pela sua versatilidade, oferecendo insumos sólidos (lenha, *pellets*), líquidos (etanol, biodiesel) e gasosos (biogás, biometano), aplicáveis a diferentes setores econômicos. A produção de hidrogênio a partir da biomassa também representa uma via promissora para descarbonizar setores de difícil abatimento, sendo elemento central nas políticas energéticas modernas [4]. Além disso, seu uso sustentável contribui não apenas para a mitigação climática, mas também para a preservação da biodiversidade e a recuperação de áreas degradadas, ampliando seus benefícios ambientais.

As tecnologias de conversão da biomassa incluem a combustão direta para geração de vapor e eletricidade, a digestão anaeróbica para produção de biogás e biometano, e processos bioquímicos para obtenção de combustíveis líquidos como o etanol e o biodiesel. A biomassa pode ser classificada em três categorias conforme o grau de sofisticação tecnológica: tradicional, baseada na combustão direta; aperfeiçoada, com eficiência intermediária; e moderna, que envolve processos industriais para produção de energéticos mais elaborados [6]. Complementarmente, os biocombustíveis produzidos a partir da biomassa são organizados em quatro gerações, de acordo com o tipo de matéria-prima utilizado e os processos de conversão empregados, como ilustrado no *Quadro 1.1*. Essa diversidade reforça seu papel estratégico na matriz energética, capaz de suprir demandas térmicas, mecânicas e elétricas.

Quadro 1.1 Classificação dos biocombustíveis em gerações, segundo origem da biomassa e tecnologia empregada.
Table 1.1 Classification of biofuels into generations, according to the origin of the biomass and technology used.

Geração *Generation*		Matéria-Prima *Raw Material*	Redução de GEE *GHG Reduction*	Tecnologia *Technology*
1G		Cultivos alimentares (cana-de-açúcar, milho, soja, trigo e óleos vegetais *Food crops (sugarcane, corn, soybeans, wheat, and vegetable oils)*	Moderada-alta (etanol de cana reduz em ~70-90% vs. gasolina) *Moderate-High (sugarcane ethanol reduces GHG emissions by ~70-90% vs. gasoline)*	Processos convencionais como fermentação (etanol) e transesterificação (biodiesel) *Conventional processes such as fermentation (ethanol) and transesterification (biodiesel)*
2G		Biomassa lignocelulósica (resíduos agrícolas como palha, bagaço de cana, resíduos florestais) e óleos residuais *Lignocellulosic biomass (agricultural residues such as straw, sugarcane bagasse, forestry residues) and residual oils*	Alta (etanol 2G emite ~12 gCO_2e/MJ vs. 23 gCO_2e/MJ do 1G) *High (2G ethanol emits ~12 gCO_2e/MJ vs. 23 gCO_2e/MJ for 1G)*	Hidrólise enzimática, gaseificação e processos termoquímicos (ex.: hidrotratamento de óleos vegetais - HVO) *Enzymatic hydrolysis, gasification, and thermochemical processes (e.g., hydrotreating of vegetable oils - HVO)*
3G		Microalgas e cianobactérias *Microalgae and cyanobacteria*	Muito Alta *Very High*	Cultivo em fotobiorreatores ou lagoas abertas, com extração de lipídios para biodiesel ou hidrocarbonetos *Cultivation in photobioreactors or open ponds, with lipid extraction for biodiesel or hydrocarbons*
4G		Biomassa geneticamente modificada ou processos biossintéticos avançados *Genetically modified biomass or advanced biosynthetic processes*	Emissões negativas *Negative emissions*	Biologia sintética, edição genética (CRISPR) e integração com captura e armazenamento de carbono (BECCS) *Synthetic biology, gene editing (CRISPR), and integration with carbon capture (BECCS)*

Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [7]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [7].

1.1 GENERAL OVERVIEW

Through biomass conversion, bioenergy provides renewable, low-carbon alternatives for heat, electricity, liquid fuels, and hydrogen, and is considered a key pillar of global decarbonization strategies [1]. In addition to effectively reducing greenhouse gas (GHG) emissions, bioenergy can stimulate local and regional economies by utilizing residues and by-products from various productive sectors.

Agricultural residues, urban and animal waste, and by-products from the sugar-energy and pulp and paper industries can be converted into energy, promoting a circular economy and adding value to materials that would otherwise be discarded. This transformation reduces environmental impacts, strengthens energy security, and enables new value chains.

In Bahia, the diversity of economic activities and the availability of natural resources position the state as a national reference for biomass-based solutions. The Bahia Bioenergy Atlas was developed to map and quantify the technical potential for energy recovery from available residues and waste, based on primary data collected during technical visits in 2024 and supplemented with secondary information from official sources.

The content is organized by strategic sectors: sugar-energy, municipal solid waste (MSW), sanitary sewage, pulp and paper, agriculture, and livestock. Each chapter presents information on biomass, residue and waste generation, available energy conversion technologies, and the most suitable energy vectors in each case, including biogas, biomethane, hydrogen, and electricity.

By compiling technical data and sectoral analyses, this atlas aims to support state energy planning, guide public policy, and foster investments in sustainable bioenergy in Bahia.

1.2 BIOMASS AND BIOENERGY AS VECTORS OF THE ENERGY TRANSITION

Biomass is a renewable resource composed of animal or plant organic matter, resulting from biological processes associated with photosynthesis [2,3]. It includes a variety of materials, such as wood, forest residues, energy crops, and agro-industrial residues, as well as MSW, which can be converted into different forms of energy: heat, electricity, liquid and gaseous biofuels, and renewable hydrogen [4,3].

The global energy transition, driven by the urgency to mitigate climate change and reduce GHG emissions, requires the gradual replacement of fossil fuels with renewable and lower-carbon sources [5]. In this context, biomass stands out as a strategic alternative due to its versatility, providing solid inputs (firewood, pellets), liquids (ethanol, biodiesel), and gases (biogas, biomethane) applicable to different economic sectors. Hydrogen production from biomass also represents a promising pathway to decarbonize hard-to-abate sectors, being a central element in modern energy policies [4]. Furthermore, its sustainable use contributes not only to climate mitigation but also to biodiversity preservation and the restoration of degraded areas, expanding its environmental benefits.

Biomass conversion technologies include direct combustion for steam and electricity generation, anaerobic digestion for biogas and biomethane production, and biochemical processes to obtain liquid fuels such as ethanol and biodiesel. Biomass can be classified into three categories according to technological sophistication: traditional, based on direct combustion; improved, with intermediate efficiency; and modern, involving industrial processes for more advanced energy products [6]. Additionally, biofuels produced from biomass are organized into four generations according to the type of feedstock and conversion processes used, as shown in Table 1.1. This diversity reinforces its strategic role in the energy mix, capable of supplying thermal, mechanical, and electrical demands.

Bioenergy derived from biomass plays a central role in global decarbonization strategies, providing low-carbon alternatives for heat, electricity, biofuels, and hydrogen [1]. In addition to reducing GHG emissions, it promotes local and regional economic development by utilizing residues and by-products, fostering sustainable value chains. Although it does not fully replace fossil fuels, bioenergy stands out as one of the few sources capable of delivering energy on a large scale and continuously, which is essential for sustainable societal development [2].

Biomass residues and waste, including agricultural and forest residues, industrial by-products, MSW, and animal waste, are abundant, low-cost, and readily accessible feedstocks (Figure 1.1). These residues and waste are rich in carbon, hydrogen, and oxygen, making them strategic for energy generation. Utilizing them favors decentralized production, reduces logistical costs, infrastructure investments, and electricity losses, and differs from intermittent sources such as solar and wind by providing continuous energy [2].

Beyond driving the circular economy and bioeconomy, the energetic use of residues is crucial for proper environmental management, preventing improper disposal that could lead to open-air decomposition and methane emissions, a greenhouse gas with a global warming potential 28 times higher than carbon dioxide [8]. Poorly managed residues contribute to water pollution and increased GHG emissions through anaerobic degradation and nutrient overload [9,5]. Bioenergy thus transforms residues and waste into value-added energy inputs, integrating them into the circular economy while contributing to environmental sanitation and climate mitigation.

In addition to driving the circular economy and bioeconomy, the energy use of residues and waste is fundamental for proper environmental management, preventing inadequate disposal that could lead to open-air decomposition and methane emissions, a greenhouse gas with a global warming potential 28 times greater than carbon dioxide [8]. Poorly managed waste contributes to water pollution and an increase in greenhouse gas emissions through anaerobic degradation and nutrient overload [9,5]. Thus, bioenergy transforms residues and waste into value-added energy inputs, integrating them into the circular economy while contributing to environmental sanitation and climate mitigation.

Residues and waste can be used for heat and electricity generation, biogas and biomethane production, or non-energy uses such as animal feed, soil cover, and organic fertilization, increasing the efficiency of co-product utilization [9]. However, challenges remain in integrating energy recovery policies with waste management, including the lack of coordinated planning and structured incentives [5].

In this context, bioenergy is part of a broader bioeconomy that also includes agriculture, forestry, fisheries, food production, paper, wood, agricultural fibers, biomaterials, chemicals and bio-based pharmaceuticals. Policies aimed at promoting this bioeconomy include actions such as developing technical skills, incentivizing biorefineries that integrate energy production and higher-value materials, researching sustainable food systems and new biotechnological pathways, as well as establishing specific targets and instruments for renewable energies [10].

1.3 MAIN ASPECTS OF SUSTAINABILITY

The sustainability of bioenergy produced from biomass residues and waste must be understood comprehensively, considering its multiple environmental, social, and economic impacts (Figure 1.2). This approach expands the role of bioenergy beyond simple energy production, positioning it as a strategic tool for building a low-carbon energy system aligned with global climate mitigation targets.

In the Brazilian context, characterized by significant agricultural and industrial activity, organic residues and waste have shifted from being merely an environmental liability to becoming valuable feedstocks for low-carbon renewable energy generation [11]. Technologies such as anaerobic digestion enable the conversion of animal waste into biogas and biomethane, reducing pollutant emissions and promoting local resource reuse. Using this energy directly on farms, with the option to inject surplus into the electricity grid, strengthens distributed generation and expands socioeconomic benefits in rural areas.

Figura 1.1 Resíduos de biomassa.
Figure 1.1 *Biomass residues.*



Foto / Photo: mailsonpignata / stock.adobe.com

A bioenergia, derivada da biomassa, ocupa papel central nas estratégias globais de descarbonização, fornecendo alternativas de baixo carbono para calor, eletricidade, biocombustíveis e hidrogênio [1]. Além da redução das emissões de GEE, promove o desenvolvimento econômico local e regional ao utilizar resíduos e subprodutos, fomentando cadeias produtivas sustentáveis. Embora não substitua completamente os combustíveis fósseis, a bioenergia destaca-se como uma das poucas fontes capazes de oferecer energia em grande escala e de forma contínua, fundamental para o desenvolvimento sustentável da sociedade [2].

Em especial, os resíduos de biomassa, que incluem materiais agrícolas, florestais, industriais, urbanos e de origem animal, são uma matéria-prima abundante, de baixo custo e fácil acesso *(Figura 1.1)*. Esses resíduos concentram carbono, hidrogênio e oxigênio, tornando-se estratégicos para a geração energética. O aproveitamento desses resíduos favorece a descentralização da produção, reduzindo custos logísticos, investimentos em infraestrutura e perdas elétricas, além de diferenciar-se de fontes intermitentes como solar e eólica pela oferta contínua de energia [2].

Além de impulsionar a economia circular e a bioeconomia, o uso energético dos resíduos é fundamental para o gerenciamento ambiental adequado, prevenindo o descarte inadequado que poderia levar à decomposição a céu aberto e à emissão de metano, um gás de efeito estufa com potencial aquecedor 28 vezes maior que o dióxido de carbono [8]. Resíduos malgeridos contribuem para a poluição hídrica e o aumento das emissões de GEE por meio da degradação anaeróbica e do excesso de nutrientes [9,5]. Assim, a bioenergia transforma resíduos em insumos energéticos de valor agregado, integrando-se à economia circular e contribuindo ao saneamento ambiental e à mitigação climática.

Os resíduos podem ser utilizados para geração de calor, eletricidade, produção de biogás e biometano ou destinados a usos não energéticos, como alimentação animal, cobertura do solo e adubação orgânica, aumentando a eficiência do aproveitamento dos coprodutos [9]. Contudo, desafios persistem na integração das políticas de aproveitamento energético e gestão de resíduos, como a ausência de planejamento coordenado e incentivos estruturados [5].

Nesse contexto, a bioenergia insere-se em uma bioeconomia mais ampla, que abrange também a agricultura, a silvicultura, a pesca, a produção de alimentos, papel, madeira, fibras agrícolas, biomateriais e produtos químicos e farmacêuticos de base biológica. As políticas voltadas à promoção dessa bioeconomia incluem ações como o desenvolvimento de competências técnicas, o incentivo a biorrefinarias que integrem a produção de energia e materiais de maior valor agregado, a pesquisa em sistemas alimentares sustentáveis e novas rotas biotecnológicas, bem como o estabelecimento de metas e instrumentos específicos para energias renováveis [10].

1.3. PRINCIPAIS ASPECTOS DA SUSTENTABILIDADE

A sustentabilidade da bioenergia gerada a partir de resíduos de biomassa deve ser compreendida de maneira abrangente, considerando seus múltiplos impactos ambientais, sociais e econômicos *(Figura 1.2)*. Essa abordagem amplia a função da bioenergia para além da simples produção de energia, posicionando-a como um instrumento estratégico na construção de um sistema energético de baixa emissão e alinhado às metas globais de mitigação das mudanças climáticas.

No contexto brasileiro, marcado pela expressiva atividade agropecuária e industrial, os resíduos orgânicos deixaram de ser apenas um passivo ambiental para se tornar insumos valiosos na geração de energia renovável de baixa emissão [11]. Tecnologias como a digestão anaeróbica permitem a conversão de dejetos animais em biogás e biometano, reduzindo emissões poluentes e promovendo o reaproveitamento local de recursos. O uso dessa energia diretamente nas propriedades, com possibilidade de injeção do excedente na rede elétrica, fortalece a geração distribuída e amplia os benefícios socioeconômicos no meio rural.

Essa valorização dos resíduos também fortalece os princípios da bioeconomia e da economia circular, ao fechar ciclos de carbono e nutrientes, reduzir a dependência de insumos externos e promover práticas agrícolas mais sustentáveis [12]. A produção de

energia a partir de resíduos, portanto, além de mitigar emissões, contribui para a melhoria da gestão de resíduos, reduz o descarte em lixões e aterros e diminui a pressão sobre os recursos naturais.

Contudo, os benefícios da bioenergia não estão isentos de riscos. A expansão desordenada pode gerar impactos negativos, como perda de biodiversidade, degradação do solo, escassez hídrica e pressões sobre áreas naturais, especialmente em contextos de mudança direta ou indireta no uso da terra [13,14]. A minimização desses efeitos requer planejamento territorial, práticas de manejo adequadas e políticas públicas que conciliem os objetivos de segurança energética com os de proteção ambiental e justiça social.

Além dos impactos ambientais, os efeitos sociais e econômicos da bioenergia são altamente dependentes do contexto local. Em regiões rurais, especialmente em países em desenvolvimento, a produção sustentável de bioenergia pode atuar como vetor de inclusão produtiva ao gerar empregos, diversificar a matriz econômica local e melhorar a infraestrutura rural [15]. O uso de resíduos como matéria-prima evita a competição direta com a produção de alimentos, ampliando as sinergias entre segurança alimentar e segurança energética. Estudos indicam, inclusive, que há disponibilidade de terras fora de áreas de floresta e uso urbano suficientes para conciliar a produção agrícola e bioenergética de forma equilibrada [16].

A flexibilidade dos sistemas bioenergéticos permite responder a variações de mercado, ajustando a produção entre energia e alimentos conforme a oferta e a demanda. Isso tende a reduzir a volatilidade de preços e os riscos de abastecimento [16]. Entretanto, essa flexibilidade precisa ser sustentada por políticas públicas eficazes, mecanismos de governança transparentes e capacitação técnica local. A bioenergia, quando bem implementada, pode contribuir para sistemas agroalimentares mais resilientes, ao mesmo tempo que promove ganhos ambientais, econômicos e sociais [17].

Dessa forma, os principais aspectos da sustentabilidade da bioenergia a partir de resíduos podem ser sintetizados em cinco dimensões centrais:

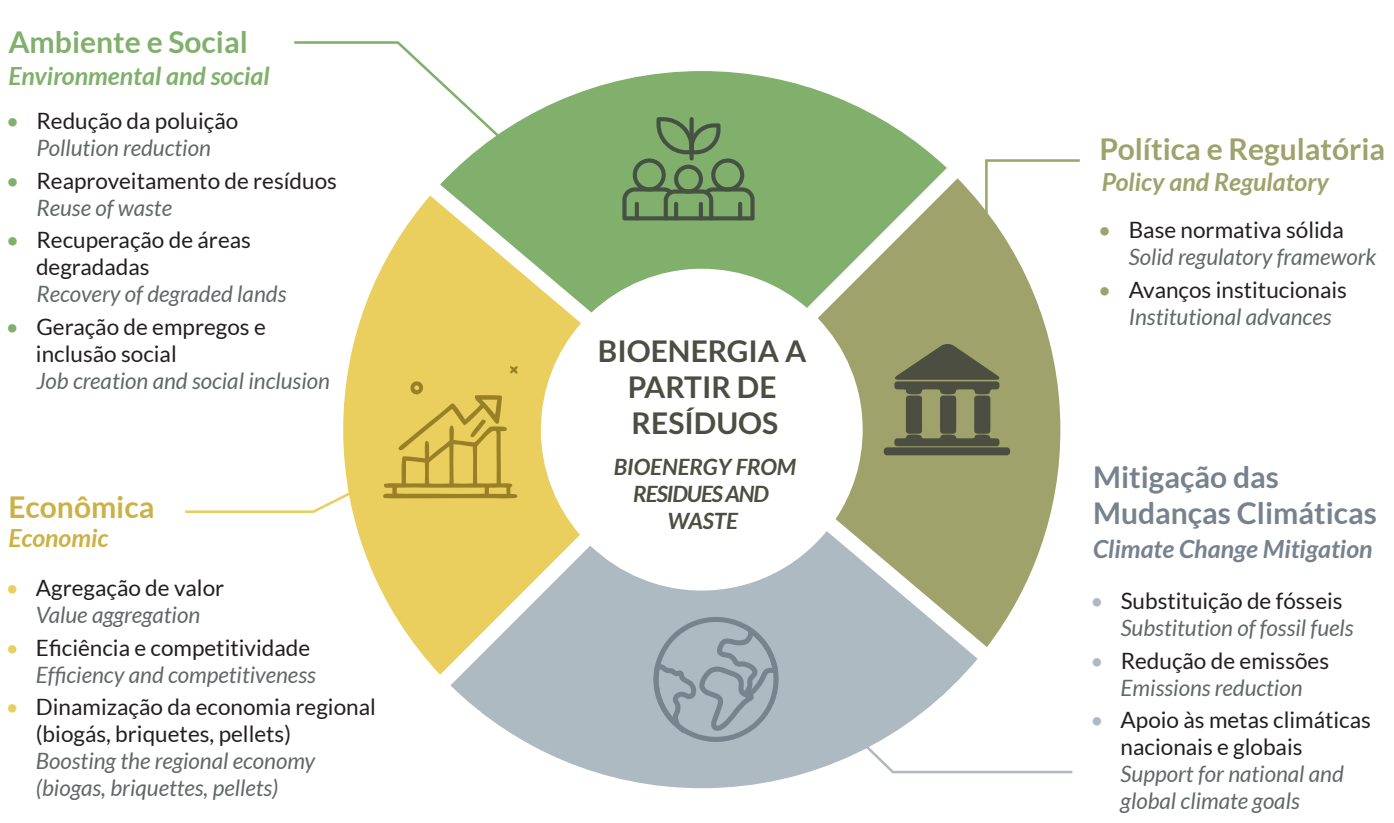
Nesse cenário, o mapeamento realizado no presente trabalho fornece uma base técnica estratégica para orientar políticas públicas e investimentos. Ao identificar os potenciais de uso de resíduos orgânicos de diferentes cadeias produtivas, o trabalho amplia as possibilidades de planejamento energético descentralizado e de baixo carbono. Mais que um levantamento técnico, o atlas contribui para a construção de um sistema energético mais sustentável, justo e inclusivo para o Estado da Bahia, apoiando a transição energética em bases territoriais, sociais e ambientais consistentes.

1.4 CONTRIBUIÇÕES DA BIOENERGIA PARA A MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A biomassa e a bioenergia apresentam vantagens expressivas no contexto da transição energética e da mitigação das mudanças climáticas. No setor elétrico, a bioenergia pode oferecer flexibilidade para complementar fontes intermitentes como a solar e a eólica. Já na indústria, a biomassa é capaz de fornecer calor de processo em altas temperaturas, além de permitir a produção de bioprodutos valiosos. Nos edifícios, é utilizada em sistemas de aquecimento eficiente e, no transporte, os biocombustíveis líquidos e gasosos representam alternativas viáveis para setores de difícil eletrificação, como aviação, navegação e transporte de carga pesada [10].

Do ponto de vista ambiental, os biocombustíveis possibilitam uma redução significativa de emissões de gases de efeito estufa, entre 50% e 70% em comparação aos combustíveis fósseis, além de serem, em sua maioria, biodegradáveis e menos tóxicos. Sua produção a partir de resíduos agrícolas contribui para o aproveitamento eficiente de biomassa que seria descartada, promovendo a valorização de recursos locais e a geração de renda no meio rural [18]. Além disso, a utilização de fontes renováveis melhora o acesso à energia, reduz a dependência de combustíveis fósseis e fortalece setores estratégicos como a agricultura e o florestal [10].

Figura 1.2 Dimensões da sustentabilidade da bioenergia a partir de resíduos.
Figure 1.2 *Dimensions of bioenergy sustainability from residues and waste.*



Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

This valorization of residues and waste also reinforces the principles of the bioeconomy and the circular economy, closing carbon and nutrient cycles, reducing dependence on external inputs, and promoting more sustainable agricultural practices [12]. Energy production from residues and waste, therefore, not only mitigates emissions but also improves waste management, reduces disposal in landfills and dumps, and lessens pressure on natural resources.

However, the benefits of bioenergy are not without risks. Unplanned expansion can generate negative impacts, such as biodiversity loss, soil degradation, water scarcity, and pressure on natural areas, especially in contexts of direct or indirect land-use change [13,14]. Minimizing these effects requires territorial planning, adequate management practices, and public policies that reconcile energy security objectives with environmental protection and social justice.

Beyond environmental impacts, the social and economic effects of bioenergy are highly context dependent. In rural areas, particularly in developing countries, sustainable bioenergy production can act as a vector for productive inclusion, generating employment, diversifying the local economic mix, and improving rural infrastructure [15]. Using residues and waste as feedstock avoids direct competition with food production and enhances synergies between food and energy security. Studies indicate that land is available outside forests and urban areas, which is sufficient to balance agricultural and bioenergy production [16].

The flexibility of bioenergy systems allows them to respond to market variations by adjusting the production of energy and food according to supply and demand. This tends to reduce price volatility and supply risks [16]. However, this flexibility must be supported by effective public policy, transparent governance mechanisms, and local technical capacity. When properly implemented, bioenergy can contribute to more resilient agri-food systems while promoting environmental, economic, and social benefits [17].

In this scenario, the mapping carried out in this work provides a strategic technical basis to guide public policies and investments. By identifying the potential uses of residues and waste from different value chains, this study expands the possibilities for decentralized, low-carbon energy planning. Beyond a technical survey, the atlas contributes to building a more sustainable, equitable, and inclusive energy system for Bahia, supporting the energy transition on consistent territorial, social, and environmental grounds.

1.4 CONTRIBUTIONS OF BIOENERGY TO CLIMATE CHANGE MITIGATION

Biomass and bioenergy offer significant advantages for energy transition and climate change mitigation. In the electricity sector, bioenergy can provide flexibility to complement intermittent sources, such as solar and wind. In industry, biomass can supply process heat at high temperatures and enable the production of valuable bioproducts. In buildings, biofuels are used in efficient heating systems, and in transportation, liquid and gaseous biofuels represent viable alternatives for sectors that are difficult to electrify, such as aviation, shipping, and heavy freight transport [10].

From an environmental perspective, biofuels enable a significant reduction in greenhouse gas emissions, between 50% and 70% compared to fossil fuels, and are largely biodegradable and less toxic than fossil fuels. Their production from agricultural residues contributes to the efficient use of biomass that would otherwise be discarded, promoting the valorization of local resources and generating income in rural areas [18]. Moreover, using renewable feedstocks improves energy access, reduces dependence on fossil fuels, and strengthens strategic sectors, such as agriculture and forestry [10].

Despite these advantages, it is important to consider the associated challenges, such as the initial production costs, risks to land use and food security, and potential impacts on ecosystems if the use of biomass is not well planned. However, when managed sustainably, bioenergy has significant potential to contribute to global emission reduction targets and the development of more resilient and integrated energy systems.

1.5 THE ROLE OF BIOENERGY IN THE CLIMATE AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT AGENDA

Bioenergy plays a strategic role in achieving the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) (Figure 1.3) and implementing the Paris Agreement, contributing to targets related to climate change mitigation, food security, sustainable land use, and access to renewable energy [10]. In the Brazilian context, this commitment is reflected in the Nationally Determined Contributions (NDCs), which recognize the importance of biomass as a renewable source for energy generation and decarbonization of the economy.

The established targets include expanding the share of sustainable bioenergy in the national energy mix, strengthening policies such as RenovaBio, maintaining a high share of renewables in the energy mix through 2030, and promoting the use of agricultural and urban residues for energy production (Table 1.2). These actions reinforce the role of biomass as a technological solution aligned with national and international climate and energy goals [19].

1.6 STRATEGIC SOURCES OF BIOENERGY: BIOFUELS AND ENERGY CARRIERS

Biogas, biomethane, electricity, and renewable hydrogen are key renewable energy alternatives currently under development in Brazil and worldwide. In Bahia, these sources are particularly relevant because of

Apesar dessas vantagens, é importante considerar os desafios associados, como os custos iniciais de produção, os riscos ao uso da terra e à segurança alimentar, e os impactos potenciais sobre ecossistemas se o uso da biomassa não for bem planejado. Ainda assim, quando manejada de forma sustentável, a bioenergia tem potencial significativo para contribuir com as metas globais de redução de emissões e com o desenvolvimento de sistemas energéticos mais resilientes e integrados.

1.5 O PAPEL DA BIOENERGIA NA AGENDA CLIMÁTICA E DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A bioenergia desempenha um papel estratégico na concretização dos *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável* (*ODS*) da Organização das Nações Unidas (ONU) *(Figura 1.3)* e na implementação do *Acordo de Paris*, contribuindo para metas relacionadas à mitigação das mudanças climáticas, segurança alimentar, uso sustentável da terra e acesso à energia renovável [10]. No caso brasileiro, esse compromisso se reflete nas *Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs*, na sigla em inglês), que reconhecem a importância da biomassa como fonte renovável para a geração de energia e para a descarbonização da economia. Entre as metas estabelecidas estão a expansão da participação da bioenergia sustentável na matriz energética, o fortalecimento de políticas como o *RenovaBio*, a manutenção de uma matriz energética com elevada participação de renováveis até 2030 e o incentivo ao uso de resíduos agrícolas e urbanos para produção de energia (*Quadro* 1.2). Essas ações reforçam o papel da biomassa como solução tecnológica alinhada às metas climáticas e energéticas nacionais e internacionais [19].

1.6 FONTES ESTRATÉGICAS DE BIOENERGIA: BIOCOMBUSTÍVEIS E VETORES ESTRATÉGICOS

Biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio renovável figuram entre as principais alternativas energéticas em desenvolvimento no Brasil e no mundo. Na Bahia, essas fontes ganham relevância diante do potencial de aproveitamento de resíduos agroindustriais, urbanos e da biomassa disponível. O avanço tecnológico tem impulsionado novas rotas de conversão energética mais eficientes e adaptadas às condições locais, enquanto políticas públicas como o *Protener* (*Lei nº 25.437/2024*) sinalizam diretrizes para o fomento à agroenergia, ao hidrogênio renovável e aos biocombustíveis. A articulação entre inovação, planejamento territorial e valorização de recursos regionais torna essas fontes estratégicas para a transição energética justa e sustentável no Estado.

Quadro 1.2 Metas das *NDCs* do Brasil (Atualizadas até 2024).
Box 1.2 *Brazil's NDC Targets (Updated to 2024).*

Horizonte Temporal *Time Horizon*	Setor / Tema *Sector / Theme*	Meta *Goal*	Instrumentos/Políticas *Instruments/Policies*	Observações *Observations*
2030	Redução de emissões totais *Total emissions reduction*	Redução de 53% das emissões até 2030 em relação a 2005 *53% reduction in emissions by 2030 compared to 2005*	*RenovaBio*, *ABC+* (Agricultura Baixo Carbono) *RenovaBio, ABC+ (Low-Carbon Agriculture)*	Corresponde a cerca de 1,32 $GtCO_2e$ em 2030 *Corresponds to approximately 1.32 $GtCO_2e$ in 2030*
	Energias renováveis *Renewable energy*	45% da matriz energética total com fontes renováveis *45% of the total energy mix from renewable sources*	PDE 2032, *Lei do* Combustível *do Futuro* *PDE 2032, Fuel of the Future Law*	Meta reafirmada nas versões anteriores e mantida na nova *NDC* *Target reaffirmed in previous versions and maintained in the new NDC*
	Bioenergia *Bioenergy*	~18% da matriz energética com bioenergia sustentável *~18% of the energy mix from sustainable bioenergy*	PDE 2032, *Lei do Combustível do Futuro* *PDE 2032, Fuel of the Future Law*	Inclui biomassa sólida, biogás, etanol e biodiesel *Includes solid biomass, biogas, ethanol, and biodiesel*
	Eletricidade *Electricity*	23% da eletricidade com solar, eólica e biomassa *23% of electricity from solar, wind, and biomass*	PDE 2032, *Lei* do *Combustível do Futuro* *PDE 2032, Fuel of the Future Law*	Foco em expansão da geração distribuída e diversificação da matriz elétrica *Focus on expanding distributed generation and diversifying the electricity mix*
	Biocombustíveis *Biofuels*	Expansão da produção e consumo de etanol e biodiesel *Expansion of ethanol and biodiesel production and consumption*	*RenovaBio* (CBios) *RenovaBio (CBios)*	Etanol: 30% de mistura na gasolina e biodiesel: 15% de mistura no diesel (B15) *Ethanol: 30% blend in gasoline and biodiesel: 15% blend in diesel (B15)*
	Biogás/biometano *Biogas/biomethane*	Produzir 1 bilhão de m^3/ano (resíduos agropecuários e urbanos) *Produce 1 billion m^3/year (agricultural and urban waste)*	*Programa* Metano *Zero (MMA)* *Zero Methane Program (MMA)*	
	Eficiência energética *Energy efficiency*	Melhoria de 10% na eficiência do setor energético *10% improvement in energy sector efficiency*		Redução de perdas e aumento da eficiência de conversão e uso final *Reducing losses and increasing conversion and end-use efficiency*
	Agricultura sustentável *Sustainable agriculture*	Recuperar 30 milhões de ha de pastagens degradadas (biomassa) *Recover 30 million hectares of degraded pastureland (biomass)*	*Plano ABC+* *ABC+ Plan*	
	Resíduos sólidos *Solid waste*	Reduzir emissões de metano em 30% (aterros e agropecuária) *Reduce methane emissions by 30% (landfills and agriculture)*	*Política Nacional de Resíduos Sólidos* *National Solid Waste Policy*	
2035	Redução de emissões totais *Total emissions reduction*	Redução de 59% a 67% das emissões líquidas até 2035 *59% to 67% reduction in net emissions by 2035*		Meta da *NDC* submetida em 2024 (COP 29); intervalo de 850 a 1.050 $MtCO_2e$ *NDC target submitted in 2024 (COP 29); range from 850 to 1,050 $MtCO_2e$*
	Tecnologias de mitigação *Mitigation technologies*	Incorporação de tecnologias com emissões negativas (BECCS) *Incorporation of negative emissions technologies (BECCS)*		Apoio à bioenergia com captura e armazenamento de carbono como estratégia de médio prazo *Support for bioenergy with carbon capture and storage as a medium-term strategy*
2050	Neutralidade climática *Climate neutrality*	Neutralidade de emissões líquidas até 2050 *Net emissions neutrality by 2050*		Meta de longo prazo vinculada à estratégia climática brasileira *Long-term goal linked to the Brazilian climate strategy*

Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [19]. / *Source: prepared by the authors based on data from [19].*

Figura 1.3 Bioenergia e suas contribuições aos ODSs.
Figure 1.3 *Bioenergy and its contributions to the SDGs.*



Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

1.6.1 BIOGÁS E BIOMETANO: POTENCIAL ENERGÉTICO, APLICAÇÕES E EXPANSÃO NO BRASIL

O biogás e o biometano têm papel estratégico na transição para uma matriz energética mais sustentável. No Brasil, sua produção é sustentada por três grandes fontes de substrato: agropecuária, indústria e saneamento. No setor agropecuário, destacam-se atividades de criação de animais como avicultura, bovinocultura, suinocultura e ovinocultura, entre outras, que geram resíduos orgânicos propícios à biodigestão. Na esfera industrial, os principais geradores de substrato incluem frigoríficos e abatedouros, usinas de açúcar e etanol, cervejarias e indústrias de papel e celulose, entre outros. Já no campo do saneamento, as fontes envolvem os aterros sanitários, as usinas de tratamento de resíduos orgânicos e as estações de tratamento de esgoto (ETE) [21].

O biogás, gerado pela decomposição de resíduos orgânicos, e o biometano, gás renovável obtido a partir do seu processo de purificação, configuram-se como fontes limpas e sustentáveis. Ambos vêm ganhando relevância no contexto energético, tanto no Brasil quanto no cenário internacional, por se apresentarem como soluções eficazes e alinhadas às metas de transição energética.

Os benefícios desses combustíveis vão além da simples produção de energia. Eles contribuem para a diminuição do volume de resíduos orgânicos, reduzem as emissões de gases de efeito estufa e estimulam práticas de economia circular. Por serem vetores energéticos versáteis, têm capacidade de atender a diferentes segmentos, incluindo transporte, indústria e geração distribuída, favorecendo a diversificação e descentralização da matriz energética. Além disso, sua produção local a partir de recursos amplamente disponíveis reforça a segurança energética em várias regiões.

Segundo o *Panorama de Biogás no Brasil* [22], o País registrou, em 2024, 1.633 plantas de biogás cadastradas, sendo 1.587 em operação e 46 em fase de implementação. Esse número representa um crescimento de 18% em relação a 2023, impulsionado pela

the potential for recovering agro-industrial residues, urban waste, and available biomass. Technological advances have driven the development of new, more efficient energy conversion routes adapted to local conditions, whereas public policies, such as Protener (Law No. 25437/2024), establish guidelines to promote agroenergy, renewable hydrogen, and biofuels. The integration of innovation, territorial planning, and valorization of regional resources makes these sources strategic for a just and sustainable energy transition in the state.

1.6.1 BIOGAS AND BIOMETHANE: ENERGY POTENTIAL, APPLICATIONS, AND EXPANSION IN BRAZIL

Biogas and biomethane play a strategic role in transitioning to a more sustainable energy mix. In Brazil, their production is supported by three main sources of feedstock: agriculture and livestock, industry, and waste. In the agricultural sector, animal production activities, such as poultry, cattle, swine, and sheep farming, generate organic residues suitable for anaerobic digestion. In the industrial sphere, the main generators of substrates include slaughterhouses and meat processing plants, sugar and ethanol mills, breweries, and paper and pulp industries. In the field of sanitation, sources include sanitary landfills, organic waste treatment plants, and sewage treatment plants (STP) [21].

Biogas, produced by the decomposition of organic residues, and biomethane, a renewable gas obtained through biogas upgrading, are clean and sustainable energy sources. Both have gained prominence in the energy context, in Brazil and internationally, as effective solutions aligned with the energy transition goals.

The benefits of these fuels extend beyond energy production. They help reduce the volume of organic residues and waste, decrease greenhouse gas emissions, and foster circular economy practices. As versatile energy carriers, they can serve different sectors, including transport, industry, and distributed generation, promoting diversification and decentralization of the energy mix. In addition, their local production from widely available resources enhances energy security in several regions.

According to the Biogas Brazil Overview [22], in 2024, the country registered 1,633 biogas plants, of which 1,587 were operational and 46 were under implementation. This represents an 18% increase compared to 2023, driven by the addition of 248 new units during this period. Among the operating plants, 1,268 belonged to the agricultural sector, 170 to the industrial sector, and 149 to the sanitation sector (MSW and sanitary sewage).

The installed operating capacity reached 4.7 billion Nm^3 per year, while the actual production was 641 million Nm^3 per year, a 16% increase compared to the previous year. Figure 1.4 shows the distribution of biogas plants by feedstock type and their respective installed capacities, highlighting the diversification of sources and the sector's progress in the Brazilian energy context.

According to [22], between 2015 and 2024, the number of biogas-producing units increased from 179 to 1,633, indicating significant expansion. The installed capacity for biogas production also grew substantially, with an average annual growth rate of 19% during this

period. Over the last five years, the installed capacity for biogas production has increased by an average of 19% per year. Moreover, plants that began operations in 2024 had an average installed capacity 54% higher than those that began in 2023.

Regarding biogas applications, electricity generation remains the primary energy use in Brazilian plants. Figure 1.5 presents the main use of biogas in plants operating in 2024.

The data indicate that the energy utilization of biogas in Brazilian plants is diverse, although electricity generation remains the primary application. In 2024, biogas use for electricity generation led in both the number of units and volume, with 1,349 producing plants and an installed capacity of 2,757 million Nm³ per year.

Biomethane is the second most relevant application. Its production has increasingly expanded in the domestic market, with 54 units in operation and an installed capacity of 1,744 million Nm³ per year. This growth reflects the rising demand for renewable fuels that can replace or complement natural gas distribution across different sectors.

The use of biogas for thermal energy was identified in 204 facilities, with an installed capacity of 178 million Nm³ per year, highlighting its role in industrial processes and in local heating applications. Finally, mechanical energy applications are the least significant, with only six units and an installed capacity of 2.8 million Nm³ per year.

Notably, a single production unit can operate multiple energy recovery pathways, utilizing biogas for various applications, for instance, by prioritizing power generation while producing biomethane as a secondary output. These attributes highlight the flexibility of biogas and underscore its increasing significance in Brazil's energy portfolio.

Nevertheless, despite this scenario and the trends in biogas and biomethane, according to the GEF Biogas Brazil project in partnership with the Brazilian Biogas Association (ABiogás) [23], the theoretical biogas production potential in Brazil is 78.9 billion Nm³/yr. Considering the amount of biogas produced by the 1,587 plants operating in 2024, totalling 4.7 billion Nm³, Brazil is exploiting only 6% of its potential.

The ABiogás study highlights the link between biogas production, reduction of GHG emissions, and job creation. Based on ABiogás's own data on the country's theoretical biogas production potential and proprietary methodologies to calculate social and environmental impacts, the research demonstrates that energy recovery and sustainable management of organic waste through biogas provides significant economic, social, and environmental benefits. The results indicate that if Brazil fully exploits its biogas potential, approximately 800,000 jobs could

entrada de 248 novas unidades no período. Entre as plantas em funcionamento, 1.268 pertenciam ao setor agropecuário, 170 ao setor industrial e 149 ao setor de saneamento, abrangendo resíduos sólidos urbanos e esgoto.

A capacidade instalada em operação atingiu 4,7 bilhões de Nm³/ano, enquanto a produção efetiva foi de 641 milhões de Nm³/ano, um aumento de 16% em relação ao ano anterior. A *Figura 1.4* apresenta a distribuição das plantas de biogás por tipo de substrato e sua respectiva capacidade instalada, evidenciando a diversificação das fontes e o avanço do setor no contexto energético brasileiro.

Ainda de acordo com o [22], de 2015 a 2024, o número de unidades produtoras cresceu de 179 para 1.633 plantas, evidenciando uma expansão significativa. A capacidade instalada para produção de biogás também aumentou de forma expressiva, com uma taxa de crescimento de 19% no período. Nos últimos cinco anos, a capacidade instalada para a produção de biogás cresceu, em média, 19% ao ano. Além disso, as plantas que entraram em operação em 2024 apresentam uma capacidade instalada média 54% maior que aquelas que entraram em operação em 2023.

Quanto aos usos do biogás, a geração de energia elétrica ainda é a principal aplicação energética realizada nas plantas brasileiras. A *Figura 1.5* apresenta o uso principal de biogás nas plantas em operação no ano de 2024.

De acordo com os dados apresentados, o aproveitamento energético do biogás nas plantas em operação no Brasil é diversificado, embora a geração de energia elétrica se mantenha como a principal aplicação. Em 2024, o uso do biogás para geração de energia elétrica liderou em número de unidades e volume, com 1.349 plantas produtoras e uma capacidade instalada de 2.757 milhões de Nm³/ano.

O biometano aparece como a 2ª aplicação mais relevante. A produção de biometano tem ganhado cada vez mais espaço no mercado interno, registrando 54 unidades em operação e uma capacidade instalada de 1.744 milhões de Nm³/ano. O crescimento desse uso reflete a crescente demanda por combustíveis renováveis que possam substituir ou complementar a distribuição de gás natural em diferentes setores.

Já o uso do biogás para energia térmica foi identificado em 204 empreendimentos, com uma capacidade instalada de 178 milhões de Nm³/ano, evidenciando sua utilização em processos industriais e aplicações locais de aquecimento. Por fim, a aplicação para energia mecânica é a menos expressiva, contabilizando apenas seis unidades e uma capacidade instalada de 2,8 milhões de Nm³/ano.

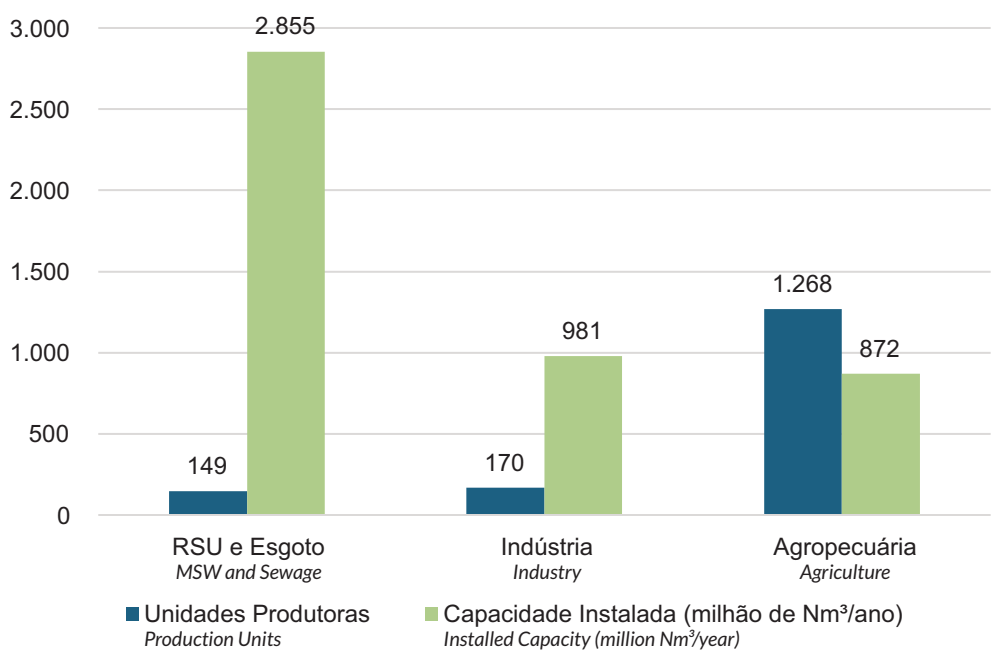
Vale destacar que uma mesma unidade produtora pode apresentar diferentes formas de aproveitamento energético, utilizando o biogás para mais de uma finalidade, como, por exemplo, geração de energia elétrica como uso principal e produção de biometano como uso secundário. Essas características demonstram a versatilidade do biogás e sua importância crescente na matriz energética brasileira.

Entretanto, apesar de todo este cenário e tendências do biogás e biometano, de acordo com o projeto *GEF Biogás Brasil*, em parceria com a Associação Brasileira do Biogás (ABiogás) [23], o potencial teórico de geração de biogás no Brasil é de 78,9 bilhões de Nm³/ano. Considerando a quantidade de biogás produzido pelas 1.587 plantas em operação em 2024, de 4,7 bilhões de Nm³, pode-se constatar que o Brasil explora apenas 6% desse potencial disponível.

O estudo da ABiogás evidencia a relação entre a produção de biogás, a redução das emissões de GEE e a geração de empregos. Utilizando dados da ABiogás sobre o potencial teórico de produção de biogás no País e metodologias próprias para calcular os impactos sociais e ambientais, a pesquisa aponta que o aproveitamento energético e a gestão sustentável de resíduos orgânicos por meio do biogás geram benefícios econômicos, sociais e ambientais significativos. Os resultados indicam que, se o Brasil explorasse todo o seu potencial de biogás, poderiam ser criados cerca de 800 mil empregos, sendo 110 mil apenas na Região Nordeste, além de evitar anualmente cerca de 642 milhões de t de CO_2 equivalente. Esses números demonstram que o biogás é um vetor estratégico para promover a competitividade, a sustentabilidade e o cumprimento dos *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)* da ONU.

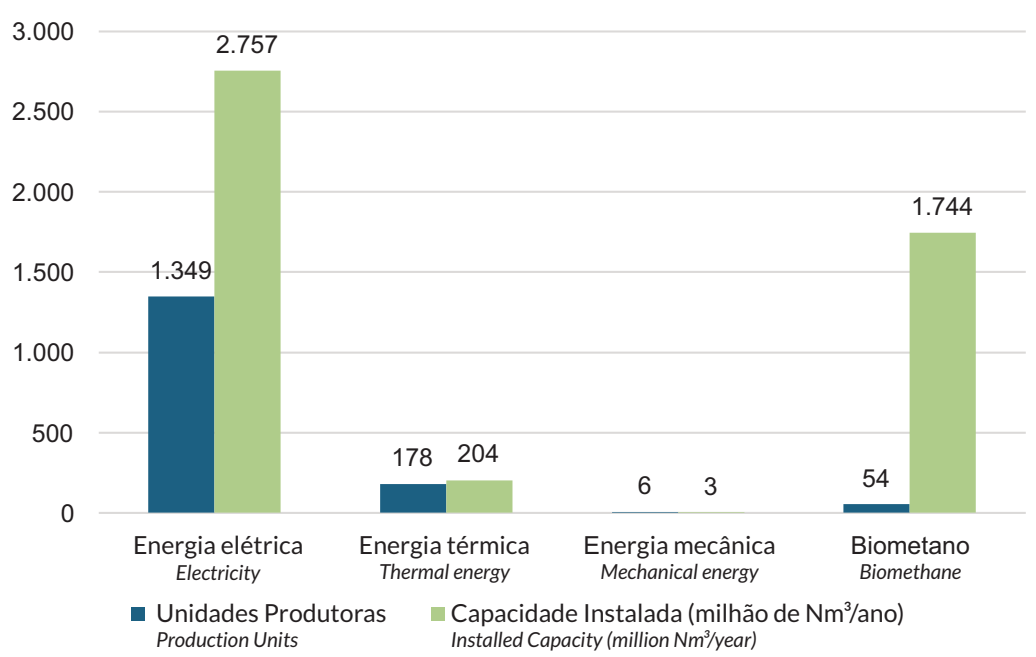
Apesar dos desafios ainda presentes no Brasil para a produção e o aproveitamento energético do biogás, que envolvem a ampliação da infraestrutura, aprimoramento da regulação e oferta de incentivos financeiros, a digestão anaeróbica, processo responsá-

Figura 1.4 Plantas de biogás por tipo de substrato e capacidade instalada.
Figure 1.4 *Biogas plants by substrate type and installed capacity.*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [22]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [22].

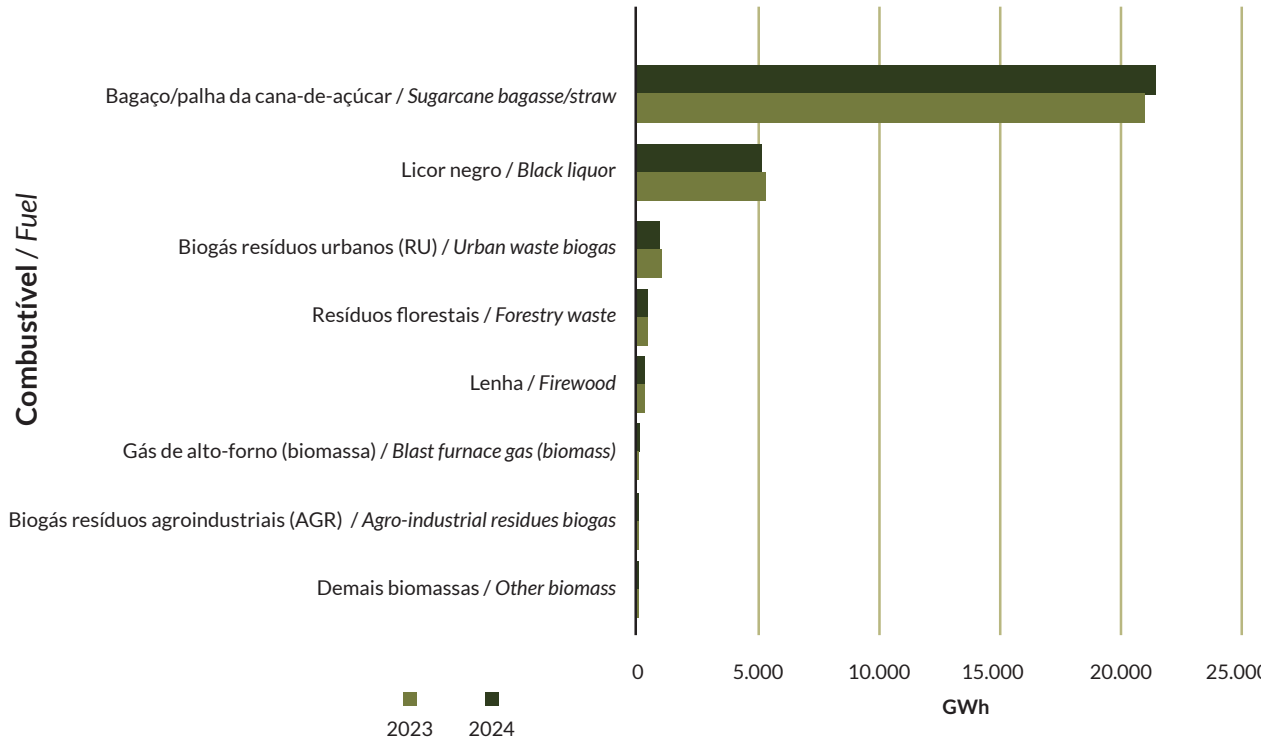
Figura 1.5 Uso principal de biogás nas plantas em operação no ano de 2024.
Figure 1.5 *Main use of biogas in plants in operation in 2024.*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [22]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [22].

Figura 1.6 Bioeletricidade ofertada para a rede, por tipo de biomassa, em 2023 e 2024 (GWh).

Figure 1.6 *Bioelectricity supplied to the grid, by type of biomass, in 2023 and 2024 (GWh).*



Fonte: adaptado de [24]. / *Source: adapted from* [24].

vel pela geração desse combustível, destaca-se como uma solução promissora tanto para a gestão de resíduos quanto para a produção de energia limpa. A expansão do uso de biogás e biometano no País representa uma oportunidade estratégica para fortalecer a matriz energética, reduzir emissões de gases de efeito estufa e impulsionar o desenvolvimento sustentável. Com investimentos consistentes em pesquisa, inovação, infraestrutura e políticas de incentivo, o Brasil tem condições de ampliar significativamente a participação desses biocombustíveis, consolidando-se como referência global na produção e utilização de fontes renováveis, aproveitando plenamente seu vasto potencial energético.

1.6.2 BIOELETRICIDADE NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: ESTADO ATUAL E PERSPECTIVAS

Para compreender o papel da bioeletricidade na transição energética, é importante analisar seu estágio atual, principais aplicações e o potencial de expansão no contexto nacional e estadual.

A bioeletricidade ocupa a 4ª posição na matriz elétrica brasileira, destacando-se por gerar investimentos e empregos de qualidade, além de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa [24]. A cana-de-açúcar, principal matéria-prima para geração da bioeletricidade, conta com uma cadeia produtiva consolidada e apresenta complementariedade à geração hidrelétrica, especialmente no período de estiagem, o que aumenta a segurança energética do país [25]. A geração ocorre próxima aos centros consumidores, reduzindo perdas na transmissão e diminuindo os custos de investimentos em infraestrutura [25]. Ademais, o uso da biomassa para energia contribui para o sequestro e armazenamento de carbono via tecnologias de captura e armazenamento de CO_2 (BECCS) e auxilia na mitigação do desmatamento e degradação do solo, ao aproveitar resíduos agrícolas e florestais [9,26]. Dessa forma, a bioeletricidade promove a diversificação da matriz energética brasileira com uma fonte renovável e estratégica.

Em 2024, a geração total de bioeletricidade para a rede atingiu 28.260 GWh, com o bagaço e a palha da cana-de-açúcar respondendo por 75% desse total, ou 21.218 GWh. Outros resíduos, como o licor negro da indústria de papel e celulose, também contribuem significativamente, com 5.118 GWh [24,5] *(Figura 1.6)*. Apesar da importância atual, o setor sucroenergético utiliza apenas cerca de 15% do seu potencial técnico, indicando que a geração efetiva poderia ser até sete vezes maior. Em 2024, a bioeletricidade evitou a emissão de aproximadamente 6,1 milhões de toneladas de CO_2e [24].

No cenário regional, são sete usinas gerando bioeletricidade com potência outorgada de 508 MWh, dos quais 449 MWh têm como combustível a lixívia, subproduto do processo de polpação da celulose [27].

As principais rotas tecnológicas para conversão da biomassa residual no Brasil incluem a biodigestão anaeróbia, aplicada a resíduos úmidos, que gera biogás para eletricidade e biometano; a gaseificação, que transforma resíduos com baixo teor de umidade em gás de síntese para motores, turbinas e produção de combustíveis; e a combustão em ciclo a vapor, rota tradicional para resíduos lignocelulósicos que sustenta a cogeração em larga escala. A escolha da tecnologia depende das características da biomassa, infraestrutura e logística locais, enquanto a integração de processos pode ampliar a eficiência e diversificação da matriz energética [5].

No âmbito da certificação e incentivo, o *Programa Selo Energia Verde*, criado em 2015 pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia (Unica), em parceria com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e com o apoio da Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia (Abraceel), é o primeiro programa brasileiro dedicado exclusivamente à energia elétrica gerada a

be created, including 110,000 in the Northeast Region, while avoiding approximately 642 million tons of CO_2 equivalent emissions annually. These figures demonstrate that biogas is a strategic vector for promoting competitiveness and sustainability in achieving the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) [23].

Despite the remaining challenges in Brazil regarding biogas production and energy utilization, which involve infrastructure expansion, regulatory improvement, and financial incentives, anaerobic digestion, the process responsible for producing this fuel, is a promising solution for both waste management and low-carbon energy production. Expanding the use of biogas and biomethane in Brazil represents a strategic opportunity to strengthen the energy mix, reduce greenhouse gas emissions, and promote sustainable development. With consistent investments in research, innovation, infrastructure, and incentive policies, Brazil is well-positioned to significantly increase the share of these biofuels, consolidating itself as a global reference in the production and utilization of renewable energy sources and fully leveraging its vast energy potential.

1.6.2 BIOELECTRICITY IN THE ENERGY TRANSITION: CURRENT STATUS AND PROSPECTS

To understand the role of bioelectricity in the energy transition, it is important to analyze its current stage, main applications, and expansion potential in both national and state contexts.

Bioelectricity ranks fourth in Brazil's electricity mix, generating quality investments and jobs, as well as contributing to the reduction of greenhouse gas emissions [24]. Sugarcane, the primary feedstock for bioelectricity generation, has a consolidated production chain and complements hydroelectric generation, especially during the dry season, enhancing the country's energy security [25]. Generation occurs close to consumption centers, thereby reducing transmission losses and lowering infrastructure investment costs [25]. Furthermore, biomass use for energy contributes to carbon sequestration and storage through CO_2 capture and storage technologies (BECCS) and helps mitigate deforestation and soil degradation by utilizing agricultural and forestry residues [9,26]. Thus, bioelectricity promotes the diversification of Brazil's energy mix with a renewable and strategic source.

In 2024, the total bioelectricity generation for the grid reached 28,260 GWh, with sugarcane bagasse and straw accounting for 75% of this total (21, 218 GWh). Other residues, such as black liquor from the pulp and paper industry, also contribute significantly, with 5,118 GWh [24,5] (Figure 1.6). Despite its current importance, the sugar-energy sector utilizes only approximately 15% of its technical potential, indicating that the actual generation could be up to seven times higher. In 2024, bioelectricity avoided the emission of approximately 6.1 Mt CO_2e [24].

At the regional level, seven plants generate bioelectricity with an authorized capacity of 508 MWh, of which 449 MWh is powered by black liquor, a byproduct of the cellulose pulping process [27].

The main technological routes for converting residual biomass in Brazil include anaerobic digestion of high-moisture residues, producing biogas for electricity and biomethane; gasification, which transforms low-moisture residues into synthesis gas for engines, turbines, and fuel production; and combustion in a steam cycle, a traditional route for lignocellulosic residues that supports large-scale combined heat and power (CHP) production. The most suitable technology depends on the biomass characteristics, as well as local infrastructure and logistics, while integrating processes can improve efficiency and broaden the energy mix [5].

Regarding certification and incentives, the "Programa Selo Energia Verde" (Green Energy Labeling Program), created in 2015 by the Sugarcane Industry and Bioenergy Union (UNICA), in partnership with the Chamber of Electric Energy Commercialization (CCEE), and supported by the Brazilian Association of Energy Traders (ABRACEEL), is the first Brazilian program dedicated exclusively to electricity generated from sugarcane biomass. The program aims to stimulate bioelectricity expansion and offer the free market the possibility of demonstrating commitment to renewable energy consumption [28].

PERSPECTIVES FOR BIOELECTRICITY

The Ten-Year Energy Expansion Plan (PDE 2034) [29] provides projections guiding Brazil's energy planning up to 2034, highlighting growth trends, shifts in generation profiles, and opportunities for utilizing biomass as an electricity source in Brazil. These projections are essential for assessing the expansion potential of bioelectricity and supporting strategies that enhance its role in the electricity mix of Brazil and Bahia.

The final energy consumption is projected to grow at an average annual rate of 2.1% between 2024 and 2034 [29]. Electricity generation is expected to increase by 3.3% per year, reaching 1,045.3 TWh by 2034 [29]. Centralized generation is forecasted to rise from 37 TWh in 2024 to 44 TWh in 2034, whereas self-and distributed generation are expected to grow from 33 TWh to 43 TWh [29]. Hydropower's absolute share in the electricity mix will remain virtually unchanged, and biomass-fired plants are projected to maintain their participation throughout the decade [29].

In recent years, bioelectricity trading within the Regulated Contracting Environment (RCE) has declined, although its relevance in the national electricity mix remains significant. The Free Contracting Environment (FCE) and spot market are expected to play a leading role, even considering potential new auctions under the RCE [29].

The technical potential for electricity generation and grid export from sugarcane biomass is estimated at 5.8 GWavg by 2034, with the Center-South region standing out because of its concentration of approximately 90% of the national sugarcane production and widespread mechanized harvesting [29]. In this region, straw and sugarcane tops could yield technical export potentials of 6.4 GWavg and 10.1 GWavg, respectively, by 2034 [29].

Residues such as vinasse, filter cake, straw, and sugarcane tops, which are still underutilized for electricity generation, offer significant potential for biogas production (Figure 1.7), which could further strengthen sugarcane biomass's role in the national energy system if fully harnessed [29]. The largest biogas potential in Brazil lies in the agricultural sector (crop residues and confined livestock waste); however, it also includes MSW and sanitary sewage [29]. Despite this potential, biogas currently accounts for only 0.12% of the domestic energy supply, although it has grown at 22.4% annually over the past five years [29]. In 2021, its installed capacity in distributed generation reached 43 MW, while the technical potential for biogas from vinasse and filter cake was estimated at 1.9 GWavg by 2034 [29].

Uncertainties remain regarding the impact of climate change on biomass availability. Droughts, heatwaves, and shifts in precipitation and temperature patterns may affect crop cycles, productivity, and land suitability, potentially displacing or limiting the cultivation areas (Figure 1.8).

In this context, the Bahia Bioenergy Atlas emerges as a strategic tool for state energy planning in Brazil. By mapping biomass residues and assessing their technical-energy potential, the Atlas provides an accurate foundation for identifying how these resources can meet PDE 2034 trends and targets, thereby expanding the share of bioelectricity in the electricity mix. Integrating regional diagnostics with national projections strengthens Bahia's ability to plan, attract investments, and expand renewable electricity generation, delivering substantial socioeconomic and environmental benefits.

partir da biomassa de cana. O programa visa a estimular a expansão da bioeletricidade e a oferecer ao mercado livre a possibilidade de demonstrar compromisso com o consumo de energia renovável [28].

PERSPECTIVAS PARA A BIOELETRICIDADE

Ao analisar o horizonte até 2034, o *Plano Decenal de Energia (PDE 2034)* [29] apresenta projeções que orientam o planejamento energético do País, trazendo tendências de crescimento, mudanças no perfil de geração e oportunidades para o aproveitamento da biomassa como fonte de energia elétrica. Essas informações são fundamentais para compreender o potencial de expansão da bioeletricidade e subsidiar estratégias que maximizem sua contribuição à matriz elétrica brasileira e baiana.

O consumo final de energia deverá crescer à taxa média de 2,1% ao ano de 2024 a 2034 [29]. A geração de energia elétrica evoluirá a uma taxa média de 3,3% ao ano, alcançando 1.045,3 TWh em 2034 [29]. A geração centralizada passará de 37 TWh em 2024 para 44 TWh em 2034, enquanto a autoprodução e a geração distribuída aumentarão de 33 TWh para 43 TWh [29]. A participação absoluta da fonte hidrelétrica na matriz permanecerá praticamente inalterada no período, e as usinas movidas a biomassa manterão sua participação ao longo do horizonte decenal [29].

Ao longo dos últimos anos, a comercialização da bioeletricidade no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) vem diminuindo, embora sem reduzir sua relevância na matriz elétrica nacional. A tendência é que o Ambiente de Contratação Livre (ACL) e o mercado *spot* assumam papel predominante na venda dessa energia, mesmo com a possibilidade de novos leilões que possam ampliar o volume comercializado no ACR [29].

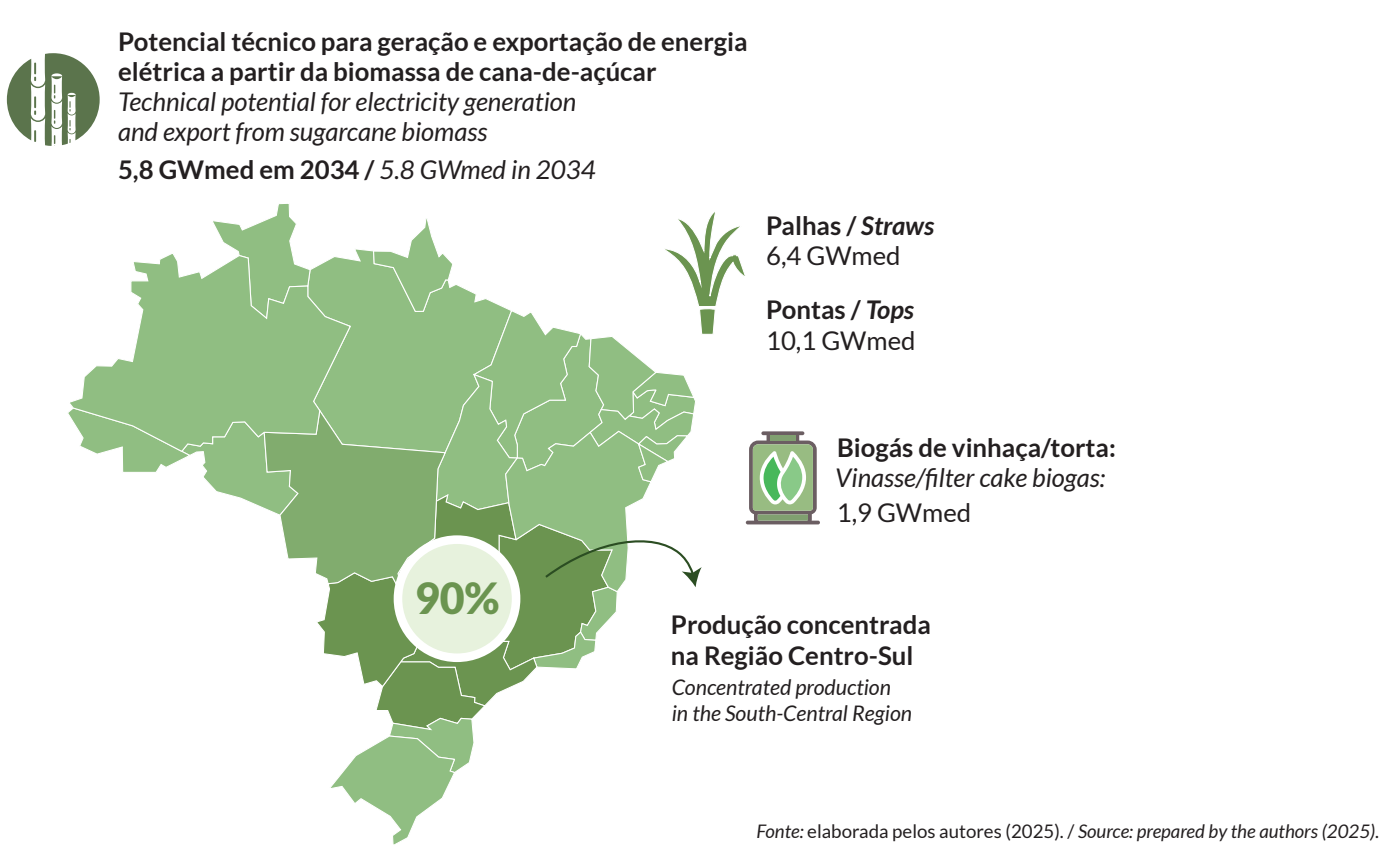
Resíduos como vinhaça, torta de filtro, palhas e pontas, ainda pouco utilizados para geração elétrica nas usinas sucroenergéticas, possuem elevado potencial para a produção de biogás *(Figura 1.7)*, o que ampliaria a relevância da biomassa de cana no cenário energético nacional, caso seu aproveitamento técnico seja maximizado [29]. O maior potencial de biogás no Brasil encontra-se no setor agropecuário (resíduos agrícolas e pecuária confinada), mas também inclui resíduos sólidos urbanos e esgoto [29]. Apesar desse expressivo potencial, a participação do biogás na oferta interna de energia ainda é modesta (0,12%), embora apresente crescimento acelerado de 22,4% ao ano no último quinquênio [29]. Em 2021, sua capacidade instalada em geração distribuída alcançou 43 MW. Para o biogás proveniente de vinhaça e torta de filtro, estima-se um potencial técnico de exportação de cerca de 1,9 GWmed em 2034 [29].

Por outro lado, persistem incertezas quanto aos impactos das mudanças climáticas sobre a produção de biomassa. Eventos como secas e ondas de calor extremo podem afetar negativamente a disponibilidade de matéria-prima, enquanto alterações nos padrões de precipitação e temperatura podem influenciar ciclos, produtividade e a própria aptidão agrícola, deslocando ou inviabilizando áreas de cultivo *(Figura 1.8)*.

À luz dessas perspectivas, o *Atlas Bioenergia Bahia* torna-se um instrumento estratégico para o planejamento energético estadual. Ao mapear detalhadamente os resíduos de biomassa disponíveis e seu potencial técnico-energético, o atlas permite identificar de forma precisa como esses recursos podem ser aproveitados para responder às tendências e metas projetadas pelo *PNE 2034*, ampliando a participação da bioeletricidade na matriz elétrica. Essa integração entre diagnóstico regional e projeções nacionais fortalece a capacidade de a Bahia planejar, atrair investimentos e expandir a geração elétrica renovável, com benefícios socioeconômicos e ambientais significativos.

Dessa forma, o aproveitamento dos resíduos agrícolas, florestais e urbanos mapeados no atlas revela um potencial de expansão promissor e ainda pouco explorado. Ao alinhar essas oportunidades às diretrizes nacionais, reforça-se o papel estratégico da bioeletricidade na diversificação da matriz energética da Bahia e do Brasil, promovendo sustentabilidade, segurança energética e desenvolvimento econômico.

Figura 1.7 Projeções para o aproveitamento energético da biomassa de cana-de-açúcar no Brasil em 2034.
Figure 1.7 *Projections for the energy use of sugarcane biomass in Brazil by 2034.*



Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Figura 1.8 Incertezas quanto aos impactos das mudanças climáticas sobre a produção de biomassa.
Figure 1.8 *Uncertainties persist regardingthe impacts of climate change on biomass production.*



EVENTOS EXTREMOS: SECAS E ONDAS DE CALOR
EXTREME EVENTS: DROUGHTS AND HEAT WAVES

- Afetam negativamente a disponibilidade de matéria-prima.
  Negatively affect the availability of raw materials.

ALTERAÇÕES NOS PADRÕES DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA
CHANGES IN PRECIPITATION AND TEMPERATURE PATTERNS

- Influenciam ciclos, produtividade e a aptidão agrícola.
  Can influence cycles, productivity, and agricultural suitability itself.
- Deslocam ou inviabilizam áreas de cultivo.
  Displace or make cultivation areas unviable.

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

1.6.3 HIDROGÊNIO RENOVÁVEL: PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS E O PAPEL DA BIOMASSA

As emissões antropogênicas já elevaram a temperatura média global em cerca de 1,1 °C em relação aos níveis pré-industriais [30]. Para limitar esse aumento a 1,5 °C, é imprescindível alcançar a neutralidade de carbono até 2050, o que demanda a mitigação das emissões em todos os usos finais de energia [30]. Medidas como eficiência energética, eletrificação e ampliação das fontes renováveis podem atender, aproximadamente, 70% da redução necessária [30]. Contudo, o hidrogênio (H_2) desempenhará um papel crucial na descarbonização de setores de difícil abatimento, como a indústria pesada, o transporte de longa distância e o armazenamento sazonal de energia [31].

Segundo a IRENA [31], o hidrogênio pode contribuir com cerca de 10% da mitigação necessária para atingir a meta de 1,5 °C e atender, aproximadamente, 12% da demanda final de energia. Em 2023, o consumo mundial de H_2 atingiu 97 milhões de t (Mt), com a China respondendo por quase 28 Mt e os Estados Unidos por 14% do consumo global [32]. O uso concentrou-se principalmente em aplicações tradicionais, como refino e produção química, cujas emissões associadas chegaram a até 380 Mt de CO_2 no refino e cerca de 680 Mt de CO_2 no setor industrial [32].

O hidrogênio é amplamente utilizado em setores industriais como refino, produção de amônia e metanol, e metalurgia. No Brasil, o setor petroquímico é o principal produtor e consumidor [33]. Com a pressão por processos de baixo carbono, cresce a produção de H_2 a partir de fontes renováveis. A *Lei nº 14.948/2024* define hidrogênio de baixo carbono como aquele produzido com emissões iguais ou inferiores a 7 $kgCO_2eq/kgH_2$ (até 2030) e hidrogênio renovável como o obtido de biomassa, etanol, hidrogênio natural (fontes geológicas), biocombustíveis ou eletrólise com energia renovável [34].

O País possui grande potencial para hidrogênio renovável a partir de resíduos agroindustriais, especialmente do setor sucroenergético (bagaço, torta de filtro, vinhaça), e de resíduos urbanos e agropecuários. A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (Forsu) e os dejetos de criação animal (bovinos, suínos e aves), por exemplo, podem ser convertidos em biogás por digestão anaeróbia e, posteriormente, em H_2 via reforma a vapor do biometano (*Steam Methane Reforming* – SMR). Já a fração seca dos RSU e resíduos lignocelulósicos pode ser utilizada na gaseificação, gerando gás de síntese rico em hidrogênio [4].

Nos últimos anos, o biogás e seu processo de purificação (*upgrading*) para biometano, bem como a gaseificação de resíduos, vêm ganhando destaque como rotas promissoras para produção de H_2. O biometano, por ter composição semelhante ao gás natural, pode substituir a matéria-prima na reforma a vapor, agregando benefícios como ser renovável e evitar a liberação de metano na atmosfera [35]. A gaseificação, por sua vez, converte resíduos em gases combustíveis (H_2, CO, CO_2, CH_4 e hidrocarbonetos) sob alta temperatura, com vapor de água como agente de reação [36].

Além disso, o hidrogênio pode reagir com CO_2 para formar hidrocarbonetos, produzir amônia (utilizada em fertilizantes e como combustível no transporte marítimo), gerar combustíveis sintéticos e atuar como agente redutor na produção de aço [31]. A substituição do H_2 fóssil pelo renovável, especialmente aquele produzido a partir de resíduos, integra-se ao modelo de economia circular e complementa o papel da energia eólica e solar, predominantes na Região Nordeste [37]. Entretanto, sua viabilidade depende da competitividade de custos frente ao hidrogênio fóssil, da disponibilidade de recursos renováveis e do custo de produção e distribuição.

Nesse contexto, o Brasil destaca-se pelo elevado potencial de produção de hidrogênio renovável, resultado da ampla disponibilidade de recursos energéticos renováveis, da abundância de biomassa e do crescente interesse de investidores internacionais [38]. A Bahia, especificamente, reúne condições excepcionais para o desenvolvimento do hidrogênio verde (H_2V), graças à combinação de recursos renováveis abundantes, com potencial instalado estimado em 365,9 GW para energia eólica e 2.045,9 GW para solar fotovoltaica, além de significativa disponibilidade hídrica, da ordem de 69,2 bilhões de m^3/ano, capaz de atender à demanda atual e futura da produção de H_2V [39,40,41].

Esses recursos viabilizam o desenvolvimento de rotas termoquímicas e bioquímicas para a produção de hidrogênio, fortalecendo a posição da Bahia como um polo emergente na transição energética [41]. As regiões Centro-Norte, Oeste e Sudoeste destacam-se pela aptidão para a produção de hidrogênio via eletrólise,

The utilization of agricultural, forestry, and urban residues mapped in the atlas reveals a promising but still underexploited expansion potential for bioenergy production. Aligning these opportunities with national strategies reinforces the strategic role of bioelectricity in diversifying Bahia and Brazil's energy mix, promoting sustainability, energy security, and economic development.

1.6.3 RENEWABLE HYDROGEN: TECHNOLOGICAL PERSPECTIVES AND THE ROLE OF BIOMASS

Anthropogenic emissions have already raised the global average temperature by approximately 1.1 ºC above pre-industrial levels [30]. To limit warming to 1.5 ºC, achieving carbon neutrality by 2050 is imperative, requiring emissions reductions across all end-use sectors [30]. Measures such as energy efficiency, electrification, and the expansion of renewable sources could account for roughly 70% of the necessary mitigation [30]. However, hydrogen (H_2) will be indispensable for decarbonizing hard-to-abate sectors, including heavy industry, long-distance transport, and seasonal energy storage [31].

According to IRENA [31], hydrogen could provide around 10% of the mitigation needed to meet the 1.5 ºC target and supply roughly 12% of final energy demand. In 2023, global hydrogen production reached 97 Mt, with China producing nearly 28 Mt and the United States accounting for about 14% of total output [32]. Hydrogen use remains concentrated in traditional applications such as refining and chemical synthesis, generating associated emissions of up to 380 Mt CO_2 in refining and approximately 680 Mt CO_2 in the industrial sector [32].

Hydrogen is extensively used in refining, ammonia synthesis, methanol production, and metallurgy. In Brazil, the petrochemical industry is both the main producer and the primary consumer [33]. Driven by the need for low-carbon processes, renewable hydrogen production is expanding rapidly. Law No. 14948/2024 defines low-carbon hydrogen as that produced with emissions ≤ 7 $kgCO_2eq/kgH2$ by 2030, and renewable hydrogen as that derived from biomass, ethanol, geological hydrogen, biofuels, or electrolysis powered by renewable energy [34].

Brazil has substantial potential for renewable hydrogen production from agricultural and agro-industrial residues, such as sugarcane bagasse, filter cake, and vinasse, as well as from urban wastes. The organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) and animal manure from cattle, swine, and poultry can undergo anaerobic digestion to produce biogas, which can then be converted into hydrogen through steam methane reforming (SMR) of biomethane. The dry fraction of MSW and lignocellulosic residues can be gasified to generate a synthesis gas rich in hydrogen [4].

In recent years, biogas production and upgrading to biomethane, along with residue gasification, have emerged as promising routes for hydrogen generation. Biomethane, similar in composition to natural gas, can substitute fossil feedstocks in SMR, offering advantages such as renewability and reduced methane emissions [35]. Gasification, in turn, converts residues into combustible gases, mainly H_2, CO, CO_2, CH_4, and hydrocarbons, at high temperatures using steam as the reaction medium [36].

Hydrogen can also react with CO_2 to form hydrocarbons, produce ammonia for fertilizers and maritime fuels, generate synthetic fuels, and serve as a reducing agent in steelmaking [31]. Substituting fossil-based hydrogen with renewable hydrogen, particularly from residues, aligns with the circular economy and complements wind and solar energy, which are predominant in Brazil's Northeast [37]. Its feasibility depends on cost competitiveness relative to fossil hydrogen, availability of renewable resources, and production and distribution costs.

Brazil stands out for its abundant renewable resources, extensive biomass availability, and strong foreign investment interest, positioning the country for large-scale renewable hydrogen development [38]. Bahia, in particular, offers exceptional conditions for Green Hydrogen (GH_2)

development, combining 365.9 GW of wind potential, 2,045.9 GW of solar photovoltaic potential, and approximately 69.2 billion m^3/year of renewable water resources, sufficient to meet both current and future GH_2 production demands [39,40,41].

These resources enable thermochemical and biochemical routes for hydrogen production, reinforcing Bahia's position as an emerging hub in the energy transition [41]. The central-northern, western, and southwestern regions are well suited for electrolytic hydrogen production, while the Metropolitan Region of Salvador, with its petrochemical and port infrastructure, provides the necessary conditions for domestic integration and export logistics [41].

Producing green ammonia from GH_2 in western Bahia represents a strategic opportunity to reduce GHG emissions in local agribusiness. Furthermore, sectors such as mining, steelmaking, transportation, and energy storage offer additional opportunities for integrating renewable hydrogen into the state's energy mix [41].

The GH_2 Bahia Atlas plays an essential role in mapping and guiding the development of this sector in the state, bringing together detailed analyses of natural resources, infrastructure, and regional potential that support strategic planning and investment attraction. The Bahia Bioenergy Atlas complements this effort by presenting the potential of renewable hydrogen produced from biomass residues available in the state, thereby expanding the range of sustainable sources for the hydrogen value chain.

It is essential to invest in technological innovation, establish clear regulations, foster public–private partnerships, and strengthen workforce training to consolidate Bahia as a leader in the hydrogen economy. These actions will enable the state to develop a sustainable industry capable of creating jobs, boosting the regional economy, and contributing to Brazil's and the world's climate commitments.

Biomass plays a pivotal role in this context as a renewable carbon source that enables hydrogen production integrated with sustainable residue management. In Bahia, agricultural and sugar-energy residues such as vinasse and filter cake, as well as urban wastes, represent abundant feedstocks that, beyond reducing environmental impacts, strengthen the circular economy, generate rural income, and enhance energy security.

Consolidating hydrogen in Brazil and Bahia will rely not only on resource availability and technological maturity, but also on consistent public policies, clear regulatory frameworks, and investment in production, storage, and distribution infrastructure. Thanks to its renewable potential, abundant biomass, and strategic location near domestic and international markets, Bahia is well positioned to lead pioneering initiatives in this sector. Integrating biomass into hydrogen production allows the state to diversify its energy mix, foster regional development, attract investment, and become a national and international reference in the low-carbon transition.

1.7 TECHNOLOGIES FOR ENERGY CONVERSION OF RESIDUES AND WASTES

Residual biomass energy recovery can occur through different pathways, depending on the type of residue, its physicochemical characteristics, and the intended energy use. In this study, organic residues were considered, evaluating their potential for electricity, biogas, biomethane, and hydrogen production. The most relevant conversion pathways for these residues and wastes include direct combustion, anaerobic digestion, steam reforming of biomethane, gasification, and water electrolysis (Figure 1.9).

In Brazil, the maturity and suitability of residual biomass conversion technologies vary according to the type of residue or waste, the operational scale, and the intended energy use. Among commercially established routes, anaerobic digestion, gasification, and combustion or incineration in a steam cycle stand out. Optimal application of each pathway depends on biomass availability and characteristics, logistical conditions, and existing infrastructure. In many cases, integrating technologies, such as combining anaerobic digestion with CHP or coupling gasification with hydrogen production, enhances efficiency and diversifies the energy portfolio, contributing to a more resilient and lower-carbon energy mix [5].

enquanto a Região Metropolitana de Salvador possui infraestrutura industrial consolidada, incluindo polos petroquímicos e portuários, facilitando a integração produtiva e logística para abastecimento interno e exportação [41].

O uso do H_2V para produção de amônia verde no Extremo Oeste da Bahia representa uma estratégia importante para reduzir as emissões de gases de efeito estufa no agronegócio local. Além disso, setores como mineração, siderurgia, transporte e armazenamento energético oferecem oportunidades para a inserção do hidrogênio renovável na matriz energética estadual [41].

O *Atlas H_2V Bahia* tem papel fundamental ao mapear e orientar o desenvolvimento desse setor no estado, oferecendo análises detalhadas sobre recursos naturais, infraestrutura e potenciais regionais, contribuindo para o planejamento estratégico e atração de investimentos. Ele se complementa com o presente trabalho, que traz informações essenciais sobre o potencial do hidrogênio produzido a partir dos resíduos de biomassa disponíveis no estado, ampliando o leque de fontes sustentáveis para a cadeia produtiva do hidrogênio.

Para que a Bahia se firme como líder na economia do hidrogênio, são necessários investimentos em inovação tecnológica, regulamentação clara, parcerias público-privadas e capacitação profissional. Assim, o Estado poderá consolidar uma indústria sustentável que gere empregos, fortaleça a economia regional e contribua para os compromissos climáticos nacionais e globais.

A biomassa desempenha papel fundamental nesse cenário por ser uma fonte renovável de carbono neutro e por permitir a produção de hidrogênio associada à gestão sustentável de resíduos. No caso baiano, resíduos do setor sucroenergético (como vinhaça e torta de filtro), resíduos agropecuários e urbanos representam uma matéria-prima abundante que, além de reduzir impactos ambientais, fortalece a economia circular, gera renda em áreas rurais e contribui para a segurança energética do Estado.

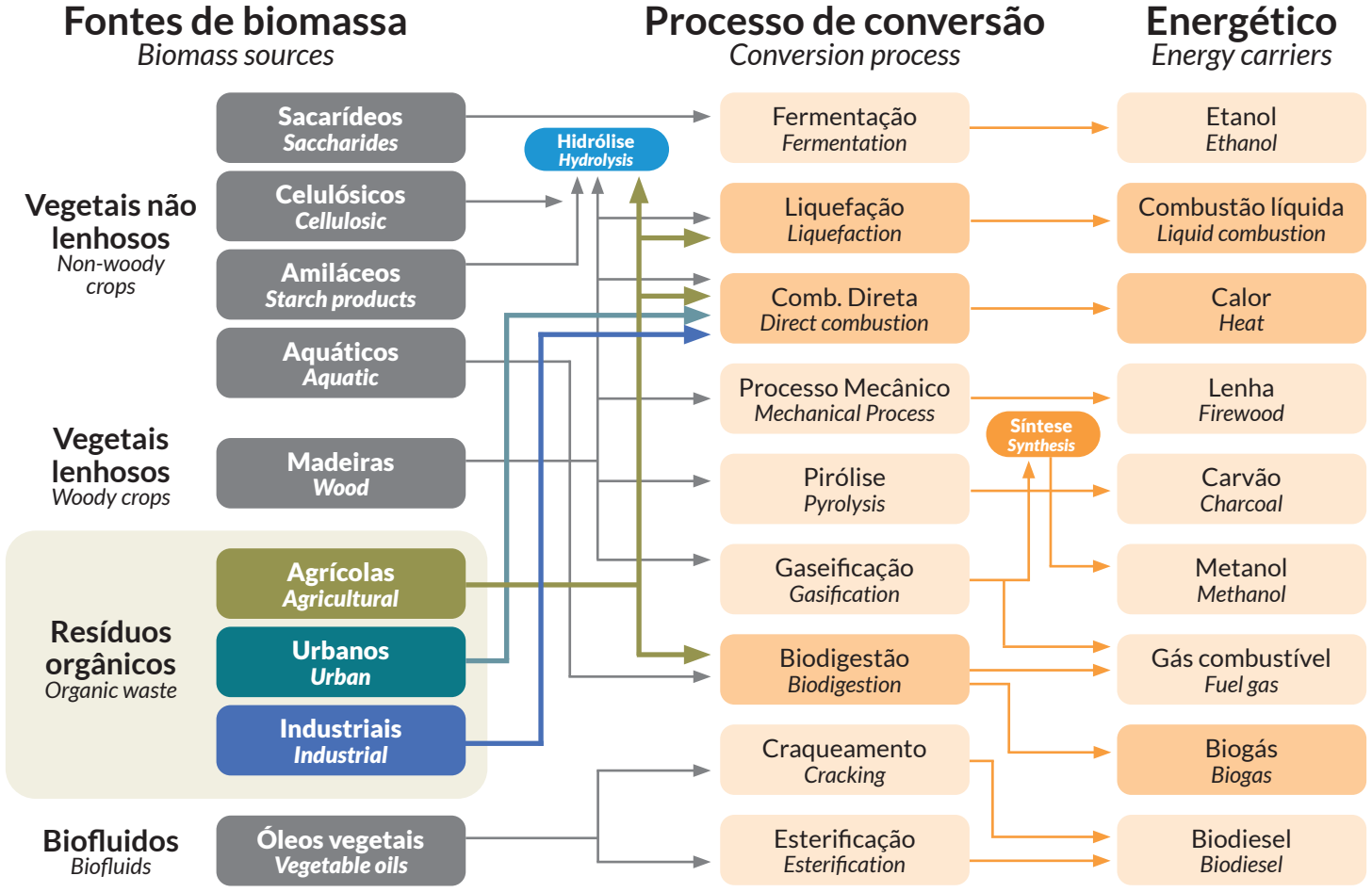
Assim, a consolidação do hidrogênio no Brasil e na Bahia dependerá não apenas da disponibilidade de recursos e da maturidade tecnológica, mas também de políticas públicas consistentes, marcos regulatórios claros e investimentos em infraestrutura para produção, armazenamento e distribuição. No caso baiano, a combinação de potencial renovável, disponibilidade de biomassa e localização estratégica junto a mercados internos e externos coloca o Estado em posição privilegiada para liderar iniciativas pioneiras nesse setor. Ao integrar a biomassa às rotas de produção de hidrogênio, a Bahia pode não apenas diversificar sua matriz energética, mas também promover desenvolvimento regional, atrair investimentos e posicionar-se como referência nacional e internacional na transição para uma economia de baixo carbono.

1.7 TECNOLOGIAS PARA CONVERSÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS

O aproveitamento energético da biomassa residual pode ocorrer por diferentes rotas, dependendo do tipo de resíduo, de suas características físico-químicas e do uso final da energia. As rotas de conversão mais relevantes para esses resíduos incluem a combustão direta, a biodigestão anaeróbia, a reforma a vapor do biometano, a gaseificação e a eletrólise da água *(Figura 1.9)*.

No contexto brasileiro, as tecnologias de conversão energética da biomassa residual apresentam diferentes graus de maturidade e adequação conforme o tipo de resíduo, a escala de operação e o uso final da energia. Entre as rotas comercialmente consolidadas, destacam-se a biodigestão anaeróbia, a gaseificação e a combustão ou

Figura 1.9 Principais processos de conversão de biomassa.
Figure 1.9 *Main biomass conversion processes.*



Fonte: adaptado de [42]. / *Source: adapted from* [42].

incineração em ciclo a vapor. O uso adequado de cada rota depende da disponibilidade e características da biomassa, das condições logísticas e da infraestrutura existente. Em muitos casos, a integração de tecnologias, como a associação de biodigestão e cogeração ou de gaseificação com produção de hidrogênio, amplia a eficiência e a diversificação do portfólio energético, contribuindo para uma matriz energética mais resiliente e de menor emissão de carbono [5].

1.7.1 COMBUSTÃO DIRETA E COGERAÇÃO

A combustão direta de combustíveis sólidos envolve a queima imediata de um material, como biomassa ou resíduos, na presença de excesso de ar. Normalmente, a combustão direta ocorre em fornos, turbinas a vapor ou caldeiras, a temperaturas que variam entre 800 e 1.000 °C. Esse processo é adequado para todos os tipos de biomassa e resíduos sólidos com baixo teor de umidade (<50%). O processo libera calor, que é utilizado para aquecer a água e transformá-la em vapor de alta pressão. Esse vapor se expande por meio de uma turbina acoplada a um gerador elétrico, convertendo energia térmica em mecânica e, subsequentemente, em eletricidade. Após a expansão, o vapor é condensado e recirculado, formando um ciclo termodinâmico de Rankine. Essa tecnologia está comercialmente disponível a partir de capacidades de aproximadamente 200 kW [5] e é amplamente empregada em regiões com suprimento contínuo de biomassa.

Essa rota é tradicional para resíduos lignocelulósicos como bagaço e palha de cana, licor negro da indústria de papel e celulose, casca de arroz e resíduos florestais. É base para sistemas de cogeração em larga escala, sobretudo no setor sucroalcooleiro, e também para a incineração de resíduos sólidos urbanos, com recuperação de energia. No caso da incineração, além da recuperação energética, há a redução do volume de resíduos destinados a aterros, desde que sejam adotados sistemas rigorosos de controle de emissões e disposição adequada de cinzas e escórias [5].

Nesse contexto, destaca-se também a cogeração, muito utilizada no setor sucroalcooleiro e diretamente associada aos ciclos a vapor. Trata-se de uma tecnologia que permite produzir, simultaneamente, eletricidade e calor útil a partir de uma mesma fonte de combustível, aumentando significativamente a eficiência global do processo [5]. No uso de biomassa e resíduos, a cogeração é frequentemente implementada com caldeiras e turbinas a vapor ou motores a gás alimentados por biogás ou biomassa sólida. O calor gerado pode ser utilizado em processos industriais, aquecimento de ambientes ou secagem de produtos agrícolas, enquanto a eletricidade é consumida localmente ou injetada na rede. Isso melhora a eficiência energética do sistema e reduz perdas e emissões quando comparado à geração separada de calor e eletricidade.

Figura 1.10 Representação conceitual da cogeração de energia a partir da biomassa.
Figure 1.10 *Conceptual representation of biomass-based CHP generation.*



Ilustração / *Illustration*: Iala Firdaa/stock.adobe.com

1.7.2 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

A biodigestão anaeróbia é direcionada principalmente a substratos úmidos, como dejetos da pecuária, resíduos de abatedouros, efluentes industriais e a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, além de coprodutos da agroindústria, como vinhaça, torta de filtro e palha de cana em codigestão. Esse processo ocorre na ausência de oxigênio, pela ação de microrganismos que decompõem a matéria orgânica e produzem biogás, composto majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O biogás pode ser utilizado diretamente para geração de eletricidade em motogeradores a gás ou em microturbinas, ou ainda em caldeiras para cogeração [43].

Para resíduos animais, como dejetos de bovinos, suínos e aves, e para resíduos urbanos, como a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (Forsu), esgoto doméstico e lodo de estações de tratamento, a biodigestão é a tecnologia predominante. É especialmente adequada ao tratamento de substratos úmidos, com composição média de 60% de CH_4 e 35% de CO_2. Os biodigestores podem variar em formato, tamanho e configuração, sendo os mais comuns os modelos indiano e chinês, de baixo custo e operação simples, além de sistemas de fluxo contínuo como o CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor*), o UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) e as lagoas anaeróbias. A escolha do modelo depende das características do substrato, da escala de operação e dos objetivos de aproveitamento energético [43].

O biogás gerado na biodigestão pode passar por um processo de *upgrading*, no qual é purificado para remoção de CO_2, H_2S e outros contaminantes, resultando em biometano com características semelhantes às do gás natural [5]. O biometano pode ser injetado na rede de gás, utilizado como combustível veicular (GNV renovável) ou como matéria-prima para outros processos energéticos, como a geração de eletricidade ou a produção de hidrogênio. Dependendo do uso final, o biogás pode necessitar de etapas distintas de tratamento. O processo de limpeza (*cleaning process*) consiste na remoção de compostos presentes em menores quantidades, como vapor d'água, H_2S, NH_3, siloxanos e particulados, sendo suficiente para aplicações como a queima direta em caldeiras, motores estacionários e microturbinas para geração elétrica e térmica [43].

Para produção de biometano destinado ao uso veicular ou à injeção na rede de distribuição, o biogás deve passar por duas etapas. Na primeira, de limpeza, são empregadas tecnologias para retirada dos contaminantes. Na segunda, de purificação ou *upgrading*, são

1.7.1 DIRECT COMBUSTION AND COMBINED HEAT AND POWER

Direct combustion of solid fuels involves the immediate burning of a material, such as biomass or residues and wastes, in the presence of excess air. Typically, direct combustion occurs in a furnace, steam turbine, or boiler at temperatures ranging from 800 to 1,000 °C. This process is suitable for all types of biomass and solid waste with low moisture content (<50%).

The process releases heat, which is used to raise water to high-pressure steam. This steam expands through a turbine coupled to an electric generator, converting thermal into mechanical energy and subsequently into electricity. After expansion, the steam is condensed and recirculated, forming a Rankine thermodynamic cycle. This technology is commercially available from capacities of approximately 200 kW [5] and is widely employed in regions with a continuous supply of biomass.

This pathway is traditional for lignocellulosic residues, such as sugarcane bagasse and straw, black liquor from the pulp and paper industry, rice husks, and forest residues. It forms the basis for large-scale CHP systems, particularly in the sugar-energy sector, and also for the incineration of MSW with energy recovery. In the case of incineration, besides producing energy, the volume of waste sent to landfills is reduced, provided that strict emission control and proper ash and slag management systems are implemented [5].

In this context, CHP is widely used in the sugarcane industry and linked to steam cycles. It allows simultaneous production of electricity and useful heat from a single fuel source, significantly increasing process efficiency [5]. In biomass and waste applications, CHP is typically implemented with steam boilers and turbines or gas engines powered by biogas or solid biomass. The heat can be used in industrial processes, space heating, or drying agricultural products, while electricity is consumed on-site or injected into the grid, improving overall energy efficiency and reducing emissions compared to separate heat and power generation.

1.7.2 ANAEROBIC DIGESTION

Anaerobic digestion is primarily used for wet substrates, such as livestock manure, slaughterhouse waste, industrial effluents, and the OFMSW, as well as agro-industrial byproducts such as vinasse, filter cake, and sugarcane straw in co-digestion. This process occurs in the absence of oxygen, where microorganisms break down organic matter and produce biogas, mainly composed of methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2). Biogas can be used directly for electricity generation in gas motor generators or microturbines, or in boilers for CHP [43].

For animal wastes, such as cattle, swine, and poultry manure, and for urban wastes including OFMSW, domestic sewage, and treatment plant sludge, anaerobic digestion is the predominant technology. It is particularly suitable for wet substrates, with an average composition of 60% CH_4 and 35% CO_2. Digesters vary in shape, size, and configuration, with the most common being the low-cost and simple Indian and Chinese models, as well as continuous-flow systems such as CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), and anaerobic lagoons. The choice of digester depends on substrate characteristics, scale of operation, and energy recovery objectives [43].

Biogas produced via anaerobic digestion can undergo upgrading, where it is purified to remove CO_2, H_2S, and other contaminants, yielding biomethane with properties similar to natural gas [5]. Biomethane can be injected into the gas grid, used as vehicle fuel (renewable CNG), or as a feedstock for other energy processes, such as electricity or hydrogen production. Depending on the end use, biogas may require different treatment stages. The cleaning process removes minor compounds, such as water vapor, H_2S, NH_3, siloxanes, and particulates, which is sufficient for applications like direct combustion in boilers, stationary engines, and microturbines for electricity and heat generation [43].

For biomethane intended for vehicle fuel use or injection into the gas pipeline network, biogas must undergo two stages. The first, cleaning, removes contaminants, while the second, purification or upgrading, adjusts component concentrations to meet technical standards regulating biomethane quality. Available commercial technologies include membrane separation, physical absorption, chemical absorption, pressure swing adsorption (PSA), and pressurized water scrubbing (PWS). Less common methods are cryogenic separation and sonic nozzle separation, the latter still under development.

Among the available technologies for biogas purification, PSA and PWS benefit from the most extensive technical and cost data, as well as broad practical experience. More recently, chemical absorption and membrane technologies have gained market share, although consolidated information on performance and costs remains limited. The choice of the most appropriate technology largely depends on the composition of the biogas, the required purification efficiency, the scale of production, and the related costs [43].

1.7.3 GASIFICATION

Gasification of solid biomass represents a key technological route for the utilization of agricultural residues, forest residues, low-moisture municipal solid waste, as well as refuse-derived fuel (RDF). In this thermochemical process, the solid fuel is converted under controlled conditions into synthesis gas (syngas), consisting of H_2, CO, CO_2, CH_4, and other hydrocarbons. Syngas can undergo water-gas shift reactions followed by purification to produce high-purity hydrogen [4], or it can be used directly for electricity generation in engines, gas turbines, or fuel cells. In some cases, the non-recyclable fraction of municipal solid waste is processed into RDF, which can then be used as feedstock for gasification [5].

Gasification involves four main stages: drying, pyrolysis, partial combustion, and reduction. It occurs at temperatures above 700–800 ºC using gasifying agents such as air, oxygen, or steam. The efficiency and quality of the syngas depend on the type of gasifier, operational conditions, and the biomass feedstock. Two main types of gasifiers are used: fixed-bed and fluidized-bed [5]. Fixed-bed gasifiers are simpler and suitable for small-scale applications. Updraft units can handle wetter and more heterogeneous biomass, while downdraft units produce higher-quality gas but require drier, more uniform feedstock, with typical efficiencies around 15–20% [5]. Fluidized-bed gasifiers suspend the biomass in inert particles, allowing better mixing and higher efficiency. They can operate at atmospheric or elevated pressure and are classified as bubbling or circulating, with circulating units achieving higher efficiency but with higher operational costs and complexity [5]. In summary, fixed-bed gasifiers are suitable for small to medium scales at lower costs, whereas fluidized-bed gasifiers are preferred for medium to large scales, offering higher efficiency at greater complexity. Typical power outputs are up to 1 MW for fixed-bed units and up to 10 MW for fluidized-bed units [5] (Figure 1.11).

1.7.4 STEAM REFORMING FOR HYDROGEN PRODUCTION

Biomass can be converted into hydrogen through different technological pathways, which vary according to the type of feedstock, operating conditions, and intermediate products obtained. Among the most established routes is biomethane steam reforming (Steam Methane Reforming – SMR), in which methane reacts with steam at high temperatures (700-1,000 ºC) in the presence of a catalyst, producing primarily H_2 and CO (Figure 1.12). This mature and widely applied technology allows hydrogen production to be integrated into existing biogas utilization systems, such as landfills, sanitary sewage treatment plants, or agro-industrial units [4].

Emerging processes include biomass pyrolysis, which produces bio-oil and hydrogen-rich gases, and advanced thermochemical routes such as gasification with pure oxygen or oxy-combustion, aiming for higher efficiency and integration with carbon capture and storage systems (BECCS). Water electrolysis powered by renewable electricity derived from biomass, although not directly using biomass as feedstock, represents a complementary option for renewable hydrogen production, with the potential to reduce process-related emissions [4].

aplicados processos adicionais para ajustar as concentrações dos componentes às especificações estabelecidas pelas normas técnicas que regulamentam a qualidade do biometano. Entre as tecnologias disponíveis e já comercializadas para essas etapas destacam-se a separação por membranas, a absorção física, a absorção química, a adsorção por balanço de pressão (*Pressure Swing Adsorption – PSA*) e a lavagem com água pressurizada (*Pressured Water Scrubbing – PWS*). Menos comuns são a separação criogênica e a separação em bocal sônico, esta última ainda em desenvolvimento.

O *PSA* e o *PWS* apresentam maior disponibilidade de dados técnicos e de custos, além de ampla experiência prática em purificação de biogás. Mais recentemente, tecnologias como a absorção em solução química e o uso de membranas vêm ganhando participação de mercado, embora ainda haja poucas informações consolidadas sobre desempenho e custos. A escolha da tecnologia mais adequada depende fortemente da composição do biogás, da eficiência de purificação desejada, da escala de produção e dos custos associados [43].

1.7.3 GASEIFICAÇÃO

A gaseificação da biomassa sólida constitui uma rota tecnológica de destaque para o aproveitamento de resíduos agrícolas, florestais, resíduos sólidos urbanos com baixo teor de umidade, bem como do combustível derivado de resíduos urbanos (CDRU). Nesse processo termoquímico em atmosfera controlada, em gás de síntese (*syngas*), ccomposto por hidrogênio H_2, monóxido de carbono CO, dióxido de carbono CO_2, metano CH_4 e hidrocarbonetos. O *syngas* pode ser submetido a reações de deslocamento gás-água (*water-gas shift*) e posterior purificação para obtenção de hidrogênio de alta pureza [4] ou utilizado diretamente para geração de eletricidade em motores, turbinas a gás ou células a combustível. Em alguns casos, a fração não reciclável do RSU é transformada em combustível derivado de resíduos urbanos (CDRU), que pode ser usado como insumo na gaseificação [5] *(Figura 1.11)*.

A gaseificação envolve quatro etapas principais: secagem, pirólise, combustão parcial e redução, ocorrendo a temperaturas acima de 700 a 800 °C com agentes gaseificadores como ar, oxigênio ou vapor d'água. A eficiência e a qualidade do *syngas* dependem do tipo de gaseificador, das condições operacionais e da biomassa utilizada. Existem dois principais tipos de gaseificador: leito fixo e leito fluidizado [5]. Os gaseificadores de leito fixo, mais simples e usados em pequena escala, podem ser de fluxo ascendente (*up-draft*), que aceitam biomassa mais úmida e heterogênea, e de fluxo descendente (*down-draft*), que produzem gás de melhor qualidade, porém exigem biomassa mais seca e uniforme, com eficiência em torno de 15% a 20% [5]. Os gaseificadores de leito fluidizado mantêm a biomassa suspensa em partículas inertes, permitindo melhor mistura e maior eficiência. Podem operar em pressão atmosférica ou pressurizada e são classificados em borbulhantes e circulantes, este último com maior eficiência, porém custo e complexidade operacionais maiores [5]. Em resumo, leito fixo é indicado para pequena/média escala com custos menores, enquanto leito fluidizado atende médias e grandes escalas com maior eficiência e complexidade. Potências típicas são até 1 MW para leito fixo e até 10 MW para leito fluidizado [5].

1.7.4 REFORMA A VAPOR PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

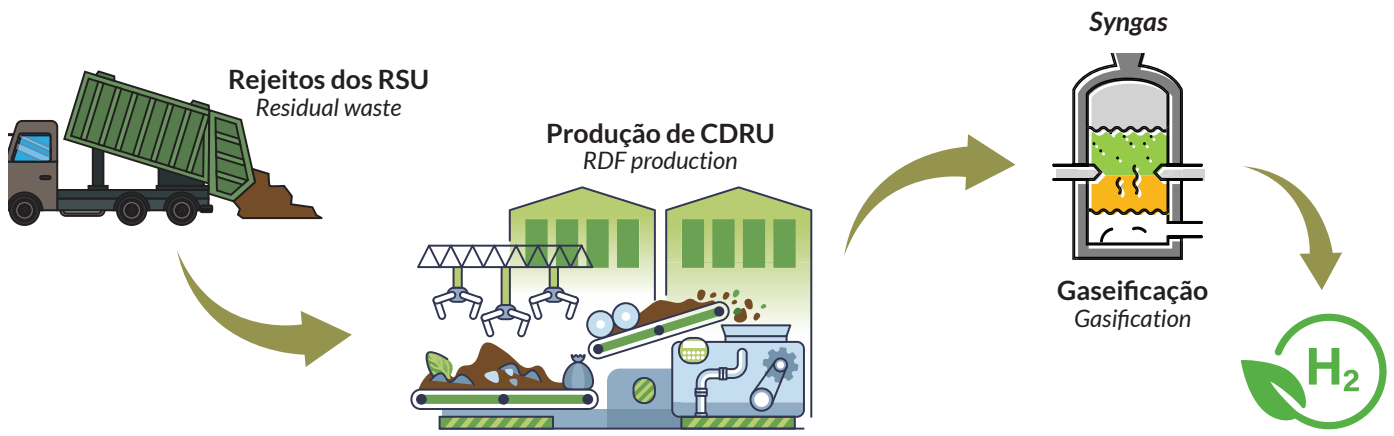
A biomassa pode ser convertida em hidrogênio por diferentes rotas tecnológicas, as quais se distinguem pelo tipo de insumo utilizado, pelas condições de operação e pelos produtos intermediários obtidos. Entre as rotas mais consolidadas destaca-se a reforma a vapor do biometano (*Steam Methane Reforming – SMR*), na qual o metano reage com vapor d'água a altas temperaturas (700 a 1.000 °C) na presença de catalisador, produzindo H_2 e CO *(Figura 1.12)*. Trata-se de uma tecnologia madura e amplamente utilizada, que permite integrar a produção de hidrogênio a sistemas já existentes de aproveitamento de biogás, como aterros sanitários, estações de tratamento de esgoto ou unidades agroindustriais [4].

Processos emergentes incluem a pirólise da biomassa, que produz bio-óleo e gases ricos em hidrogênio, e rotas termoquímicas avançadas, como a gaseificação com oxigênio puro ou a oxi-combustão, que visam maior eficiência e integração com sistemas de captura e armazenamento de carbono (BECCS). A eletrólise de água alimentada por eletricidade renovável gerada a partir da biomassa, embora não utilize diretamente a biomassa como reagente, representa uma opção complementar para a produção de hidrogênio renovável, com potencial de reduzir as emissões associadas ao processo [4].

A escolha da rota mais adequada depende das características e disponibilidade da biomassa, infraestrutura local, demanda de hidrogênio e viabilidade econômica, sendo que a integração com sistemas de captura de carbono pode ampliar o papel dessas tecnologias na transição energética [4,5].

De forma resumida, as diferentes rotas tecnológicas para aproveitamento energético de resíduos de biomassa podem ser agru-

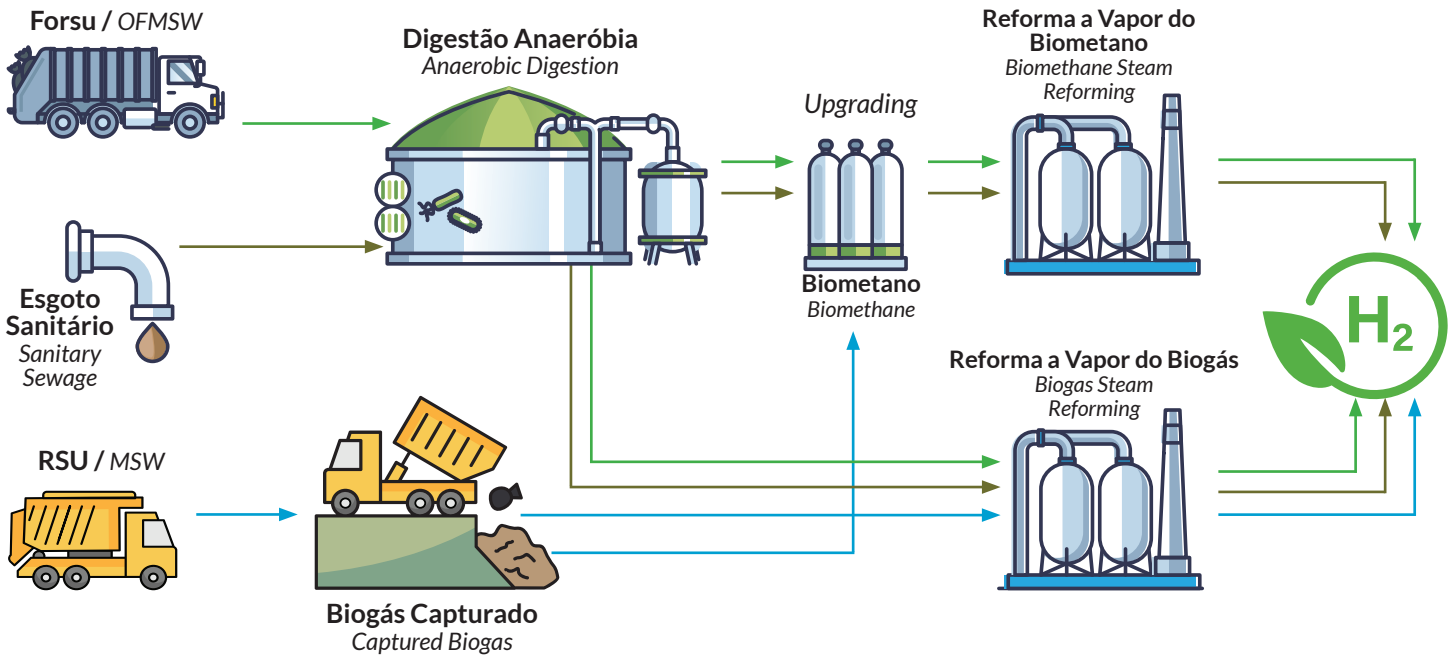
Figura 1.11 Produção de hidrogênio a partir da gaseificação de CDRU.
Figure 1.11 *Hydrogen production by gasification of RDF.*



CDRU: Combustível Derivado de Resíduos Urbanos / *RDF: Refuse-derived fuel*

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Figura 1.12 Produção de hidrogênio a partir dos resíduos urbanos.
Figure 1.12 *Hydrogen production from urban waste.*



Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

padas de acordo com o tipo de resíduo processado, o produto energético obtido e suas aplicações finais. O *Quadro 1.3* apresenta as principais tecnologias consideradas neste estudo, destacando o potencial de cada uma para a produção de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio.

A escolha da rota tecnológica mais adequada depende não apenas do tipo e das características físico-químicas do resíduo, mas também de fatores como disponibilidade sazonal, escala de produção, infraestrutura existente e viabilidade econômica. Em muitos casos, a integração de diferentes rotas pode maximizar o aproveitamento energético e reduzir perdas, contribuindo para maior eficiência e sustentabilidade do sistema.

1.8 INOVAÇÃO E ESTRATÉGIA CLIMÁTICA: BIOENERGIA COM CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO (BECCS)

O carbono que constitui a biomassa tem sua origem na atmosfera, sendo absorvido via fotossíntese. Esse é o fundamento que permite que a bioenergia convencional seja considerada, no limite, como neutra em carbono – característica que se traduz nas emissões de CO_2 da conversão da biomassa serem consideradas "biogênicas", isto é, que não adicionam à concentração de CO_2 na atmosfera ou para a intensificação do efeito estufa [44].

A intensidade de carbono tem se tornado parâmetro de competitividade dos biocombustíveis, tanto em âmbito nacional quanto internacional. Por isso, os produtores vêm buscando soluções que proporcionem impacto significativo na redução de emissões na cadeia, como a substituição do diesel e a eficientização na aplicação de fertilizantes e corretivos agrícolas.

Nesse contexto, chamam atenção as atividades da cadeia de bioenergia que emitem CO_2 em unidades estacionárias, visando à implementação de tecnologias de captura e estocagem de carbono – resultando a tecnologia *BECCS*, da sigla em inglês para *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*. Trata-se da conversão de biomassa em produtos ou serviços energéticos combinada à separação seletiva do CO_2 proveniente deste processo, com o objetivo de estocá-lo para impedir que retorne à atmosfera [45,44]. O armazenamento permanente é realizado pela injeção do CO_2 em reservatórios geológicos, o que requer a identificação de locais compatíveis com essa atividade [44]. A partir da implementação dessa tecnologia, considera-se a dedução do CO_2 da cadeia de produção, reduzindo, ou até tornando negativa, a intensidade de carbono da bioenergia produzida *(Figura 1.13)* [44].

A cadeia de captura e armazenamento de carbono (*CCS*, do inglês, *Carbon Capture and Storage*), pode ser aplicada a qualquer atividade com emissão de CO_2. Em geral, considera-se que a etapa de captura é a de maior custo da atividade, pois a separação do CO_2 de misturas gasosas, como dos gases de combustão

Quadro 1.3 Principais rotas tecnológicas de aproveitamento de resíduos de biomassa para produção de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio.
Box 1.3 *Main technological routes for the use of biomass residues for the production of biogas, biomethane, electricity and hydrogen.*

Tecnologia *Technology*	Resíduos aplicáveis *Applicable residues*	Produto principal *Main product*	Aplicações energéticas *Energy applications*
Combustão direta (ciclo Rankine) / *Direct combusttion (Rankine cycle)*	Palha, cascas, bagaço de cana, resíduos agrícolas secos / *Straw, husks, sugarcane bagasse, dry agricultural residues*	Eletricidade / *Electricity*	Geração centralizada ou distribuída / *Centralized or distributed generation*
Digestão anaeróbia / *Anaerobic digestion*	Dejetos de animais, Forsu, esgoto, lodo de ETE / *Animal waste, OFMSW, sanitary sewage, STP sludge*	Biogás / *Biogas*	Eletricidade, calor, cogeração / *Electricity, heat, cogeneration*
Upgrading de biogás / *Biogas upgrading*	Biogás de resíduos urbanos e animais / *Biogas from urban and animal waste*	Biometano / *Biomethane*	Injeção na rede, combustível veicular / *Grid injection, vehicle fuel*
Reforma a vapor (SMR) / *Steam Methane Reforming (SMR)*	Biogás, biometano / *Biogas, biomethane*	Hidrogênio / *Hydrogen*	Indústria, mobilidade, células a combustível / *Industry, mobility, fuel cells*
Gaseificação / *Gasification*	RSU pós-triagem, CDRU, resíduos agrícolas secos / *Post-sorted MSW, RDF, dry agricultural residues*	*Syngas* ($CO + H_2$)	Eletricidade, produção de hidrogênio / *Electricity, hydrogen production*

Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [42,43,5]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [42,43,5].

The choice of the most suitable pathway depends on the characteristics and availability of the biomass, local infrastructure, hydrogen demand, and economic feasibility, while integration with carbon capture systems can enhance the role of these technologies in the energy transition [4,5].

In summary, the different technological pathways for energy recovery from biomass residues can be grouped according to the type of residue processed, the main energy product, and its final applications. Box 1.3 presents the main technologies considered in this study, highlighting the potential of each for producing biogas, biomethane, electricity, and hydrogen.

The selection of the most appropriate technological route depends not only on the type and physicochemical properties of the residue but also on factors such as seasonal availability, production scale, existing infrastructure, and economic feasibility. In many cases, integrating multiple pathways can maximize energy recovery and reduce losses, contributing to higher system efficiency and sustainability.

1.8 INNOVATION AND CLIMATE STRATEGY: BIOENERGY WITH CARBON CAPTURE AND STORAGE (BECCS)

The carbon contained in biomass originates from the atmosphere and is absorbed via photosynthesis. This forms the basis for considering conventional bioenergy, in principle, carbon-neutral – a characteristic reflected in the CO_2 emissions from biomass conversion being classified as "biogenic," meaning they do not contribute to atmospheric CO_2 concentrations or intensify the greenhouse effect [44].

Carbon intensity has become a key competitiveness metric for biofuels, both nationally and internationally. Consequently, stakeholders have been seeking solutions that significantly reduce emissions along the value chain, such as substituting diesel and improving the efficiency of fertilizer and soil amendment application.

In this context, attention is drawn to activities in the bioenergy supply chain that emit CO_2 in stationary units, aiming to implement carbon capture and storage technologies – resulting in BECCS, the acronym for Bioenergy with Carbon Capture and Storage. This technology involves converting biomass into energy products or services, combined with the selective separation of CO_2 generated from the process, with the aim of storing it to prevent its release into the atmosphere [45,44]. Permanent storage is achieved by injecting CO_2 into geological reservoirs, which requires identifying suitable sites for this activity [44]. By implementing this technology, the CO_2 from the production chain can be deducted, reducing, or even rendering negative, the carbon intensity of the bioenergy produced (Figure 1.13) [44].

The carbon capture and storage (CCS) chain can be applied to any activity emitting CO_2. Generally, the capture stage is considered the most costly, since separating CO_2 from gas mixtures, such as the flue gases from a thermoelectric plant, requires processes with high capital investment and significant energy and material costs [46]. Conversely, some processes facilitate capture by releasing CO_2 at high concentrations, making CCS adoption more viable. In bioenergy, two processes stand out in this regard: (i) ethanol production, in which the fermentation step releases nearly pure CO_2, and (ii) biogas upgrading to biomethane, which specifically separates CH_4 from CO_2 [47,48]. Most existing facilities, however, release CO_2 into the atmosphere.

Indeed, within the BECCS framework, the focus should go beyond bioenergy's competitiveness. Capturing and storing biogenic carbon provides a true carbon removal solution by sequestering carbon that was previously in the atmosphere. Carbon dioxide removal (CDR) through deliberate anthropogenic interventions enables offsetting residual emissions to achieve net-zero targets [44]. Many mitigation pathways, including those considered in IPCC scenarios, rely on substantial volumes of CDR to meet long-term climate objectives.

However, on a large scale, carbon removal solutions are significantly limited, and BECCS is among the most promising. Therefore, it becomes not only desirable for bioenergy but also a fundamental element to ensure compliance with global climate agreements, particularly the target of limiting warming to 2 °C. Consequently, one can expect bioenergy's role to be redirected and increasing prioritization of processes that facilitate BECCS implementation, such as ethanol and biomethane.

1.9 LEGAL FRAMEWORK FOR BIOFUELS: THE "FUEL OF THE FUTURE" LAW

Law No. 14993/2024, known as the "Fuel of the Future" Law, was the result of extensive collaboration between the Executive and Legislative branches [49] and has a broad scope. One of its objectives is to promote the integration of biofuel policies, particularly the National Biofuels Policy (RenovaBio), with sustainable mobility measures, including the Green Mobility and Innovation Program (Programa Mover), the Brazilian Vehicle Labeling Program (PBEV), and the Vehicle Emissions Control Program (Proconve). The law advances established biofuels such as ethanol and biodiesel by raising mandatory blending limits for gasoline C and diesel B, thereby underscoring their importance in the energy transition and formally classifying them as "fuels of the future". At the same time, it sets a regulatory framework for next-generation biofuels, covering aviation fuels and green diesel, establishes a national policy for biomethane, and introduces Brazil's first legal provisions for carbon capture and storage.

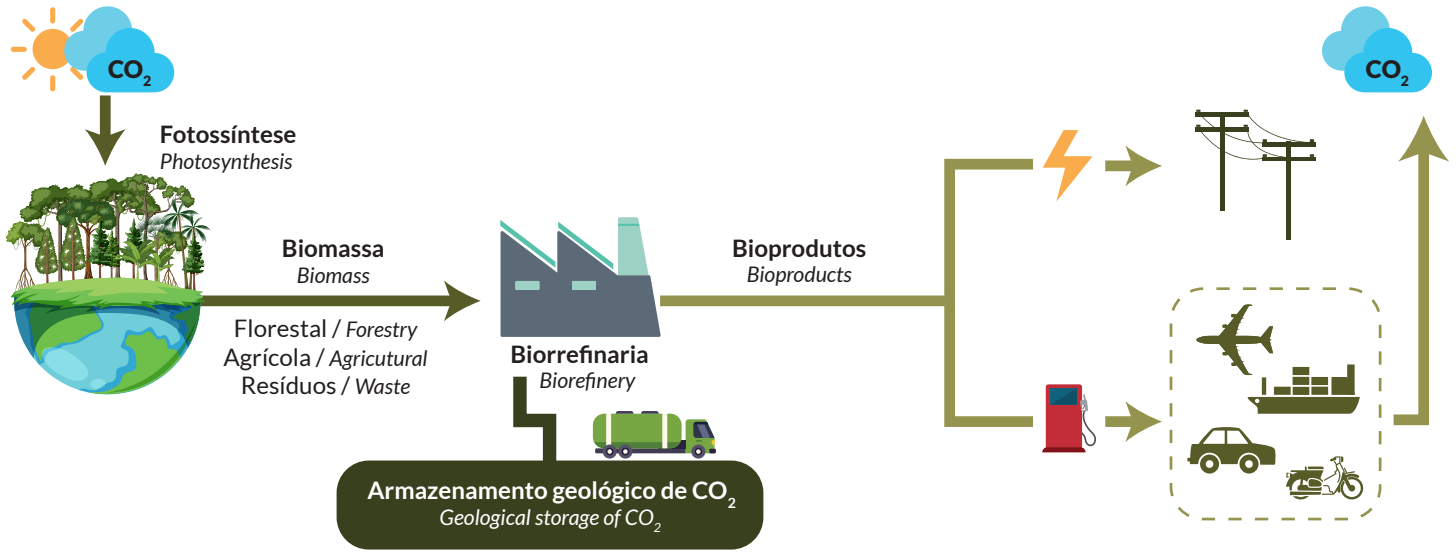
Brazil's efforts to decarbonize aviation are in line with global trends. In 2022, the International Civil Aviation Organization (ICAO) adopted a long-term aspirational goal of net-zero carbon emissions for international aviation by 2050 [50]. This commitment follows the Paris Agreement's mandate to balance carbon emissions and removals by mid-century to keep warming below 2 °C. Consequently, all sectors, including hard-to-abate industries, must contribute to emissions mitigation to achieve global neutrality.

ICAO identifies a portfolio of solutions to meet these goals and ensure sustainability, including aircraft technology improvements, operational optimization, market-based measures, and adoption of Sustainable Aviation Fuel (SAF) [50] (Figure 1.14). Ensuring adequate SAF supply requires special attention to the fuel's physicochemical properties due to operational safety considerations and aircraft specifications, making it essential to develop routes that produce fuels analogous to conventional petroleum-derived jet fuel currently in use [51,52]. Biomass-based pathways (biojet fuel) therefore emerge as immediate, cost-competitive solutions with significant scale-up potential.

Against this backdrop, Law No. 14993/2024 establishes the National Sustainable Aviation Fuel Program (ProBioQAV) to promote SAF research, production, commercialization, and use in Brazil, aligning with ICAO. ProBioQAV mandates GHG emission reductions by air carriers through SAF use starting in 2027 [49]. The mandate begins with a 1% reduction, rises to 2% in 2029, and increases by 1 percentage point annually until reaching 10% in 2037 [49].

The law also creates a specific program for green diesel via mandatory volumetric blending with diesel B. The National Green Diesel Program (PNDV) sets a maximum blend mandate of 3 percent, with no fixed deadline [52, 49]. The Brazilian National Agency for Petroleum,

Figura 1.13 Tecnologia BECCS: formação da biomassa, conversão em bioprodutos e armazenamento geológico de CO_2.
Figure 1.13 *BECCS technology: biomass formation, bioproduct conversion, and geological CO_2 storage.*



Fonte: adaptada de [45]. / *Source: adapted from* [45].

de uma usina termoelétrica, exige processos com investimentos elevados e custos significativos de energia e materiais [46]. Por outro lado, há processos que facilitam a captura ao liberar o gás em concentrações elevadas, tornando a adoção do *CCS* mais viável. Na bioenergia, dois processos se destacam por essa característica: (i) a produção de etanol, que na etapa de fermentação libera CO_2 praticamente puro; e (ii) a purificação do biogás a biometano, que promove, justamente, a separação do CH_4 do CO_2 [47,48]. Em sua maioria, as instalações existentes liberam o CO_2 para a atmosfera.

De fato, ao se tratar de *BECCS*, não basta pautar somente o benefício para a competitividade da bioenergia. A captura e a estocagem de carbono associada ao carbono biogênico torna-se uma solução de remoção de carbono, já que realiza o armazenamento de carbono então presente na atmosfera. A remoção de carbono da atmosfera (*CDR*, do inglês *Carbon Dioxide Removal*), realizada por intervenções antrópicas, é o que viabiliza a compensação de emissões para o atingimento de metas de emissão líquidas zero [44]. Em diversos modelos que fundamentam estratégias de mitigação globais, adotados por exemplo pelo IPCC, a remoção de carbono é necessária em montantes significativos para garantir o cumprimento das metas climáticas.

No entanto, em grande escala, há uma limitação significativa de soluções de remoção de carbono, e *BECCS* é uma das soluções com maior potencial de oferecê-la. Por isso, torna-se não apenas desejável para a bioenergia, mas elemento fundamental para garantir o cumprimento dos acordos climáticos globais, em particular a meta de limitar o aquecimento a 2 °C. Portanto, pode-se esperar o redirecionamento do papel da bioenergia e a valorização cada vez maior de processos com maior facilidade de implementação de *BECCS*, como o etanol e o biometano.

1.9 MARCO LEGAL DOS BIOCOMBUSTÍVEIS: A LEI DO COMBUSTÍVEL DO FUTURO

A *Lei 14.993/2024*, conhecida como a *Lei do Combustível do Futuro*, é o resultado de ampla construção no âmbito dos poderes Executivo e Legislativo [49] e tem um escopo abrangente. Em uma de suas dimensões, busca promover a integração das políticas de biocombustíveis, notadamente a *Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)*, às políticas de mobilidade sustentável, citando o *Programa Mobilidade Verde e Inovação (Programa Mover)*, o *Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV)* e o *Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve)*. Além disso, por um lado, o texto promove avanços para biocombustíveis já consolidados, o etanol e o biodiesel, alterando os limites de mistura compulsória na composição dos combustíveis comercializados ao consumidor final, isto é, a gasolina C e o diesel B, garantindo, assim, uma simbólica indicação da importância de ambos na transição energética com a inclusão entre os "combustíveis do futuro". Por outro lado, inova ao criar o arcabouço regulatório para novos biocombustíveis, alcançando o setor aéreo e o diesel verde, criando uma política para o biometano, e trazendo o primeiro marco legal para a captura e estocagem de carbono ao País.

O movimento da política de biocombustíveis brasileira para promover a descarbonização do setor aéreo acompanha uma tendência global. Em 2022, a Organização da Aviação Civil Internacional (Icao) adotou o objetivo aspiracional coletivo de longo prazo para a aviação internacional de chegar a zero emissão líquida de carbono até 2050 [50]. O compromisso internacional da aviação é consequência da consolidação dos termos do *Acordo de Paris*, com o reconhecimento da necessidade de alcançar o equilíbrio entre emissões e remoções de carbono durante a segunda metade do século, permanecendo dentro do limite de aquecimento de 2 °C. Com isso, todos os setores, mesmo aqueles de difícil abatimento, passam a ser obrigados a trabalhar pela mitigação das emissões para que se torne possível chegar à neutralidade global.

Para a Icao, um conjunto de soluções é necessário para caminhar em direção às metas e garantir a sustentabilidade da atividade. Entre elas, melhorias tecnológicas nas aeronaves, otimização operacional, instrumentos de mercado e a adoção de combustível sustentável de aviação (*SAF*, do inglês, *Sustainable Aviation Fuel*) [50] *(Figura 1.14)*. Já a busca pelo fornecimento adequado de *SAF*, devido a questões ligadas à segurança operacional e características das aeronaves, requer especial cuidado com as propriedades físico-químicas do produto, sendo um imperativo encontrar rotas que produzam combustíveis análogos ao querosene de aviação (QAV) derivado do petróleo, utilizado atualmente [51,52]. Nesse contexto, rotas a partir da biomassa (bioQAV) ganham

proeminência como solução imediata e competitiva em custos, com potencial de significativo aumento na produção e uso de biocombustíveis na aviação.

Com esse pano de fundo, a *Lei 14.993/2024* cria o *Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV)*, tendo como objetivo incentivar a pesquisa, a produção, a comercialização e o uso energético do *SAF* no Brasil, mencionando o alinhamento à Icao. No que se refere ao *ProBioQAV*, a lei estabelece um mandato de redução de emissões de GEE pelos operadores aéreos com o uso de *SAF*, a partir de 2027 [49]. O mandato se inicia com a obrigação de redução de 1%, chega a 2% em 2029, e evolui em 1 ponto percentual ao ano, chegando a 10% em 2037 [49].

Outro combustível contemplado com um programa específico na lei é o diesel verde, a partir da previsão da criação de mistura volumétrica obrigatória ao diesel B. O *Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV)* define que o mandato não deverá superar 3%, sem estabelecer prazo específico [52,49]. A ANP estabelece as especificações técnicas do diesel verde, que deve ser composto por hidrocarbonetos parafínicos, diferenciando-se do biodiesel [49]. Em tese, o diesel verde tem composição similar à do diesel A, derivado do petróleo, permitindo o uso sem restrições na infraestrutura e nos veículos movidos a diesel [49].

O biometano também recebeu um programa próprio na *Lei do Combustível do Futuro*. O *Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano* cria meta anual de redução de emissões de GEE no mercado de gás natural, a ser cumprido pelos produtores e importadores de gás natural por meio da participação do biometano [52]. De acordo com o texto, o mandato deve se iniciar em 2026 com a obrigação de 1%, com os percentuais futuros a serem determinados pela participação do Conselho Nacional de Política Energética [52].

Destaca-se, no caso do biometano, a criação do *Certificado de Garantia de Origem de Biometano (CGOB)*. O *CGOB* é um certificado de rastreabilidade lastreado em volume de biometano produzido e comercializado pelo produtor de biocombustível, emitido por agente certificador de origem credenciado pela ANP [52]. A partir desse instrumento, o programa não exige que o agente obrigado demonstre a aquisição física do biometano, podendo cumprir o mandato com o certificado. Esse sistema otimiza as condições de produção e uso do biometano, permitindo observar condições logísticas favoráveis à molécula, enquanto o atributo ambiental pode ser direcionado para o cumprimento do mandato e a outros interessados voluntários [52].

1.10 *RENOVABIO*: POLÍTICA DE DESCARBONIZAÇÃO E INCENTIVO À BIOENERGIA

À medida que a redução de emissões de GEE se consolida como principal objetivo da implementação global de biocombustíveis, quantificar e valorizar as emissões do ciclo de vida passa a ser primordial, como forma de demonstrar o benefício ambiental do biocombustível e comparar diferentes rotas de produção [53]. A *Lei 13.576/2017*, que institui a *Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)*, parte desse princípio.

No âmbito dessa lei, define-se intensidade de carbono como a "relação da emissão de gases causadores do efeito estufa, com base em avaliação do ciclo de vida, computada no processo produtivo do combustível, por unidade de energia" [54]. Na prática, trata-se de um índice de emissões, geralmente expresso em gramas de CO_2 equivalente por megajoule (gCO_2e/MJ), obtido a partir da tradução, em emissões de GEE (gCO_2e), dos insumos e processos envolvidos na cadeia de produção do biocombustível, que são divididas pela produção de biocombustíveis associada convertida em unidade energética (MJ) [55]. O *RenovaBio* avança para calcular a redução de emissões proporcionada pelo biocombustível a partir do conceito de *Nota de Eficiência Energético-Ambiental*, definido como a diferença entre a intensidade de carbono do combustível fóssil substituto e a intensidade de carbono do biocombustível [53,54]. Cada produtor deve, individualmente, certificar o biocombustível de sua unidade, obtendo seus próprios valores de intensidade de carbono e NEEA [54].

A partir da multiplicação entre a NEEA e o volume produzido em conformidade com os critérios de elegibilidade da política, o produtor obtém *Créditos de Descarbonização (CBIO)*. Cada *CBIO* corresponde a 1 t de CO_2 equivalente cuja emissão é evitada com o uso do biocombustível.

Em contrapartida à geração de *CBIO*, o *RenovaBio* cria uma demanda para o crédito ao estabelecer metas anuais de aposentadoria, que devem ser cumpridas pelas distribuidoras de combustíveis [52]. Com isso, o *CBIO* passa a ter um valor de mercado, o que, em tese, gera um incentivo ao aumento da produção de biocombustíveis – a partir de remuneração adicional, proporcional à redução de emissões [53]. Ressalte-se que a política tende a beneficiar os biocombustíveis com menor intensidade de carbono (ou maior NEEA), estimulando com mais vigor os produtores mais eficientes e com menor uso de insumos intensivos em carbono, destacando-se o uso de matérias-primas residuais [53].

Figura 1.14 Fluxo conceitual da cadeia de produção e abastecimento de combustível sustentável de aviação (SAF).

Figure 1.14 *Conceptual flow of the production and supply chain of Sustainable Aviation Fuel (SAF).*

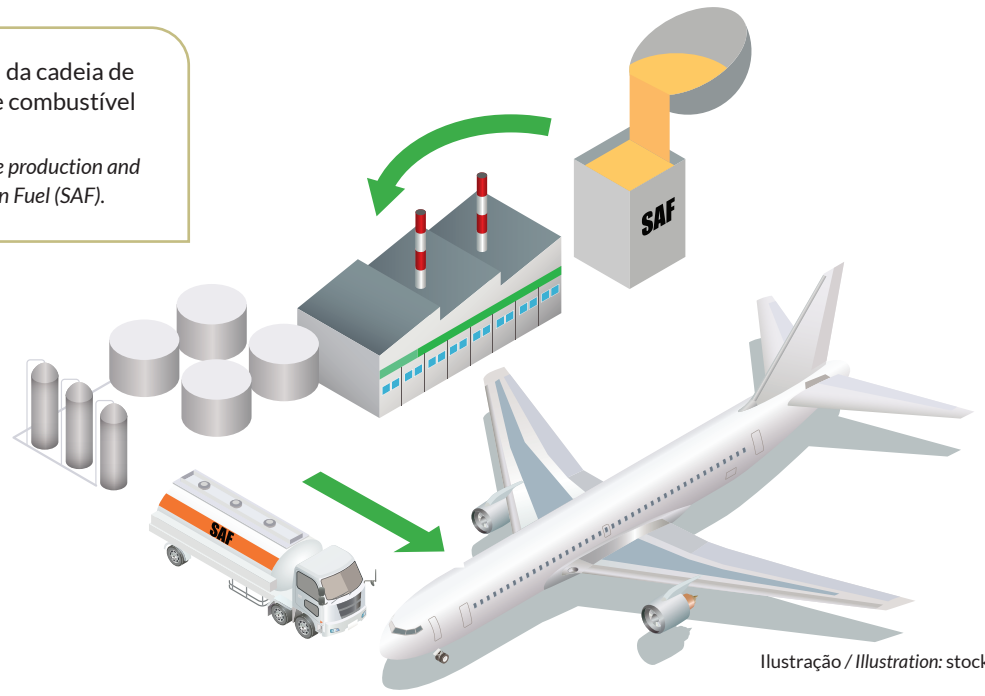


Ilustração / *Illustration:* stock.adobe.com

Natural Gas and Biofuels (ANP) defines the technical specifications for green diesel, which must consist of paraffinic hydrocarbons, distinguishing it from biodiesel [49]. In principle, green diesel has a composition similar to petroleum-derived diesel A, allowing unrestricted use in existing diesel infrastructure and vehicles [49].

Biomethane receives its own program under the Fuel of the Future Law. The National Programme for the Decarbonisation of Natural Gas Producers and Importers and Incentives for Biomethane oblige natural gas producers and importers to meet annual GHG reduction targets through biomethane uptake [52]. The mandate commences in 2026 at 1%, with future percentages set by the National Energy Policy Council (CNPE) [52].

A key innovation for biomethane is the Biomethane Guarantees of Origin Certificate (CGOB). CGOB is a traceable certificate based on the volume of biomethane produced and sold by a certified producer, issued by an ANP-accredited certifier [52]. Obligated parties may comply with their mandate via CGOB without physical biomethane procurement. This system streamlines biomethane production and use by decoupling logistical constraints from environmental attribute transfers, facilitating voluntary market participation [52].

1.10 RENOVABIO: DECARBONIZATION POLICY AND BIOENERGY INCENTIVES

As GHG emission reduction becomes the primary goal in global biofuel implementation, quantifying and valuing life cycle emissions is essential to demonstrate the environmental benefits of biofuels and compare different production pathways [53]. Law No. 13576/2017, which establishes the National Biofuels Policy (RenovaBio), is based on this principle.

Legally, carbon intensity is defined as the "ratio of greenhouse gas emissions, based on life-cycle assessment, calculated over the fuel production process per unit of energy" [54]. Practically, it is an emissions index, generally expressed in grams of CO_2 equivalent per megajoule (gCO_2e/MJ), derived by converting all inputs and processes within the biofuel production chain to GHG emissions (gCO_2e), divided by the associated biofuel output converted to energy units (MJ) [55]. RenovaBio advances to calculate the emissions reduction provided by the biofuel through the concept of the Energy-Environmental Efficiency Score (NEEA), defined as the difference between the carbon intensity of the displaced fossil fuel and that of the biofuel [53,54]. Each producer must individually certify the biofuel from their unit, obtaining their own carbon intensity and NEEA values [54].

By multiplying the NEEA by the volume produced according to policy eligibility criteria, producers obtain Decarbonization Credits (CBIO). Each CBIO corresponds to one ton of CO_2 equivalent emissions avoided through biofuel use.

In exchange for CBIO generation, RenovaBio creates a demand for the credits by setting annual retirement targets to be met by fuel distributors [53]. This mechanism establishes a market value for CBIO, thereby providing an additional revenue stream proportional to emission reductions and incentivizing increased biofuel production [53]. The policy tends to favor biofuels with lower carbon intensity (higher NEEA), strongly encouraging producers that are more efficient and rely less on carbon-intensive inputs, notably promoting the use of residual feedstocks [53].

As of August 2025, ANP data recorded RenovaBio certification for 293 ethanol plants, 39 biodiesel plants, and $_6$ biomethane plants [56]. The target for that year, set by CNPE resolution, was 40.39 million CBIO [57]. By the end of the period, in 2034, the annual target is expected to increase to 72.54 million CBIO [57]. This reflects expectations for a significant increase in proven emissions reductions from biofuel production and use, driven by production expansion, improved carbon intensity, and growth in the certified and policy-eligible share of production.

Based on certifications and the RenovaBio life-cycle assessment methodology, biofuels produced in Brazil demonstrate relatively low carbon intensity. This supports a decarbonization strategy based on the continuity and expansion of biofuels, while there is still potential for sustainable emission reductions across the production chain with measures such as using biomethane instead of diesel in agricultural machinery and biomass-transporting trucks – solutions encouraged by RenovaBio. Carbon intensity is also key for accessing global markets, particularly to qualify and add value to Brazilian biofuels under emissions reduction programs, including international aviation.

1.11 SCENARIOS AND OPPORTUNITIES FOR BIOENERGY IN BRAZIL AND BAHIA

Brazil presents a highly favorable setting for bioenergy development, resulting from the combination of suitable climatic conditions, availability of arable land, a wide diversity of energy crops, and accumulated expertise in the use of biomass for energy generation. In this context, the national energy mix stands out for its high share of renewable sources, which accounted for 50% of the total energy supply in 2023, compared to a global average of just 14.3% [58]. Biomass plays a central role, especially sugarcane, which represents about 16.7% of primary energy supply and is the main feedstock for ethanol, bioelectricity, and biogas production [58].

Brazil's sugar-energy sector, one of the most consolidated and competitive in the world, includes more than 350 industrial plants in operation. Brazilian ethanol boasts one of the lowest carbon intensities globally, reflecting predominant use of sugarcane and the use of CHP systems based on bagasse and straw. Increasing attention is also being given to utilizing byproducts such as vinasse and filter cake, which through anaerobic digestion produce biogas with high methane content and suitable for conversion into biomethane or electricity. Brazil's technical biogas potential, considering agricultural and agro-industrial residues as well as urban and sanitation waste is estimated to exceed 120 billion Nm³/year, equivalent to about 70% of national natural gas demand [23].

The sugar-energy industry also underpins the development of thermochemical and biochemical hydrogen production pathways, broadening bioenergy's technology portfolio. Gasification of lignocellulosic residues and the dry fraction of MSW enables syngas production, while anaerobic digestion is more suitable for wet substrates such as vinasse, animal manure, and food waste. Both pathways align with decarbonization strategies for hard-to-abate sectors, such as heavy industry and long-distance transport, through the production of renewable hydrogen.

The growing international demand for sustainable fuels reinforces the sector's dynamism in Brazil and opens new opportunities for states with a strong agro-industrial base, such as Bahia, which can benefit both from exports and from the development of local bioenergy chains.

Within this national panorama, Bahia holds strategic advantages for bioenergy expansion. The state has substantial agricultural and agro-industrial production, generating large volumes of residues suitable for energy recovery, including sugarcane bagasse, straw, and vinasse, forest residues, animal manure, and the OFMSW.

In Bahia, the sugar-energy sector plays a major role, positioning the state as the third-largest ethanol producer in the Northeast, with installed capacity for ethanol production and electricity cogeneration from bagasse and straw [59]. In addition, crops such as oil palm and coconut contribute to the production of biodiesel and SAF. For biogas, vinasse, cattle and poultry residues, and MSW stand out as key feedstocks.

Despite this diversified potential, Bahia's energy mix continues to rely heavily on fossil fuels, with petroleum derivatives accounting for 68% of total energy supply [58]. Biomass, although available, is underutilized for power generation, accounting for only 2.4% of the state's installed capacity [27]. Currently, approximately 88.5% of this biomass capacity stems from black liquor, a byproduct of the forest industry, while other sources like sugarcane bagasse, landfill biogas, and forest residues have marginal shares [27].

In biodiesel, Bahia stands out nationally for strategic use of residues, leading production from palm oil (57.8%) and beef tallow (14.4%), above national averages. The main production facilities are located in Iraquara, Simões Filho, and Candeias [60]. This scenario underscores both the state's relevance and the need for greater diversification of its biomass energy mix.

Utilizing agricultural and agro-industrial residues creates opportunities for biomethane and green hydrogen production, with potential to reduce up to 15 million tons of CO_2 equivalent annually, about 11% of the state's emissions [23,61]. Renewable hydrogen production could also support the decarbonization of fertilizer production by leveraging the existing infrastructure at the Camaçari Petrochemical Complex (Figure 1.16). Furthermore, the state's port infrastructure, particularly the ports of Aratu-Candeias, Ilhéus, and Salvador, provides competitive conditions for the export of biofuels and their derivatives, facilitating both the shipment of production to international markets and domestic distribution to other regions.

Em agosto de 2025, dados da ANP registravam a certificação, no âmbito do *RenovaBio*, de 293 usinas de etanol, 39 usinas de biodiesel e mais 6 de biometano [56]. A meta para o mesmo ano, de acordo com resolução do CNPE, foi estabelecida em 40,39 milhões de *CBIO* [57]. Ao final do período, para 2034, está previsto o aumento da meta anual para 72,54 milhões de *CBIO* [57]. Isto é, espera-se que o País consiga aumentar de forma significativa a redução comprovada de emissões a partir da produção e uso de biocombustíveis, seja com a expansão da produção, com a melhoria da intensidade de carbono, ou mesmo o aumento da parcela certificada e elegível à geração do certificado.

Com base nas certificações, e sob a metodologia de avaliação de ciclo de vida do *RenovaBio*, pode-se demonstrar a intensidade de carbono relativamente baixa dos biocombustíveis produzidos em território nacional. Esse fator é decisivo para fundamentar uma estratégia de descarbonização baseada na continuidade e na expansão dos biocombustíveis, sabendo-se, ainda, que há espaço para a redução sustentável nas emissões da cadeia de produção, a partir de medidas como a adoção de biometano como substituto do diesel utilizado em máquinas agrícolas e caminhões que transportam a biomassa – soluções que são incentivadas pelo *RenovaBio*. Adicionalmente, a intensidade de carbono é essencial para o acesso a mercados globais, em particular para qualificar e valorizar os biocombustíveis brasileiros no atendimento a programas de redução de emissões, como no caso da aviação internacional.

1.11 CENÁRIOS E OPORTUNIDADES PARA A BIOENERGIA NO BRASIL E NA BAHIA

O Brasil apresenta um cenário altamente favorável para o desenvolvimento da bioenergia, resultado da combinação de condições climáticas adequadas, disponibilidade de terras agricultáveis, vasta diversidade de culturas energéticas e experiência acumulada no aproveitamento de biomassa para geração de energia. Nesse contexto, a matriz energética nacional se destaca pela elevada participação de fontes renováveis, que representaram 50% da oferta interna de energia em 2023, contra uma média mundial de apenas 14,3% [58]. A biomassa ocupa papel central, especialmente a cana-de-açúcar, que responde por cerca de 16,7% da oferta de energia primária e é o principal insumo para a produção de etanol, bioeletricidade e biogás [58].

No cenário nacional, a cadeia sucroenergética, uma das mais consolidadas e competitivas do mundo, conta com mais de 350 unidades industriais em operação. O etanol brasileiro apresenta uma das menores intensidades de carbono globalmente, resultado do uso predominante da cana-de-açúcar e da cogeração elétrica a partir do bagaço e da palha. Além disso, cresce a atenção ao aproveitamento de subprodutos como a vinhaça e a torta de filtro, que por meio da biodigestão geram biogás com alto teor de metano e potencial para conversão em biometano ou eletricidade. Estima-se que o potencial técnico de biogás no Brasil, considerando resíduos agropecuários, agroindustriais, urbanos e do saneamento, supere 120 bilhões de Nm³/ano, equivalente a cerca de 70% da demanda nacional de gás natural [23].

A demanda internacional por combustíveis sustentáveis reforça o dinamismo do setor no Brasil e amplia oportunidades para estados com base agroindustrial consolidada, como a Bahia, que pode se beneficiar tanto das exportações quanto do desenvolvimento de cadeias locais de bioenergia.

Dentro desse panorama nacional, a Bahia apresenta vantagens estratégicas para o avanço da bioenergia. O Estado dispõe de expressiva produção agropecuária e agroindustrial, geradora de grandes volumes de resíduos passíveis de aproveitamento energético, como bagaço, palha e vinhaça da cana-de-açúcar, resíduos florestais, dejetos animais e fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.

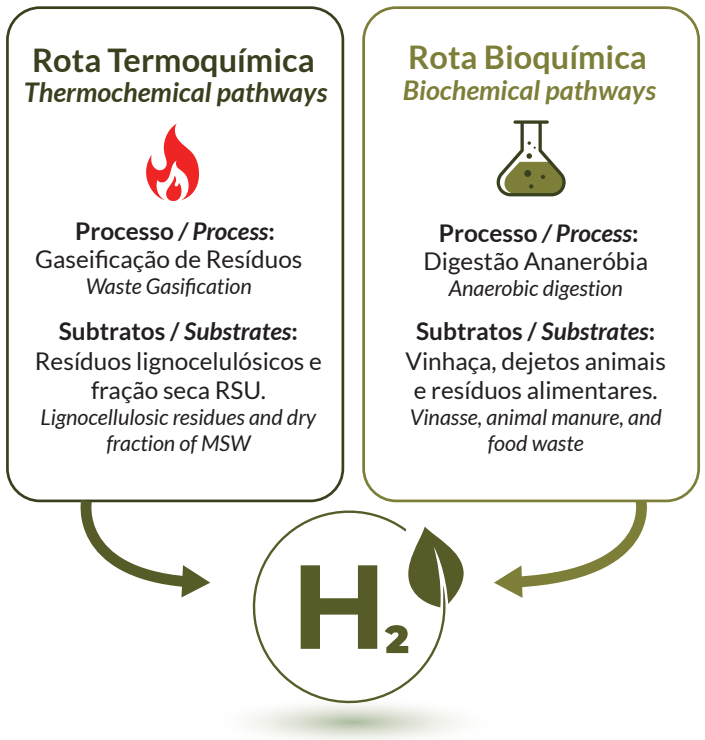
No contexto da Bahia, o setor sucroenergético apresenta forte relevância, posicionando o estado como o 3º maior produtor de etanol no Nordeste, com capacidade instalada para produção de

Figura 1.15 Oportunidades nacionais para bioenergia.
***Figure 1.15** National opportunities for bioenergy*



Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Figura 1.16 Rotas tecnológicas para produção de H_2.
Figure 1.16 Technological pathways for H_2 production.



Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

etanol e cogeração de eletricidade a partir do bagaço e da palha [59]. Além disso, culturas como dendê e coco contribuem para a produção de biodiesel e bioquerosene de aviação. No caso do biogás, destacam-se a vinhaça, os resíduos da pecuária bovina e da avicultura, além dos resíduos sólidos urbanos.

Apesar desse potencial diversificado, a matriz energética baiana permanece dependente de combustíveis fósseis, com derivados de petróleo representando 68% do fornecimento energético total [58]. A biomassa, embora disponível, está subutilizada na geração elétrica, representando apenas 2,4% da capacidade instalada do estado [27]. Atualmente, cerca de 88,5% dessa capacidade corresponde à lixívia, subproduto da indústria florestal, enquanto outras fontes como bagaço de cana, biogás de aterros e resíduos florestais têm participação marginal [27].

No campo do biodiesel, a Bahia se destaca nacionalmente pelo uso estratégico de resíduos, liderando a produção a partir de óleo de palma (57,8%) e gordura bovina (14,4%), acima das médias nacionais. As principais unidades produtivas estão localizadas em Iraquara, Simões Filho e Candeias [60]. Esse cenário evidencia tanto a relevância do estado quanto a necessidade de maior diversificação da matriz energética de biomassa.

O aproveitamento de resíduos agrícolas e agroindustriais abre espaço para a produção de biometano e hidrogênio verde, com potencial de reduzir até 15 milhões de t de CO_2 equivalente por ano, cerca de 11% das emissões estaduais [23,61]. A produção de hidrogênio renovável poderia ainda apoiar a descarbonização da produção de fertilizantes, aproveitando a infraestrutura existente no Complexo Petroquímico de Camaçari *(Figura 1.16)*. Além disso, a infraestrutura portuária do Estado, em especial os portos de Aratu-Candeias, Ilhéus e Salvador, oferece condições competitivas para a exportação de biocombustíveis e seus derivados, facilitando tanto o envio da produção para o mercado externo quanto a distribuição interna para outras regiões.

Para que esse potencial se concretize, desafios precisam ser superados, incluindo a dispersão geográfica dos resíduos, limitações técnicas nas tecnologias de pequena escala e a ausência de marcos regulatórios que incentivem os mercados emergentes de biometano e hidrogênio. Investimentos estratégicos em logística, pesquisa, desenvolvimento tecnológico e políticas públicas serão determinantes para consolidar o setor.

A Bahia reúne atributos singulares para se afirmar como polo de bioenergia, combinando base agrícola e industrial sólida com fontes renováveis que complementam sua capacidade eólica e solar. A materialização desse potencial exigirá articulação entre governos, setor privado e instituições acadêmicas, fortalecendo a segurança energética, gerando empregos e promovendo desenvolvimento regional.

Em síntese, a bioenergia consolida-se no Brasil e na Bahia como vetor estratégico para a transição energética, diversificação da matriz, geração de emprego e renda rural, e mitigação das emissões de gases de efeito estufa *(Figura 1.15)*. O desenvolvimento do setor no estado reforça sua contribuição à matriz energética nacional e confirma seu papel estratégico na transição para uma economia de baixo carbono.

1.12 REFLEXÕES PRELIMINARES: BIOENERGIA EM PERSPECTIVA

A bioenergia consolida-se como vetor estratégico para a transição energética, ao oferecer soluções renováveis e de baixa emissão capazes de atender, simultaneamente, às demandas de eletricidade, combustíveis líquidos e hidrogênio. Seu papel transcende a dimensão energética, pois contribui também para a mitigação das mudanças climáticas, o fortalecimento da economia circular e a promoção de cadeias produtivas sustentáveis em diferentes setores.

O aproveitamento de resíduos agrícolas, florestais, urbanos e agroindustriais apresenta-se como oportunidade singular para diversificar a matriz energética, reduzir emissões de GEE e gerar benefícios socioeconômicos, sobretudo em regiões rurais. Nesse sentido, a bioenergia mostra-se alinhada às metas globais e nacionais de descarbonização, integrando-se às políticas públicas recentes, como o *RenovaBio*, a *Lei do Combustível do Futuro* e o *Protener*. Esses instrumentos oferecem incentivos e estabelecem marcos regulatórios fundamentais para sua expansão.

As tecnologias de conversão, que incluem combustão direta, gaseificação, biodigestão anaeróbia e rotas para produção de hidrogênio, ampliam as possibilidades de uso energético da biomassa e permitem maior integração entre energia, indústria e agricultura. O desenvolvimento de soluções emergentes, como a captura e armazenamento de carbono associada à bioenergia (*BECCS*), reforça ainda mais o papel do setor como componente essencial das estratégias climáticas de médio e longo prazo.

No contexto da Bahia, a disponibilidade de resíduos agroindustriais e a infraestrutura existente criam condições favoráveis para o avanço da bioenergia, em especial nas rotas de biogás, biometano e hidrogênio renovável. Aliada ao expressivo potencial eólico e solar do estado, a bioenergia pode posicionar a Bahia como território estratégico para a transição energética no Brasil, promovendo diversificação da matriz, atração de investimentos, geração de empregos e desenvolvimento regional.

Em síntese, a consolidação da bioenergia como pilar da transição energética exige articulação entre inovação tecnológica, marcos regulatórios consistentes e investimentos em infraestrutura. O alinhamento entre políticas públicas, setor produtivo e academia será determinante para transformar o potencial identificado em realidade, assegurando que a bioenergia contribua de forma efetiva para um sistema energético mais resiliente e inclusivo.

To realize this potential, challenges must be overcome, including scattered residue sources, technical limitations of small-scale technologies, and lack of regulatory frameworks encouraging emerging biomethane and hydrogen markets. Strategic investments in logistics, research, technology development, and public policy are critical to consolidating the sector.

Bahia combines unique attributes to establish itself as a bioenergy hub, combining a strong agricultural and industrial base with renewable sources that complement its wind and solar capacities. Achieving this potential will demand coordination among governments, the private sector, and research institutions, strengthening energy security, creating jobs, and promoting regional development.

In summary, bioenergy is consolidating its role in Brazil and Bahia as a strategic driver for energy transition, mix diversification, rural employment and income generation, and greenhouse gas emissions mitigation (Figure 1.15). The sector's development in the state reinforces its contribution to the national energy mix and confirms Bahia's strategic position in the transition to a low-carbon economy.

1.12 PRELIMINARY REFLECTIONS: BIOENERGY IN PERSPECTIVE

Bioenergy is consolidating its role as a strategic driver of energy transition, offering renewable, low-emission solutions capable of simultaneously meeting electricity, liquid fuel, and hydrogen demands. Its contribution extends beyond the energy dimension, as it also supports climate change mitigation, strengthens the circular economy, and promotes sustainable value chains across different sectors.

Harnessing agricultural, forestry, and agro-industrial residues, as well as urban waste, presents a unique opportunity to diversify the energy mix, reduce GHG emissions, and generate socioeconomic benefits, especially in rural areas. In this regard, bioenergy is well aligned with global and national decarbonization targets, integrated into recent public policies such as RenovaBio, the Fuel of the Future Law, and Protener. These instruments provide incentives and establish fundamental regulatory frameworks for its expansion.

Conversion technologies, including direct combustion, gasification, anaerobic digestion, and hydrogen production pathways, broaden the range of energetic uses for biomass and enable greater integration between energy, industry, and agriculture. The development of emerging solutions, such as carbon capture and storage associated with bioenergy (BECCS), further reinforces the sector's role as an essential component of medium- and long-term climate strategies.

In Bahia, the availability of agro-industrial residues and existing infrastructure create favorable conditions for advancing bioenergy, especially along biogas, biomethane, and renewable hydrogen pathways. Combined with the state's significant wind and solar potential, bioenergy can position Bahia as a strategic territory for Brazil's energy transition, promoting diversification of the energy mix, attracting investment, creating jobs, and fostering regional development.

In summary, consolidating bioenergy as an energy transition pillar requires coordination of technological innovation, consistent regulatory frameworks, and infrastructure investment. Alignment between public policies, the productive sector, and academia will be decisive in converting identified potential into reality, ensuring bioenergy makes an effective contribution to a more resilient and inclusive energy system.

Atlas Bioenergia Bahia

A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

BAHIA AS A STRATEGIC TERRITORY FOR BIOENERGY

Com sua ampla diversidade de biomas, potencial agrícola, estrutura logística e matriz elétrica predominantemente renovável, a Bahia reúne condições singulares para consolidar-se como um território estratégico no avanço da bioenergia no Brasil. A combinação entre oferta abundante de resíduos agroindustriais, florestais, urbanos e agropecuários e a presença de cadeias produtivas consolidadas permite ao estado ampliar a produção de energia renovável a partir da biomassa, com impactos positivos sobre a segurança energética, a inclusão produtiva e a redução das emissões setoriais de gases de efeito estufa. A integração entre características naturais, vocações econômicas e infraestrutura energética e logística existente sustenta um ambiente propício à diversificação da matriz energética e ao fortalecimento de rotas tecnológicas alinhadas à transição energética de baixa emissão.

2.1 A BIOMASSA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA: PARTICIPAÇÃO, PRODUÇÃO E CONSUMO

A biomassa desempenha papel central na composição da matriz energética brasileira, posicionando o País entre os líderes globais na participação de fontes renováveis. Em 2024, o Brasil manteve uma das maiores proporções de renováveis tanto na Oferta Interna de Energia (OIE) quanto na geração de eletricidade, em contraste com a matriz energética global, ainda fortemente baseada em fontes fósseis. Esse desempenho é sustentado, em grande parte, pela ampla disponibilidade e uso de recursos derivados da biomassa, que representam, aproximadamente, um terço da oferta energética nacional, com destaque para os produtos da cana-de-açúcar, lenha, carvão vegetal, biodiesel e etanol de outras biomassas. A evolução recente da oferta e da geração de energia, em âmbito global e nacional, reforça esse protagonismo.

A oferta total de energia cresceu globalmente 2,2% em 2024, em ritmo superior à taxa média da última década, sendo que 80,1% dessa oferta é de origem fóssil e apenas 15,0% de origem renovável, que, por sua vez, cresceu num ritmo muito maior, de 5,8%. O restante da oferta é suprido pela fonte nuclear, que cresceu 3,7%. Esse crescimento mais acentuado das fontes não fósseis resultou em um aumento das emissões de CO_2 de apenas 0,8%. A geração global de energia elétrica cresceu 4,2% no mesmo período, com as fontes renováveis contribuindo com 32,1% da energia gerada, enquanto as fontes fósseis ainda representam 58,6% do total. Entretanto, as fontes renováveis apresentaram crescimento de 10% no ano, a nuclear 3,7%, e o conjunto das fósseis cresceu apenas 1,3% [1].

Os dados do Brasil revelam uma matriz energética muito mais renovável, tanto na OIE quanto na geração de energia elétrica, com participações de 50,0% e 88,0%, respectivamente [2]. Segundo dados do *Balanço Energético Nacional* [2], a OIE cresceu 2,4% em 2024, totalizando 321.991 mil t equivalentes de petróleo (ktep). Enquanto a OIE proveniente de fontes renováveis aumentou 4,3%, a das fontes não renováveis teve crescimento de apenas 0,5%. A *Figura 2.1* apresenta a distribuição percentual da OIE entre os diversos recursos energéticos. Pode-se observar que a bioenergia responde por um terço da OIE, número apenas ligeiramente inferior à primeira fonte, que são o petróleo e seus derivados.

A produção de energia primária totalizou 395.535 ktep em 2024, dos quais 41% são renováveis, com os produtos da cana-de-açúcar respondendo por 14% e a lenha, por 7%. Outras renováveis, excluindo solar, eólica e energia hidráulica, somam 7%, incluindo biodiesel, etanol de milho e outras biomassas. Assim, mais de dois terços da produção de energia primária renovável é composta por bioenergia. A produção de biodiesel foi de 9,1 milhões de m³ em 2024, sendo 66,9% originária do óleo de soja, seguida por outros materiais graxos com 12,6%. A produção de cana-de-açúcar alcançou 685,6 milhões de t, com redução de 3,8% em relação ao ano anterior, e a fabricação de etanol a partir desse insumo foi de 30,6 milhões de m³, representando uma redução de 2% em relação a 2023. A produção de etanol de milho e outras biomassas atingiu 7,55 milhões de m³ em 2024, representando 19,8% do total produzido no Brasil. A produção de carvão vegetal em 2024 foi de 6.467 mil t (kt), insumo usado basicamente nos segmentos industriais de ferro-gusa, aço e ferroligas [2].

With its broad diversity of biomes, agricultural potential, logistical infrastructure, and predominantly renewable energy mix, Bahia gathers unique conditions to consolidate its position as a strategic territory for the advancement of bioenergy in Brazil. The combination of an abundant supply of agro-industrial, forestry, urban, and agricultural residues and the presence of consolidated production chains allows the state to expand renewable energy production from biomass, with positive impacts on energy security, productive inclusion, and the reduction of sectoral greenhouse gas emissions. The integration of natural characteristics, economic potential, and existing energy and logistics infrastructure fosters an environment conducive to the diversification of the energy mix and the strengthening of technological paths aligned with the low-emission energy transition.

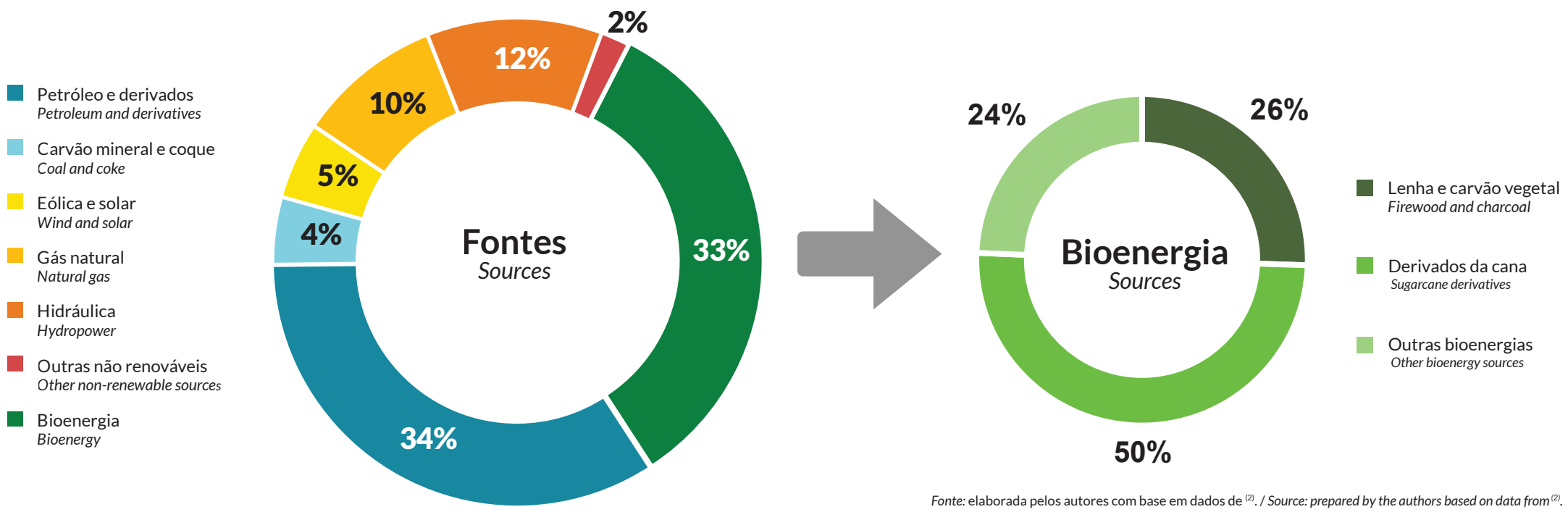
2.1 BIOMASS IN THE BRAZILIAN ENERGY MIX: PARTICIPATION, PRODUCTION, AND CONSUMPTION

Biomass plays a central role in the Brazilian energy mix, positioning the country among the global leaders in the share of renewable sources. In 2024, Brazil maintained one of the highest proportions of renewables in both its Domestic Energy Supply (OIE) and electricity generation, in contrast to the global energy mix, which is still heavily reliant on fossil fuels. This performance is largely supported by the widespread availability and use of biomass-derived resources, which represent approximately one-third of the national energy supply, particularly sugarcane products, firewood, charcoal, biodiesel, and ethanol from other biomasses. Recent developments in energy supply and generation, both globally and nationally, reinforce this leading role.

Total energy supply grew globally by 2.2% in 2024, faster than the average rate over the past decade. 80.1% of this supply is from fossil fuels and only 15.0% from renewable sources, which, in turn, grew at a much faster rate of 5.8%. The remainder of the supply is supplied by nuclear energy, which grew by 3.7%. This sharper growth in non-fossil sources resulted in an increase in CO_2 emissions of only 0.8%. Global electricity generation grew by 4.2% in the same period, with renewable sources contributing 32.1% of the energy generated, while fossil fuels still represent 58.6% of the total. However, renewable sources grew by 10% in the year, nuclear by 3.7%, and fossil fuels grew by only 1.3% [1].

Data from Brazil reveal a much more renewable energy mix, both in OIE and in electricity generation, with shares of 50.0% and 88.0%, respectively [2]. According to data from the National Energy Balance [2], the OIE grew 2.4% in 2024, totalling 321,991 thousand tons of oil equivalent (ktoe). While the OIE from renewable sources increased 4.3%, that from non-renewable sources grew by only 0.5%. Figure 2.1 shows the percentage distribution of OIE among the various energy resources. It can be seen that bioenergy accounts for one-third of the OIE, a figure only slightly lower than the first source, which is petroleum and its derivatives.

Figura 2.1 Participação percentual das diferentes fontes na composição da OIE brasileira.
Figure 2.1 *Percentage share of different sources in the composition of the Brazilian IEO.*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [2]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [2].

A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

Primary energy production totalled 395,535 ktoe in 2024, of which 41% is renewable, with sugarcane products accounting for 14% and firewood for 7%. Other renewables, excluding solar, wind, and hydropower, account for 7%, including biodiesel, corn ethanol, and other biomasses. Thus, more than two-thirds of renewable primary energy production is composed of bioenergy. Biodiesel production was 9.1 million m³ in 2024, with 66.9% coming from soybean oil, followed by other fatty materials at 12.6%. Sugarcane production reached 685.6 million tons, a 3.8% reduction compared to the previous year, and ethanol production from this input was 30.6 million m³, representing a 2% reduction compared to 2023. Ethanol production from corn and other biomasses reached 7.55 million m³ in 2024, representing 19.8% of total production in Brazil. Charcoal production in 2024 was 6,467 thousand tons (kt), an input used primarily in the pig iron, steel, and ferroalloy industrial segments [2].

Regarding final energy consumption by source, petroleum derivatives account for 35.6%; electricity, 20.5%; and bioenergy totals 32.9%, with emphasis on sugarcane products (bagasse and ethyl alcohol) at 18.8%, firewood and charcoal at 8.5%, as well as black liquor (3.0%) and biodiesel (2.6%). The remaining 11% of final energy consumption is distributed among other fossil fuels. When observing final energy consumption of biomass by sector, the highlights are the energy sector at 14.5% (bagasse); transportation at 26.9% (ethyl alcohol and biodiesel); industrial at 45.2%, particularly in the food and beverage (bagasse) and pulp and paper (black liquor) segments; residential at 8.2%; and agricultural at 5.0%, in addition to commercial at 0.2%.

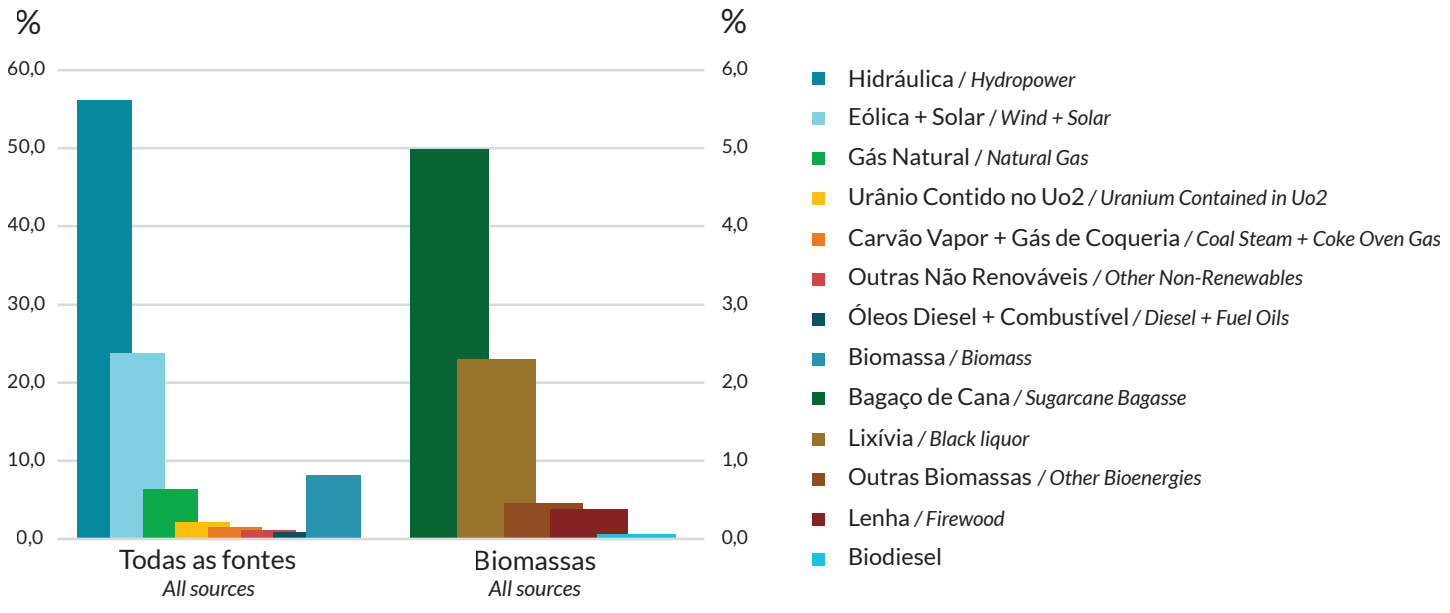
Electricity production grew by 6.1% in 2024, reaching 751.3 TWh. Renewable sources accounted for 88.0% of Brazil's domestic electricity supply, while non-renewable sources, including nuclear power, accounted for 12.0%. Within this bold pattern of renewable sources' participation in electricity production, biomass ranks 4th, behind other renewable sources (hydro, wind, and solar), and ahead of natural gas and nuclear power. Biomass accounted for 9.3% of electricity production, distributed among sugarcane bagasse (5.7%), black liquor (2.6%), firewood (0.4%), biodiesel (0.1%), and other bioenergies (0.5%) [2]. *Figure 2.2 shows the participation of different sources in electricity generation. Electricity generation from urban waste is still insignificant, but it has great potential for growth, as will be demonstrated later in this atlas.*

The installed power generation capacity in the National Interconnected System (SIN) by energy source, based on data from the National Electric System Operator (ONS), shows a slight variation between May

No que diz respeito ao consumo final energético por fonte, os derivados do petróleo respondem por 35,6%; a eletricidade, por 20,5%; e as bioenergias totalizam 32,9%, com destaque para os produtos da cana-de-açúcar (bagaço e álcool etílico) com 18,8%, lenha e carvão vegetal com 8,5%, além da lixívia (3,0%) e do biodiesel (2,6%). Os 11% restantes do consumo final energético ficam distribuídos entre os demais fósseis. Ao observar o consumo final energético de biomassa por setores, destacam-se o setor energético com 14,5% (bagaço); transportes com 26,9% (álcool etílico e biodiesel); industrial com 45,2%, sobretudo nos segmentos de alimentos e bebidas (bagaço) e papel e celulose (lixívia); residencial com 8,2%; e o agropecuário com 5,0%, além do comercial, com 0,2%.

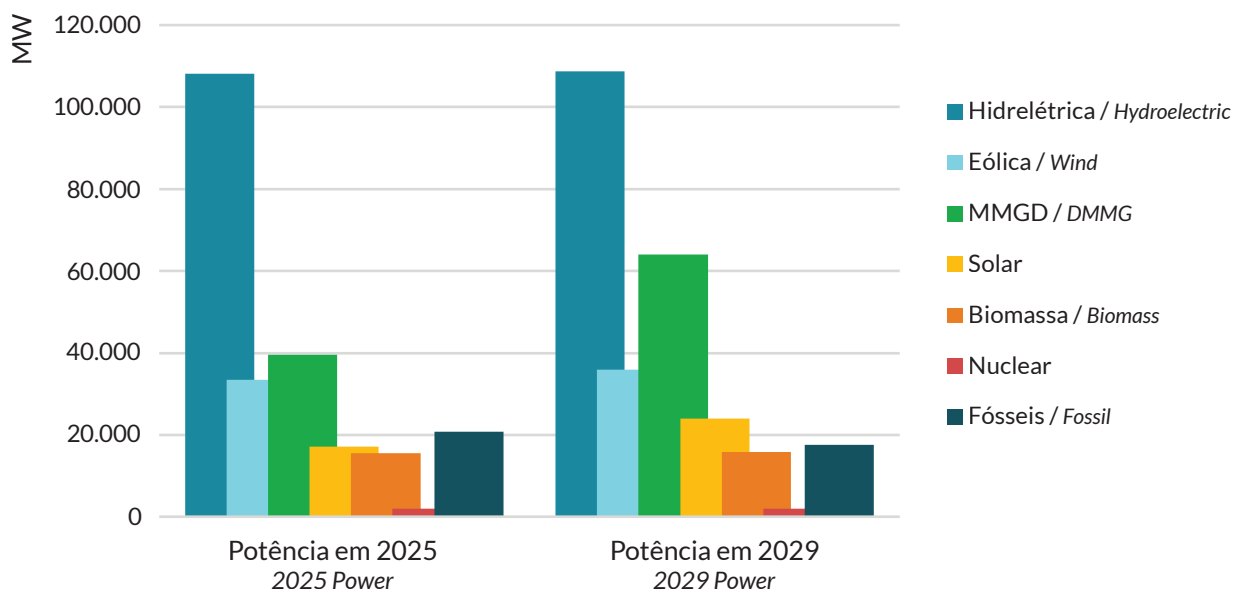
A produção de energia elétrica registrou crescimento de 6,1% em 2024, atingindo 751,3 TWh. As fontes renováveis representaram 88,0% da oferta interna de eletricidade no Brasil, enquanto as fontes não renováveis, incluindo a nuclear, totalizaram 12,0%. Dentro desse padrão arrojado de participação das fontes renováveis na produção de energia elétrica, a biomassa ocupa a 4ª posição, atrás de outras renováveis (hidráulica, eólica e solar), e à frente do gás natural e da nuclear. A biomassa respondeu por 9,3% da produção de energia elétrica, distribuída entre o bagaço de cana (5,7%), licor negro (2,6%), lenha (0,4%), biodiesel (0,1%) e outras biomassas (0,5%) [2]. A *Figura 2.2* apresenta a participação das diferentes fontes na geração de energia elétrica. A geração de energia

Figura 2.2 Participação das diferentes fontes energéticas na geração de energia elétrica no Brasil.
Figure 2.2 *Participation of different energy sources in power generation in Brazil.*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [2]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [2].

Figura 2.3 Capacidade instalada de geração elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), por fonte de energia, em 2025 e previsão para 2029.
Figure 2.3 *Installed power generation capacity in the National Interconnected System (SIN), by energy source, in 2025 and forecast for 2029.*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [2]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [2].

A capacidade instalada de geração elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) por fonte de energia, com dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), apresenta uma leve variação entre maio de 2025 e a previsão para dezembro de 2029. Nesse período, a participação da biomassa passa de 6,5% (15.491 MW) para 5,9% (15.814 MW), indicando um pequeno crescimento em termos absolutos, mas uma redução relativa [3]. Esses dados estão representados na *Figura 2.3*. Este atlas busca contribuir para a reversão dessa tendência por meio da ampliação do aproveitamento energético de resíduos de biomassa, especialmente aqueles oriundos de processos agroindustriais e da gestão de resíduos urbanos, como os resíduos sólidos e os efluentes domésticos.

A maior parte da capacidade instalada de geração elétrica a partir de biomassa no Brasil está concentrada em usinas que utilizam o bagaço da cana-de-açúcar, que representam 71,1% do total, seguidas pela lixívia do setor de papel e celulose, com 19,9% (*Figura 2.4*) [3]. No segmento de minigeração e microgeração distribuída, a biomassa responde por apenas 202,9 MW, sendo 150,6 MW provenientes do biogás [4]. Dados da Agência Internacional de Energias Renováveis (Irena) indicam que 55,5% da capacidade

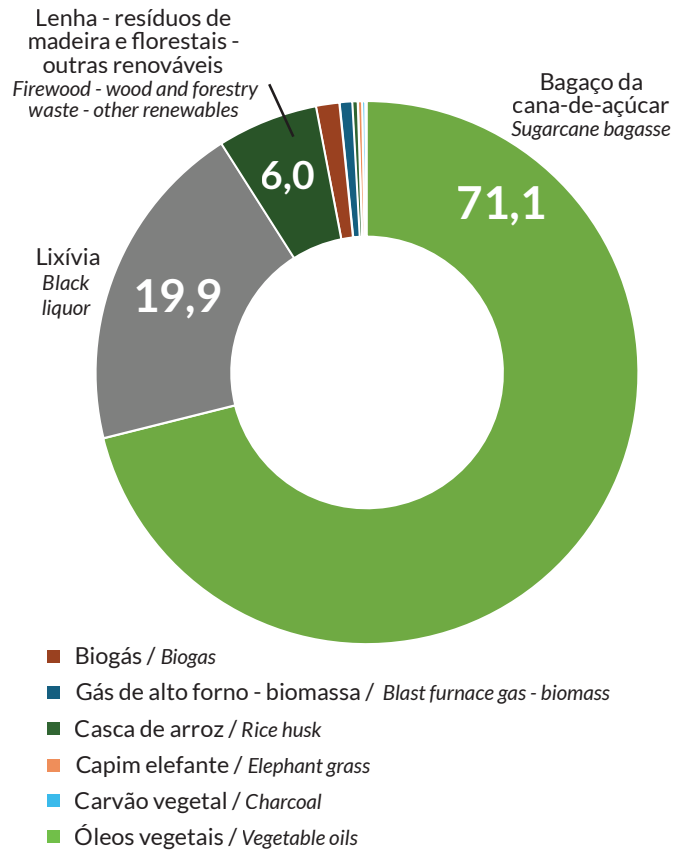
instalada para geração de eletricidade a partir do bagaço encontra-se no Brasil, enquanto apenas 0,1% utiliza resíduos municipais renováveis. Em escala global, as capacidades instaladas para esses dois segmentos são semelhantes, com 22,9 MW e 21,8 MW, respectivamente [5].

A rede básica de transmissão do Brasil totalizava, em 2023, 171.640 km em tensões iguais ou superiores a 230 kV, e deve atingir 200.015 km em dezembro de 2028, segundo dados do ONS, distribuídos em 91.200 km em 500/525 kV, 69.100 km em 230 kV e o restante em tensões de 345 kV e acima de 525 kV [3].

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO DA BAHIA PARA O DESENVOLVIMENTO DA BIOENERGIA

A caracterização ambiental e territorial da Bahia é elemento estruturante para compreender o papel estratégico do Estado na transição energética brasileira. Mais do que delimitar aspectos físicos, ecológicos e socioeconômicos, essa análise revela as conexões entre recursos naturais, dinâmicas produtivas e condições institucionais que moldam as possibilidades de desenvolvimento da bioenergia em diferentes regiões do território baiano. A configuração ecológica e territorial da Bahia impõe condicionantes relevantes ao uso da biomassa como fonte energética, ao mesmo tempo em que revela oportunidades estratégicas para a expansão de rotas bioenergéticas sustentáveis.

Figura 2.4 Capacidade instalada para geração de energia elétrica no Brasil por tipo de biomassa, em %.
Figure 2.4 *Installed capacity for electricity generation in Brazil by type of biomass, in %.*



Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [2]
Source: prepared by the authors based on data from [2].

2025 and the forecast for December 2029. During this period, the share of biomass decreased from 6.5% (15,491 MW) to 5.9% (15,814 MW), indicating a slight increase in absolute terms but a relative reduction [3]. These data are shown in Figure 2.3. This atlas seeks to help reverse this trend by expanding the energy use of biomass residues, especially those originating from agro-industrial processes and urban waste management, such as solid waste and domestic effluents.

Most of Brazil's installed biomass-based power generation capacity is concentrated in plants that use sugarcane bagasse, which represent 71.1% of the total, followed by black liquor from the pulp and paper sector, with 19.9% (Figure 2.4) [3]. In the distributed mini generation and microgeneration segment, biomass accounts for only 202.9 MW, with 150.6 MW coming from biogas [4]. Data from the International Renewable Energy Agency (IRENA) indicate that 55.5% of the installed bagasse-based power generation capacity is located in Brazil, while only 0.1% uses renewable municipal waste. Globally, the installed capacities for these two segments are similar, at 22.9 MW and 21.8 MW, respectively [5].

Brazil's basic transmission grid totalled 171,640 km in 2023 at voltages equal to or at or above 230 kV, and is expected to reach 200,015 km in December 2028, according to ONS data, distributed in 91,200 km at 500/525 kV, 69,100 km at 230 kV, and the remainder at voltages of 345 kV and above 525 kV [3].

2.2 CHARACTERIZATION OF THE STATE OF BAHIA FOR BIOENERGY DEVELOPMENT

The environmental and territorial characterization of Bahia is a structuring element for understanding the state's strategic role in the Brazilian energy transition. More than just delimiting physical, ecological, and socioeconomic aspects, this analysis reveals the connections between natural resources, production dynamics, and institutional conditions that shape the possibilities for bioenergy development in different regions of Bahia. Bahia's ecological and territorial configuration imposes significant constraints on the use of biomass as an energy source, while also revealing strategic opportunities for expanding sustainable bioenergy routes.

Figura 2.5 Caracterização do Estado da Bahia.
Figure 2.5 *Characterization of the State of Bahia.*

Código *Code*	Território de Identidade *Identity Territory*	Habitantes *Inhabitants*
1	Irecê	430.139
2	Velho Chico	393.971
3	Chapada Diamantina	398.911
4	Sisal	619.981
5	Litoral Sul	751.898
6	Baixo Sul	377.239
7	Extremo Sul	451.460
8	Médio Sudoeste da Bahia	236.737
9	Vale do Jiquiriçá	303.705
10	Sertão do São Francisco	587.921
11	Bacia do Rio Grande	508.648
12	Bacia do Paramirim	141.154
13	Sertão Produtivo	500.006
14	Piemonte do Paraguaçu	257.582
15	Bacia do Jacuípe	276.273
16	Piemonte da Diamantina	211.198
17	Semiárido Nordeste II	423.944
18	Litoral Norte e Agreste Baiano	566.130
19	Portal do Sertão	1.005.277
20	Sudoeste Baiano	784.011
21	Recôncavo	537.677
22	Médio Rio de Contas	368.181
23	Bacia do Rio Corrente	209.716
24	Itaparica	182.625
25	Piemonte Norte do Itapicuru	284.465
26	Metropolitano de Salvador	3.623.647
27	Costa do Descobrimento	418.017

O ESTADO EM NÚMEROS / *THE STATE IN NUMBERS*



564.760 km²
área total
total area

4º em população
no Brasil
4th most populous state in Brazil

Salvador
é a capital fundada em 1549
is the capital, founded in 1549

18 municípios
com mais de 100 mil habitantes
18 municipalities with over 100,000 inhabitants

417
municípios
municipalities

42,3% dos habitantes
vivem na cidade
42.3% of inhabitants live in urban areas

14,8 milhões
de habitantes em 2025
14,8 million inhabitants in 2025

12% do território estadual
sob proteção ambiental
12% of the state territory under environmental protection

7,7 milhões
de mulheres / *7.7 million women*

0,4920 IFDM geral
em 2023, crescimento de 66% em relação a 2013
0.4920 overall IFDM in 2023, a 66% increase compared to 2013

7,1 milhões
de homens/ *7.1 million men*

R$ 482,8 PIB
do Estado (em bilhões) em 2024
BRL 482.8 billion State GDP in 2024

Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [22,27,28,29,31]. */ Source: prepared by the authors based on data from* [22,27,28,29,31].

A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

2.2.1 TERRITORY AND ENVIRONMENT: STRATEGIC ASPECTS FOR BIOENERGY IN BAHIA

With 564,700 km², Bahia is the 5th largest Brazilian state, occupying 6.6% of the national territory, and the largest in the Northeast region, covering 36.3% of the regional area. It is bordered to the north by Sergipe, Alagoas, Pernambuco, and Piauí; to the west by Tocantins and Goiás; to the south by Minas Gerais and Espírito Santo; and to the east by the Atlantic Ocean, located between latitudes 8º and 18º South and longitudes 37º and 46º West [6].

The relief features coastal plains, plateaus, mountain ranges, and depressions. In the center of the state, plateaus predominate, notably the Chapada Diamantina, with an altitude of over 1,000 m; the Serra das Almas, which reaches 1,500 m; and the Serra do Barbado, whose highest point reaches 2,033 m. In the northeastern portion and the Lower-Middle São Francisco, depressions and plateaus predominate, while the coastal strip is home to plains with altitudes below 300 m [7]. Map 2.1 shows the main relief compartments of Bahia, defined based on geomorphological characteristics.

Bahia's natural resource base is composed of three biomes: the Caatinga, in the backlands; the Atlantic Forest, on the coast; and the Cerrado, in the west, as well as the transition areas between them (Map 2.2) [10].

The Cerrado, located in the western portion, occupies 22.6% of Bahia's territory, with average annual rainfall between 800 and 1,200 mm [10]. Its vegetation is characterized by savanna, with shrubs, medium-sized trees, and twisted trunks. The soils are acidic, requiring correction for agriculture, and fertile (oxisols), favoring the mechanized and irrigated cultivation of soybeans, cotton, corn, and coffee [11].

The Atlantic Forest biome extends across almost the entire coastal strip of the state, covering 16.4% of the state's territory, with altitudes below 300 m. It is characterized by the presence of plains and isolated mountain ranges, with vegetation consisting of primary and secondary forest, mangroves, and coastal sandbanks, high biodiversity, average rainfall above 1,200 mm per year, and high humidity [10]. Much of this vegetation has been replaced by human-altered areas and agricultural activities, such as forest plantations in the Far South, cocoa cultivation in the Southeast and Center-North, sugarcane, and tropical fruit growing [12,13,10]. There are also remnants of the Atlantic Forest in environmentally protected areas and sustainably managed properties [14]. Since 2006, the biome and its enclaves located in the Cerrado and Caatinga have been protected by Law No. 11,428/2006 [15], which provides for the use and protection of native vegetation in the Atlantic Forest biome, aiming to guarantee the conservation, protection, regeneration and sustainable use of this important ecosystem.

2.2.1 TERRITÓRIO E MEIO AMBIENTE: ASPECTOS ESTRATÉGICOS PARA A BIOENERGIA NA BAHIA

Com 564.700 km², a Bahia é o 5º maior Estado brasileiro, ocupando 6,6% do território nacional e o maior da região Nordeste, abrangendo 36,3% da área regional. Limita-se ao norte com Sergipe, Alagoas, Pernambuco e Piauí; a oeste com Tocantins e Goiás; ao sul com Minas Gerais e Espírito Santo; e a leste pelo Oceano Atlântico, situando-se entre as latitudes 8º e 18º Sul e longitudes 37º e 46º Oeste [6].

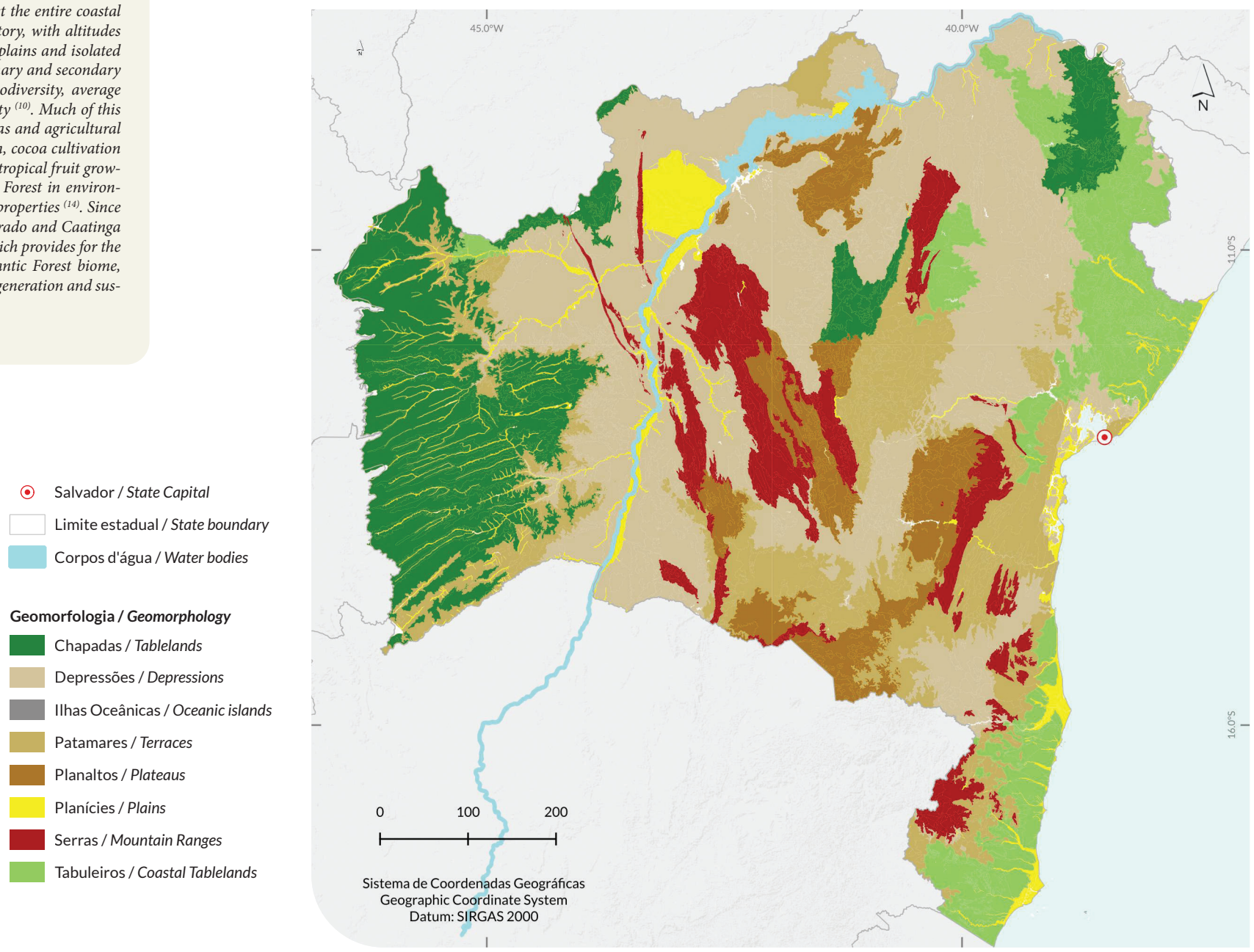
O relevo apresenta planícies litorâneas, planaltos, serras e depressões. No centro do Estado predominam as chapadas, destacando-se a Chapada Diamantina, com altitude superior a 1.000 m; a Serra das Almas, que alcança 1.500 m; e a Serra do Barbado, cujo ponto mais alto atinge 2.033 m. Na porção Nordeste e no Baixo-médio São Francisco predominam depressões e tabuleiros, enquanto na faixa litorânea encontram-se planícies com altitudes inferiores a 300 m [7]. O *Mapa 2.1* apresenta os principais compartimentos do relevo da Bahia, definidos com base em características geomorfológicas.

A base dos recursos naturais da Bahia é composta por três biomas: Caatinga, no sertão; Mata Atlântica, no litoral; e Cerrado, no Oeste, além das áreas de transição entre eles (*Mapa 2.2*) [10].

O Cerrado, localizado na porção Oeste, ocupa 22,6% do território baiano, apresentando precipitação média anual entre 800 e 1.200 mm [10]. Sua vegetação caracteriza-se pela savana, com arbustos, árvores de porte médio e troncos retorcidos. Os solos são ácidos, demandando correção para a agricultura, e férteis (latossolos), favorecendo o cultivo mecanizado e irrigado de soja, algodão, milho e café [11].

O bioma Mata Atlântica se estende por quase toda a faixa litorânea do Estado, abrangendo 16,4% do território baiano, com altitudes inferiores a 300 m. Caracteriza-se pela presença de planícies e serras isoladas, com vegetação formada por floresta primária e secundária, manguezais, restingas, alta biodiversidade, precipitação média acima dos 1.200 mm anuais e elevada umidade [10]. Grande parte dessa vegetação foi substituída por áreas antropizadas e atividades agrícolas, como plantios florestais no Extremo Sul, cultivo de cacau no Sudeste e Centro-Norte, cana-de-açúcar e fruticultura tropical [12,13,10]. Há ainda remanescentes da Mata Atlântica em áreas de proteção ambiental e propriedades com manejo sustentável [14]. Desde 2006, o bioma e seus encraves localizados no Cerrado e na

Mapa 2.1 Relevo da Bahia, com base em características geomorfológicas.
Map 2.1 *Relief of Bahia, based on geomorphological characteristics.*



Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [8,9]. */ Source: prepared by the authors based on data from [8,9].*

Caatinga são protegidos pela *Lei 11.428/2006* [15], que dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do bioma Mata Atlântica, visando a garantir a conservação, proteção, regeneração e uso sustentável desse importante ecossistema.

A Caatinga ocupa 43,6% do território estadual, abrangendo as regiões Central e Nordeste, caracterizando-se por baixas e irregulares precipitações pluviométricas, inferiores a 500 mm anuais, e altas temperaturas [10]. Na Região Nordeste predominam tabuleiros e depressões com altitudes entre 300 e 500 m, e vegetação típica de caatinga e caatinga arbórea [7]. As principais atividades econômicas são a agricultura de subsistência, com cultivos resistentes à seca, como milho, feijão e mandioca, e a pecuária extensiva de caprinos e ovinos [10,16,117].

A Bahia apresenta três zonas de transição entre biomas. A primeira, entre a Caatinga e a Mata Atlântica, ocupa cerca de 41.300 km² (7% do território estadual). A segunda ocorre entre a Caatinga e o Cerrado, com 55.900 km² (9,9%), abrangendo parte do Vale do Rio São Francisco, onde a margem Leste aproxima-se da Caatinga e a margem Oeste, do Cerrado. Essa região é caracterizada por planícies fluviais, clima tipicamente semiárido e vegetação de caatinga. Apesar dos solos naturalmente pobres em nutrientes, a fruticultura irrigada tem se destacado pela alta produtividade, especialmente no cultivo de manga, uva, melão, banana e outras frutas tropicais. Há ainda uma terceira e menor faixa de transição, onde se encontram Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica, em uma área de 0,900 km² (0,2% do Estado) [10,13].

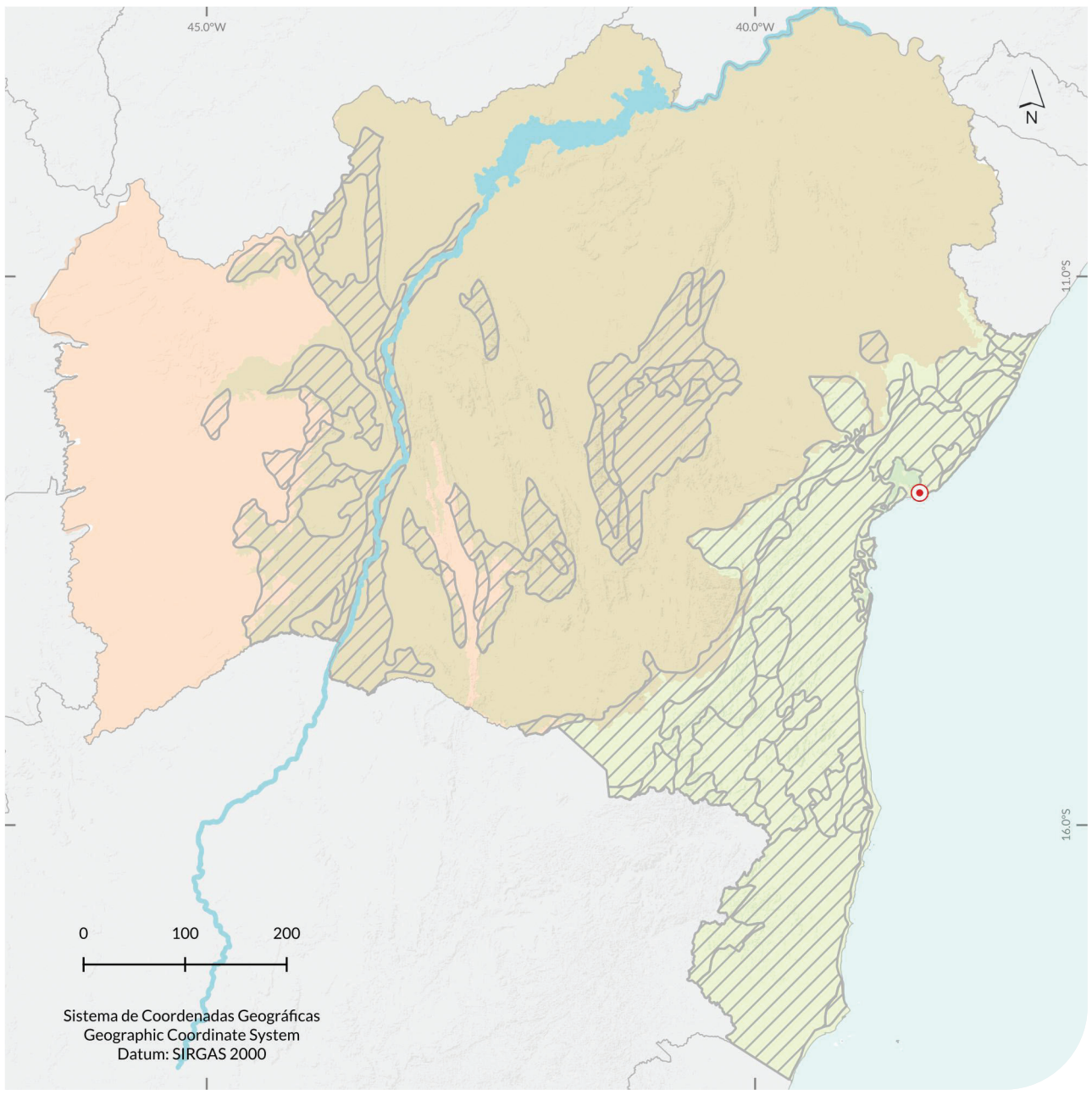
O clima tropical predomina na maior parte do Estado; o semiárido, no sertão; e o úmido, no litoral, com chuvas regulares e temperaturas médias que variam entre 22 ºC e 28 ºC. Na Chapada Diamantina prevalece o clima tropical de altitude, mais ameno e úmido. Apresentando grande diversidade hidrológica, Estado possui dezesseis bacias hidrográficas distribuídas em grande parte do território. A principal é a do São Francisco, cujo rio, que dá o seu nome, cruza o centro do Estado no sentido sul-norte, abrangendo parte do Oeste, Nordeste e Norte. Destacam-se ainda as bacias do Rio Paraguaçu, Rio de Contas e Rio Jequitinhonha, além das bacias costeiras que nascem próximas ao litoral e desaguam no Oceano Atlântico [10].

The Caatinga occupies 43.6% of the state's territory, encompassing the Central and Northeast regions. It is characterized by low and irregular rainfall, less than 500 mm per year, and high temperatures [10]. In the Northeast region, plateaus and depressions predominate, with altitudes between 300 and 500 m, and typical caatinga and arboreal caatinga vegetation [7]. The main economic activities are subsistence agriculture, with drought-resistant crops such as corn, beans, and cassava, and extensive goat and sheep farming [10,16,117].

Bahia has three transition zones between biomes. The first, between the Caatinga and the Atlantic Forest, occupies approximately 41,300 km² (7% of the state's territory). The second, between the Caatinga and the Cerrado, covers 55,900 km² (9.9%), encompassing part of the São Francisco River Valley, where the eastern bank borders the Caatinga and the western bank borders the Cerrado. This region is characterized by river plains, a typically semiarid climate, and caatinga vegetation. Despite the naturally nutrient-poor soils, irrigated fruit farming has been notable for its high productivity, especially in the cultivation of mangoes, grapes, melons, bananas, and other tropical fruits. There is also a third and smaller transition zone, where the Caatinga, Cerrado, and Atlantic Forest meet, in an area of 0.900 km² (0.2% of the state) [10,13].

A tropical climate predominates in most of the state; a semiarid climate in the backlands; and a humid climate on the coast, with regular rainfall and average temperatures ranging from 22°C to 28°C. In Chapada Diamantina, a milder and more humid highland tropical climate prevails. Boasting great hydrological diversity, the state has sixteen river basins distributed throughout much of its territory. The main one is the São Francisco River, whose namesake river crosses the center of the state from south to north, encompassing parts of the West, Northeast, and North. Also noteworthy are the Paraguaçu, Contas, and Jequitinhonha River basins, as well as the coastal basins that originate near the coast and flow into the Atlantic Ocean [10].

Mapa 2.2 Limites dos biomas e de aplicação da Lei da Mata Atlântica no Estado da Bahia.
Map 2.2 *Limits of biomes and application of the Atlantic Forest Law in the State of Bahia.*



Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [9,18,8]. */ Source: prepared by the authors based on data from* [9,18,8].

A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

Areas protected by law, such as Indigenous territories, Quilombolas territories, and Conservation Units (CUs), as well as agrarian reform settlements, which are demarcated territories and receive differentiated treatment, are distributed across various regions of the state. These areas vary primarily in their degree of environmental protection, conservation objectives, and permitted uses (Map 2.3).

According to the Conservation Units Panel of the Ministry of the Environment (MMA) [22], protected areas in the State of Bahia, under federal, state and municipal administration, total 82,074.91 km2, of which 71,959.15 (12% of the State's territory) are continental and 10,115.76 are marine.

As áreas protegidas por lei, como os territórios indígenas, quilombolas e as unidades de conservação (UCs), bem como os assentamentos da reforma agrária, que são territórios demarcados e possuem tratamento diferenciado, estão distribuídas por diversas regiões do Estado. Essas áreas variam, principalmente, quanto ao grau de proteção ambiental, aos objetivos de conservação e aos tipos de uso permitidos (*Mapa 2.3*).

Segundo o *Painel de Unidades de Conservação do Ministério do Meio Ambiente* (MMA) [22], as áreas protegidas no Estado da Bahia, sob administração das esferas federal, estadual e municipal, perfazem um total de 82.074,91 km2, sendo 71.959,15 (12% do território do Estado) de área continental e 10.115,76 de área marinha.

ÁREAS PROTEGIDAS

TERRAS INDÍGENAS são áreas reconhecidas pela *Constituição de 1988* como patrimônio da União, destinadas à posse permanente e ao uso exclusivo dos povos indígenas, garantindo a preservação de sua cultura, modos de vida e recursos naturais. A legislação brasileira define três tipos de TIs: tradicionalmente ocupadas (habitadas conforme costumes e tradições), reservas indígenas (terras doadas, adquiridas ou desapropriadas pela União) e terras dominiais (propriedade legal das comunidades indígenas) [19].

Já os **TERRITÓRIOS QUILOMBOLAS** são áreas tradicionalmente ocupadas por comunidades remanescentes de quilombo, utilizadas para garantir sua reprodução física, social, econômica e cultural. Conforme o art. *2º* do *Decreto nº 4.887/2003*, esses territórios são marcados por relações específicas com a terra e representam um direito coletivo historicamente negado, cuja regularização fundiária constitui uma forma de reparação e reconhecimento. As comunidades quilombolas, por sua vez, são grupos étnico-raciais autodefinidos, com ancestralidade negra e trajetória histórica própria, que preservam tradições culturais, formas de organização social e modos de vida vinculados ao território. Trata-se de um conceito político-jurídico que busca reconhecer a diversidade dessas populações e sua resistência à opressão histórica, valorizando a memória coletiva e os direitos dos povos negros no Brasil [20].

UNIDADE DE CONSERVAÇÃO (UC) é um espaço territorial, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente protegido com o objetivo de conservar a natureza. Definida pela *Lei nº 9.985/2000*, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), a UC visa a preservar a biodiversidade, permitindo, conforme o tipo, desde a proteção integral de ecossistemas até o uso sustentável de seus recursos [21]. As UCs são classificadas em duas categorias: Proteção Integral, voltadas à preservação e pesquisa científica, e Uso Sustentável, que conciliam conservação com atividades como visitação, educação ambiental e manejo de recursos naturais.

Figura 2.6 Terras indígenas / áreas protegidas
Figure 2.6 *Indigenous lands / protected areas*



Foto / *Photo*: Gustavo / stock.adobe.com

PROTECTED AREAS

INDIGENOUS LANDS *re areas recognized by the 1988 Constitution as federal heritage, designated for the permanent possession and exclusive use of indigenous peoples, ensuring the preservation of their culture, way of life, and natural resources. Brazilian law defines three types of Indigenous Lands: traditionally occupied (inhabited according to customs and traditions), indigenous reserves (lands donated, acquired, or expropriated by the federal government), and public lands (legally owned by indigenous communities) [19].*

QUILOMBOLA TERRITORIES *are areas traditionally occupied by remaining quilombo communities, used to ensure their physical, social, economic, and cultural reproduction. According to Article 2 of Decree No. 4,887/2003, these territories are marked by specific relationships with the land and represent a historically denied collective right, whose land regularization constitutes a form of reparation and recognition. Quilombola communities, in turn, are self-defined ethno-racial groups, with Black ancestry and their own historical trajectory, which preserve cultural traditions, forms of social organization, and ways of life linked to the territory. This is a political-legal concept that seeks to recognize the diversity of these populations and their resistance to historical oppression, valuing the collective memory and rights of Black people in Brazil [20].*

A ***CONSERVATION UNIT (CU)*** *is a territorial space, including jurisdictional waters, with relevant natural features, legally protected for the purpose of nature conservation. Defined by Law No. 9,985/2000, which established the National System of Conservation Units (SNUC), a CU aims to preserve biodiversity, allowing, depending on the type, everything from the full protection of ecosystems to the sustainable use of their resources [21]. CUs are classified into two categories: Full Protection, focused on preservation and scientific research, and Sustainable Use, which combines conservation with activities such as visitation, environmental education, and natural resource management.*

Atlas Bioenergia Bahia

45.0°W

40.0°W

N

11.0°S

16.0°S

Mapa 2.3 Distribuição geográfica de áreas protegidas do Estado da Bahia.
Map 2.3 *Geographic distribution of protected areas in the State of Bahia.*

Salvador / *State Capital*

Limite estadual / *State boundary*

Corpos d'água / *Water bodies*

Áreas protegidas / *Protected Areas*

Assentamento rural
Rural Settlement

Território indígena
Indigenous Territory

Território quilombola
Quilombola Territory

Unidades de conservação / *Conservation Units*

UC federal de proteção integral
Federal fully protected conservation unit

UC federal de uso sustentável
Federal sustainable use conservation unit

UC municipal de proteção integral
Municipal fully protected conservation unit

UC municipal de uso sustentável
Municipal sustainable use conservation unit

UC estadual de proteção integral
State fully protected conservation unit

UC estadual de uso sustentável
State sustainable use conservation unit

RPPN estadual
State Private Natural Heritage Reserve (RPPN)

Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [18,23,24,9,8]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [18,23,24,9,8].

0 100 200

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

Bahia is home to a significant diversity of vegetation formations, resulting from the overlapping domains of the Atlantic Forest, Cerrado, and Caatinga (Map 2.4). According to the IBGE Physiognomic-Ecological System [25], the state's most notable features are the Dense and Open Ombrophilous Forest, predominant along the coastal strip and composed of highly diverse evergreen vegetation; the Deciduous Seasonal Forest, typical of southern Bahia, especially in the Pardo River Basin, characterized by deciduous species adapted to limestone soils; and the Semideciduous Seasonal Forest, present in the interior regions, characterized by partial leaf loss during the dry season.

In the west of the state, Savannah or Cerrado formations predominate, with features ranging from cerradão (dense woodland of the cerrado), typical cerrado, dirty fields, and clean fields, adapted to poor and acidic soils. In the semiarid interior, the Steppe Savannah stands out, corresponding to the Caatinga of the Arid Backlands, with sparse, shrubby, and often thorny vegetation. Campinarana formations also occur occasionally in areas of sandy soils in northern Bahia [25].

In addition to the main formations, Bahia's territory is home to ecological transition zones, called ecotones, where different types of vegetation interpenetrate, creating communities with intermediate characteristics. A notable example occurs in the Paulo Afonso Region, in the Raso da Catarina region, where floral elements of the Cerrado, Caatinga, and Seasonal Forests coexist. Vegetation enclaves, defined as well-defined nuclei of one vegetation inserted into another domain, such as fragments of Ombrophilous Forest in Cerrado areas, are also recorded. The occurrence of these ecotones and enclaves reinforces the ecological complexity and strategic importance of Bahia's territory for biodiversity conservation, environmental planning, and sustainable development [25].

Given this significant environmental, ecological, and territorial diversity, the State of Bahia gathers strategic conditions for the sustainable development of bioenergy, especially from sources linked to agriculture, forestry, and organic residues. The coexistence of distinct biomes, ecological transition zones, specific agricultural vocations by region, ample water availability in some basins, and protected areas with potential for sustainable use create a territorial mosaic that requires planning that is attentive to local specificities. This complexity, at once challenging and promising, reinforces the need for public policies and productive initiatives aligned with biodiversity conservation, territorial justice, and the appreciation of traditional and rural communities.

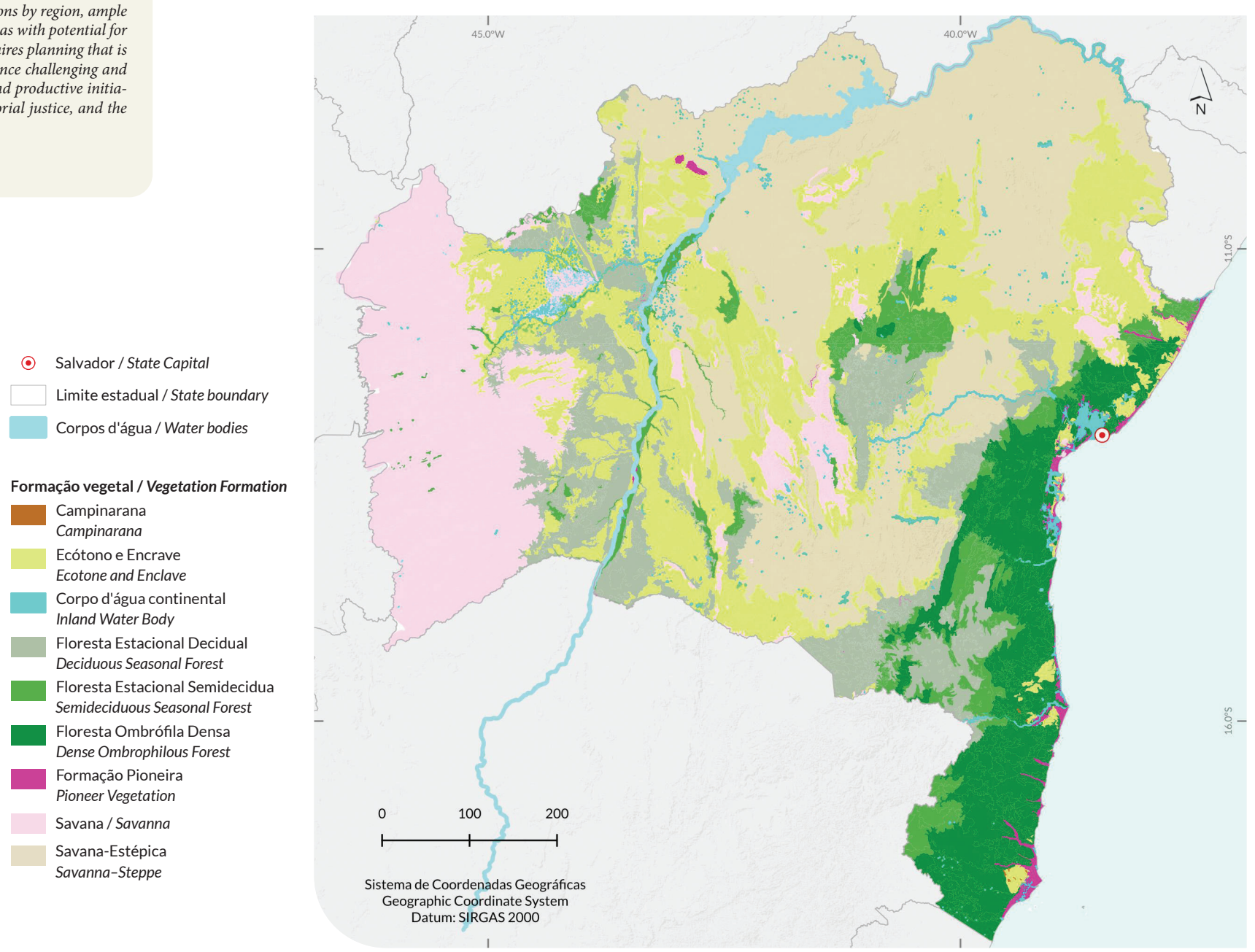
A Bahia abriga uma expressiva diversidade de formações vegetacionais, resultado da sobreposição dos domínios da Mata Atlântica, do Cerrado e da Caatinga (*Mapa 2.4*). De acordo com o *Sistema Fisionômico-Ecológico do IBGE* [25], destacam-se no Estado a Floresta Ombrófila Densa e Aberta, predominante na faixa litorânea, composta por vegetação perenifólia de elevada diversidade; a Floresta Estacional Decidual, típica do Sul baiano, especialmente na Bacia do Rio Pardo, marcada por espécies caducifólias adaptadas a solos calcários; e a Floresta Estacional Semidecidual, presente nas regiões interioranas, caracterizada pela perda parcial de folhas durante a estação seca.

No Oeste do Estado predominam as formações de Savana, ou Cerrado, com fisionomias que variam entre cerradão, cerrado típico, campos sujos e campos limpos, adaptadas a solos pobres e ácidos. Já no interior semiárido, destaca-se a Savana-Estépica, correspondente à Caatinga do Sertão Árido, com vegetação esparsa, arbustiva e frequentemente espinhosa. Também ocorrem, de forma pontual, formações de Campinarana, em áreas de solos arenosos no Norte da Bahia [25].

Além das formações principais, o território baiano abriga zonas de transição ecológica, denominadas ecótonos, onde diferentes tipos de vegetação se interpenetram, gerando comunidades com características intermediárias. Um exemplo notável ocorre na Região de Paulo Afonso, no Raso da Catarina, onde coexistem elementos florísticos do Cerrado, da Caatinga e das Florestas Estacionais. Também são registrados encraves vegetacionais, definidos como núcleos bem delimitados de uma vegetação inseridos em outro domínio, como fragmentos de Floresta Ombrófila em áreas de Cerrado. A ocorrência desses ecótonos e encraves reforça a complexidade ecológica e a importância estratégica do território baiano para ações de conservação da biodiversidade, planejamento ambiental e desenvolvimento sustentável [25].

Diante dessa expressiva diversidade ambiental, ecológica e territorial, o Estado da Bahia reúne condições estratégicas para o desenvolvimento sustentável da bioenergia, especialmente a partir de fontes vinculadas à agricultura, silvicultura e resíduos orgânicos. A coexistência de biomas distintos, zonas de transição ecológica, vocações agrícolas específicas por região, ampla disponibilidade hídrica em algumas bacias e áreas protegidas com potencial para uso sustentável criam um mosaico territorial que exige planejamento atento às especificidades locais. Essa complexidade, ao mesmo tempo desafiadora e promissora, reforça a necessidade de políticas públicas e iniciativas produtivas alinhadas à conservação da biodiversidade, à justiça territorial e à valorização das comunidades tradicionais e rurais.

Mapa 2.4 Distribuição geográfica das diferentes formações vegetais presentes no estado da Bahia.
Map 2.4 *Geographic distribution of the different vegetation formations in the State of Bahia.*



Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [9,26,18]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [9,26,18].

2.2.2 CARACTERIZAÇÃO SOCIOECONÔMICA E PRODUTIVA DA BAHIA NO CONTEXTO DA BIOENERGIA

A Bahia, com 14,8 milhões de habitantes, é o 4º Estado mais populoso do País e o primeiro do Nordeste, representando 7% da população nacional e 26% da regional [27]. Dos 417 municípios existentes, apenas 18 possuem mais de 100 mil habitantes, com densidade demográfica média de 186,4 hab./km². Esses grandes municípios concentram, juntos, 42% da população do Estado. A grande maioria dos municípios tem população de até 50 mil habitantes, com densidade de 16,4 hab./km² [28].

A partir da classificação dos municípios baianos por Território de Identidade (TI), adotada pela Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (SEI) como base para o planejamento de políticas públicas estaduais, foram atualizadas as estimativas populacionais dos 27 TIs com base nos dados do IBGE [29,27]. Em 2024, quatro Territórios de Identidade concentravam 41,5% da população do Estado: Metropolitano de Salvador, com 3,6 milhões de habitantes; Portal do Sertão, com 1 milhão; Sudoeste Baiano, com 784 mil; e Litoral Sul, com 752 mil habitantes.

A distribuição da população por gênero revela uma maioria feminina, com 92,6 homens para cada 100 mulheres. Quanto à faixa etária, 65,2% da população tem entre 15 e 59 anos, enquanto as faixas de 0 a 14 anos e acima de 60 anos somam 34,8% [28]. De acordo com as projeções do IBGE, a partir de 2035 a população começa a decrescer e, já em 2045, 27% da população terá mais de 60 anos, contra os atuais 15% [30]. Portanto, apesar do bônus demográfico que atualmente favorece o crescimento das atividades econômicas, em 20 anos a tendência de envelhecimento da população deverá reduzir, significativamente, essa vantagem.

Tabela 2.1 Classificação do IFDM, por intervalo de valores.
Table 2.1 *IFDM classification, by value range.*

Intervalo do IFDM / *IFDM Range*	Classificação / *Classification*
0,0 - 0,4	Desenvolvimento crítico / *Critical development*
0,4 - 0,6	Desenvolvimento baixo / *Low development*
0,6 - 0,8	Desenvolvimento moderado / *Moderate development*
0,8 - 1,0	Desenvolvimento alto / *High development*

Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [31].
Source: prepared by the authors based on data from [31].

O *Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM)*, que varia de 0 a 1, avalia anualmente o desempenho dos municípios brasileiros nas áreas de emprego e renda, educação e saúde. Quanto mais próximo de 1, maior o nível de desenvolvimento; quanto mais próximo de zero, menor [31]. As classificações do *IFDM*, de acordo com os intervalos de valores, estão apresentadas na *Tabela 2.1*.

Em 2023, o *IFDM Geral da Bahia* atingiu 0,4920, um crescimento de 66% em relação a 2013, quando era 0,2966. Apesar do avanço, o índice permanece abaixo da média nacional, de 0,6067 [31]. A análise municipal mostrou que 5,0% dos municípios baianos estavam em situação de desenvolvimento crítico, 90,4% com desenvolvimento baixo, 4,6% com desenvolvimento moderado e nenhum com desenvolvimento alto. Os municípios classificados como críticos e baixos somavam 10,4 milhões de pessoas, o equivalente a 70,5% da população do Estado, frente a 26,7% da população nacional nessa mesma classificação. Já os 4,6% de municípios com desenvolvimento moderado abrigavam 4,3 milhões de pessoas, representando 29,5% da população estadual, enquanto, em nível nacional,

2.2.2. SOCIOECONOMIC AND PRODUCTIVE CHARACTERIZATION OF BAHIA IN THE CONTEXT OF BIOENERGY

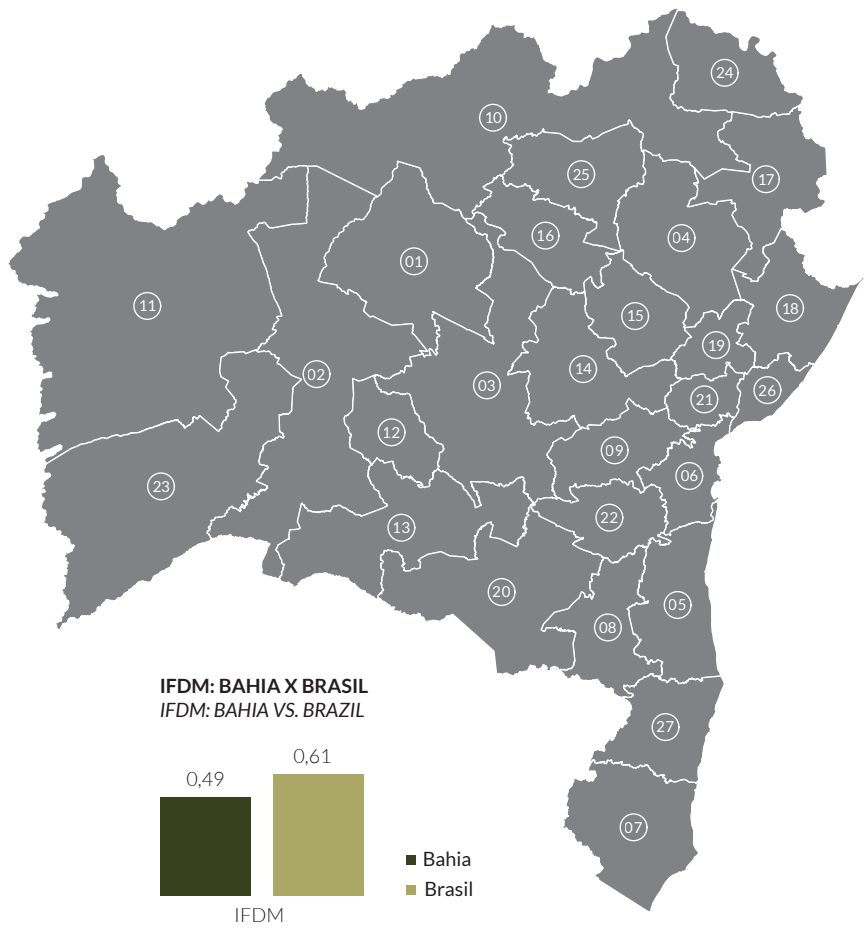
Bahia, with 14.8 million inhabitants, is the 4th most populous state in the country and the first in the Northeast, representing 7% of the national population and 26% of the regional population [27]. Of the 417 existing municipalities, only 18 have more than 100,000 inhabitants, with an average population density of 186.4 inhabitants/km². These large municipalities together account for 42% of the state's population. Most municipalities have a population of up to 50,000 inhabitants, with a density of 16.4 inhabitants/km² [28].

Based on the classification of Bahia's municipalities by Territory of Identity (TI), adopted by the Bahia Superintendence of Economic and Social Studies (SEI) as a basis for planning state public policies, the population estimates for the 27 TIs were updated based on IBGE data [29,27]. In 2024, four Territories of Identity accounted for 41.5% of the state's population: Metropolitan Salvador, with 3.6 million inhabitants; Portal do Sertão, with 1 million; Southwest Bahia, with 784,000; and South Coast, with 752,000 inhabitants.

The population distribution by gender reveals a female majority, with 92.6 men for every 100 women. Regarding age, 65.2% of the population is between 15 and 59 years old, while those aged 0 to 14 and over 60 years old account for 34.8% [28]. According to IBGE projections,

Figura 2.7 Perfil social e demográfico por Território de Identidade.
Figura 2.7 *Social and demographic profile by Territory of Identity.*

1	IRECÊ	50	43	58	48
2	VELHO CHICO	51	56	61	35
3	CHAPADA DIAMANTINA	44	40	52	41
4	SISAL	49	51	59	37
5	LITORAL SUL	48	52	56	35
6	BAIXO SUL	48	49	58	37
7	EXTREMO SUL	52	53	59	45
8	MÉDIO SUDOESTE DA BAHIA	48	36	52	58
9	VALE DO JIQUIRIÇÁ	48	49	60	35
10	SERTÃO DO SÃO FRANCISCO	50	52	60	38
11	BACIA DO RIO GRANDE	46	43	49	47
12	BACIA DO PARAMIRIM	51	46	59	47
13	SERTÃO PRODUTIVO	48	45	50	49
14	PIEMONTE DO PARAGUAÇU	45	44	51	40
15	BACIA DO JACUÍPE	59	56	59	65
16	PIEMONTE DA DIAMANTINA	45	45	52	38
17	SEMIÁRIDO NORDESTE II	50	53	58	38
18	LITORAL NORTE E AGRESTE BAIANO	51	43	56	53
19	PORTAL DO SERTÃO	48	58	46	39
20	SUDOESTE BAIANO	48	48	52	46
21	RECÔNCAVO	50	51	59	39
22	MÉDIO RIO DE CONTAS	48	50	57	36
23	BACIA DO RIO CORRENTE	52	53	65	37
24	ITAPARICA	53	54	63	42
25	PIEMONTE NORTE DO ITAPICURU	49	49	54	43
26	METROPOLITANO DE SALVADOR	49	52	55	40
27	COSTA DO DESCOBRIMENTO	48	46	58	42



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [9,8,29,31]. / *Source: prepared by the authors based on data from [9,8,29,31].*

A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

the population will begin to decline from 2035 onwards, and by 2045, 27% of the population will be over 60, compared to the current 15% [30]. Therefore, despite the demographic bonus that currently favors the growth of economic activities, in 20 years the aging population trend is expected to significantly reduce this advantage.

The Firjan Municipal Development Index (IFDM), which ranges from 0 to 1, annually assesses the performance of Brazilian municipalities in the areas of employment and income, education, and health. The closer to 1, the higher the level of development; the closer to zero, the lower [31]. The IFDM classifications, according to the value ranges, are presented in Table 2.1.

In 2023, Bahia's General IFDM reached 0.4920, a 66% increase compared to 2013, when it was 0.2966. Despite the improvement, the index remains below the national average of 0.6067 [31]. The municipal analysis showed that 5.0% of Bahia's municipalities were in a critical development situation, 90.4% with low development, 4.6% with moderate development, and none with high development. The municipalities classified as critical and low totalled 10.4 million people, equivalent to 70.5% of the state's population, compared to 26.7% of the national population in this same classification. The 4.6% of municipalities with moderate development were home to 4.3 million people, representing 29.5% of the state's population, while, nationally, 51.6% of the population resides in municipalities with this same level of development [31]. Figure 2.7 presents a summary of the main demographic and social characteristics of the State of Bahia.

51,6% da população reside em municípios com esse mesmo nível de desenvolvimento [31]. A *Figura 2.7* apresenta uma síntese das principais características demográficas e sociais do estado da Bahia.

Entre os dez melhores desempenhos, chamam a atenção os avanços dos municípios de Luís Eduardo Magalhães, Irecê, Brumado, Mucuri e Pojuca entre 2013 e 2023 [31]. A *Tabela 2.2* apresenta os dez municípios baianos com os melhores índices no período.

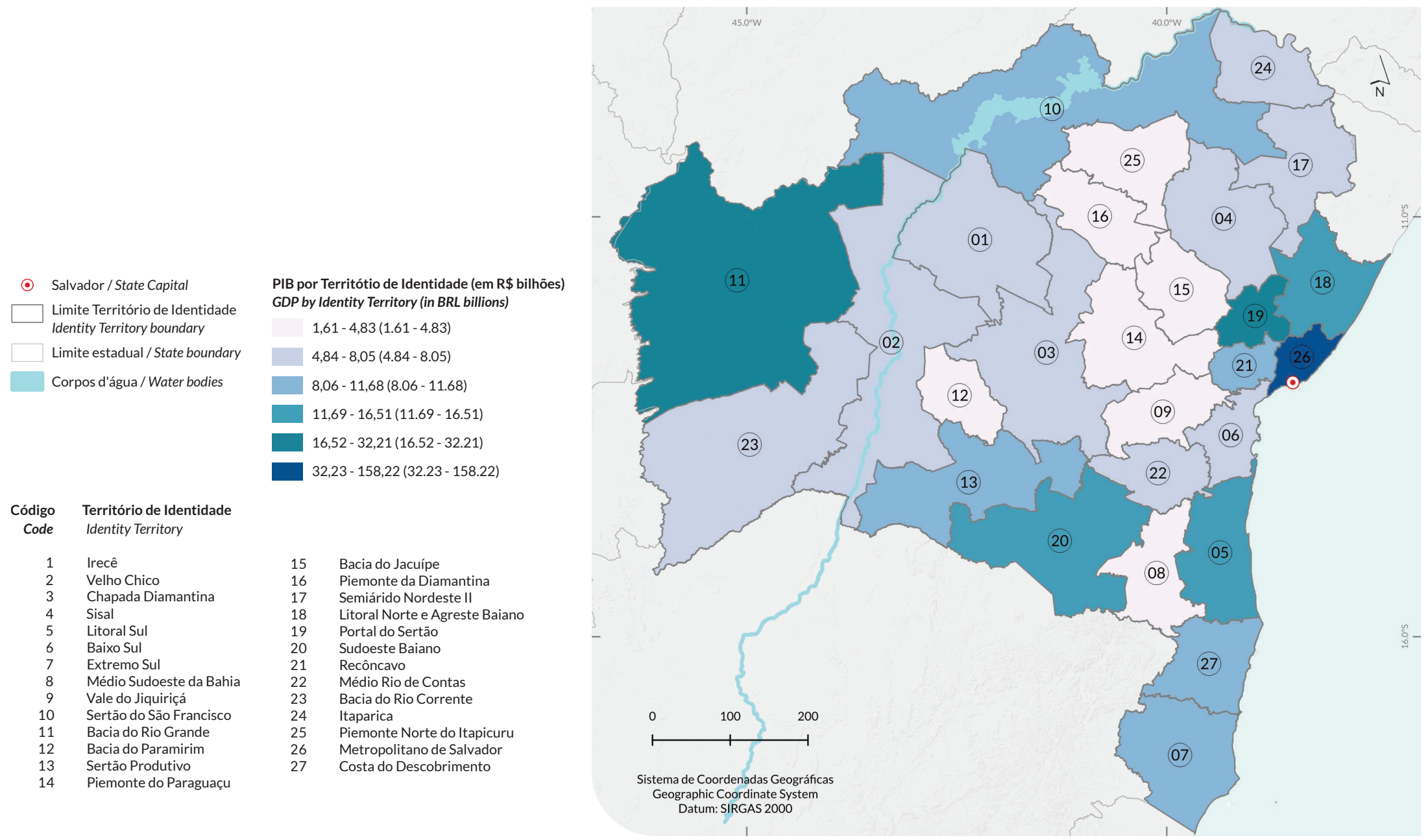
Em 2022, o Produto Interno Bruto (PIB) da Bahia alcançou R$ 402,6 bilhões, o que representou 4% do PIB nacional e 29% do total da Região Nordeste, posicionando o Estado como o 7º maior do País e o 1º do Nordeste em termos econômicos. O PIB per capita registrado naquele ano foi de R$ 28.483,93, valor que colocou a Bahia na 18ª posição entre as unidades federativas e também no primeiro lugar regional. Para os anos seguintes, a SEI estimou um PIB de R$ 428,6 bilhões em 2023 e de R$ 482,8 bilhões em 2024, sendo esse último composto por um valor adicionado de R$ 425,5 bilhões e impostos líquidos de R$ 57,3 bilhões, o que corresponde a um crescimento de 2,8% em relação ao ano anterior. O PIB per capita estimado para 2024 é de R$ 35.512,00 [32].

Tabela 2.2 Classificação dos municípios por IFDM.
Table 2.2 Municipal classification by IFDM.

Posição *Position*		Município *Municipality*	IFDM geral *General IFDM*	
2013	2023		2013	2023
20	1	Luís Eduardo Magalhães	0,5500	0,6865
18	2	Irecê	0,4603	0,6731
13	3	Brumado	0,4737	0,6631
8	4	Barreiras	0,4828	0,6603
4	5	Mata de São João	0,5231	0,6585
37	6	Mucuri	0,4187	0,6505
5	7	Salvador	0,5217	0,6442
21	8	Pojuca	0,4558	0,6417
3	9	Camaçari	0,5301	0,6380
10	9	Conceição do Jacuípe	0,4782	0,6380

Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [31].
Source: prepared by the authors based on data from [31].

Mapa 2.5 Distribuição do PIB por Território de Identidade.
Map 2.5 Distribution of GDP by Territory of Identity.



Código *Code*	Território de Identidade *Identity Territory*
1	Irecê
2	Velho Chico
3	Chapada Diamantina
4	Sisal
5	Litoral Sul
6	Baixo Sul
7	Extremo Sul
8	Médio Sudoeste da Bahia
9	Vale do Jiquiriçá
10	Sertão do São Francisco
11	Bacia do Rio Grande
12	Bacia do Paramirim
13	Sertão Produtivo
14	Piemonte do Paraguaçu
15	Bacia do Jacuípe
16	Piemonte da Diamantina
17	Semiárido Nordeste II
18	Litoral Norte e Agreste Baiano
19	Portal do Sertão
20	Sudoeste Baiano
21	Recôncavo
22	Médio Rio de Contas
23	Bacia do Rio Corrente
24	Itaparica
25	Piemonte Norte do Itapicuru
26	Metropolitano de Salvador
27	Costa do Descobrimento

Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [8,9,32]. */ Source: prepared by the authors based on data from [8,9,32].*

No mercado de trabalho formal, em 2023, foram registrados 2,7 milhões de empregos com carteira assinada. Desse total, 1,2 milhão de vagas (44,4%) foram ocupadas por mulheres, com renda média mensal real de R$ 1.749,00, enquanto os homens ocuparam 1,5 milhão de postos (55,6%), com renda média de R$ 1.944,00 [28].

A distribuição do PIB estadual por Território de Identidade mostra que, em 2022, cinco territórios concentraram 62% do valor total: Metropolitano de Salvador, com R$ 158,2 bilhões; Bacia do Rio Grande, com R$ 32,2 bilhões; Portal do Sertão, com R$ 28,2 bilhões; Litoral Sul, com R$ 16,5 bilhões; e Sudoeste Baiano, com R$ 14,1 bilhões [33]. O *Mapa 2.5* apresenta uma síntese dessas informações.

Em 2024, observa-se a participação majoritária do setor de comércio e serviços, com 64,3% do valor adicionado, correspondente a R$ 273,7 bilhões. O setor industrial contribuiu com 25,2% (R$ 107 bilhões) e o setor agropecuário, com 10,5% (R$ 44,7 bilhões). Ainda que não tenha havido mudanças significativas na estrutura de participação entre os grandes setores, destaca-se o aumento da contribuição da agropecuária, que passou de 6,8%, em 2019, para 10,5%, em 2024. A *Figura 2.8* apresenta o valor adicionado por grandes setores no período de 2010 a 2024 [32].

Entre 2010 e 2024, a estrutura do setor agropecuário na Bahia passou por mudanças significativas, com crescimento da participação das atividades relacionadas à agricultura e aos serviços correlatos, de 68,2% para 83,5%, enquanto as participações da pecuária, da pesca e aquicultura e da produção florestal apresentaram queda no mesmo período (*Figura 2.9*) [32].

Em termos de valor da produção, a agricultura baiana totalizou R$ 43,3 bilhões em 2023, o que corresponde a 46% do valor da produção regional do Nordeste, estimada em R$ 94,2 bilhões, e a 5,3% do valor nacional. As principais culturas da Região Nordeste incluem soja, milho, cana-de-açúcar, algodão herbáceo e banana. Na Bahia, a área total plantada em 2023 foi de 4,6 milhões de ha, com 4,5 milhões de ha efetivamente colhidos. A soja ocupou a maior parte dessa área, com 42,7% da área colhida, seguida pelo milho,

Among the top ten performers, the progress made by the municipalities of Luís Eduardo Magalhães, Irecê, Brumado, Mucuri, and Pojuca between 2013 and 2023 stands out [31]. Table 2.2 presents the ten municipalities in Bahia with the best performance during this period.

In 2022, Bahia's Gross Domestic Product (GDP) reached R$402.6 billion, representing 4% of the national GDP and 29% of the Northeast region's total, ranking the state as the 7th largest in the country and the 1st in the Northeast in economic terms. The per capita GDP recorded that year was R$28,483.93, placing Bahia 18th among the federative units and first in the region. For the following years, the SEI estimated a GDP of R$428.6 billion in 2023 and R$482.8 billion in 2024, the latter consisting of a value added of R$425.5 billion and net taxes of R$57.3 billion, corresponding to a 2.8% growth compared to the previous year. The estimated per capita GDP for 2024 is R$35,512.00 [32].

In the formal labor market, 2.7 million formal jobs were registered in 2023. Of this total, 1.2 million positions (44.4%) were filled by women, with an average real monthly income of R$1,749.00, while men held 1.5 million positions (55.6%), with an average income of R$1,944.00 [28].

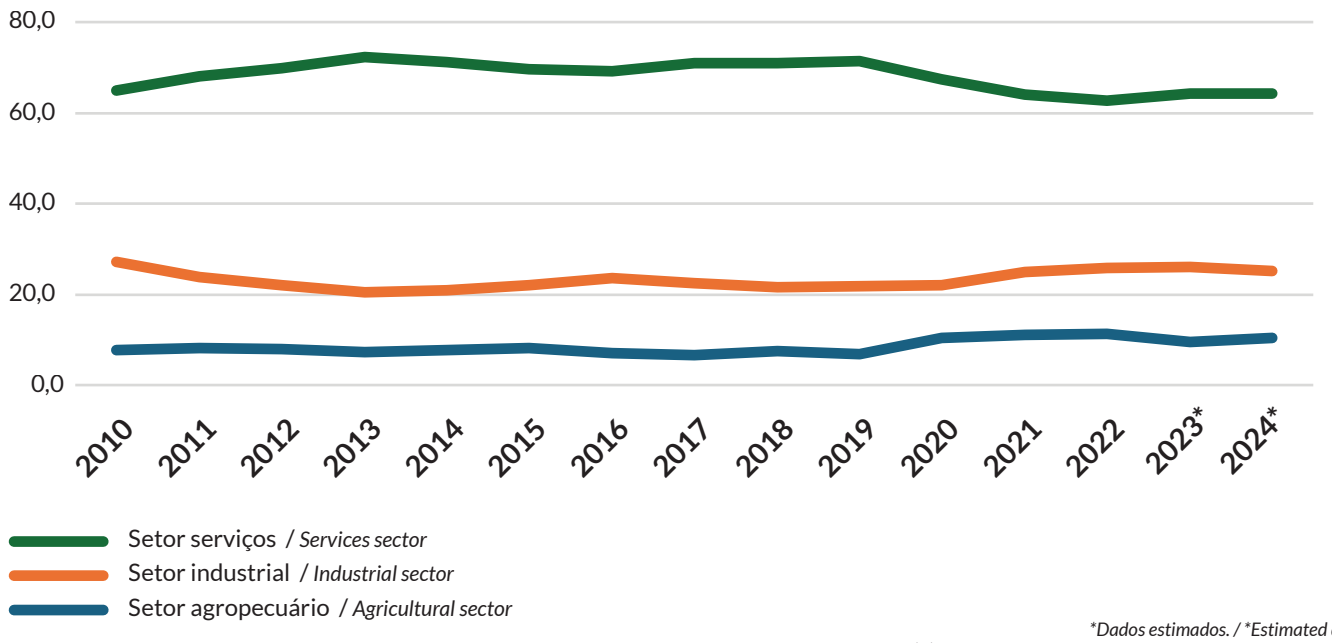
The distribution of the state's GDP by Territory of Identity shows that, in 2022, five territories concentrated 62% of the total value: Metropolitan Salvador, with R$158.2 billion; Rio Grande Basin, with R$32.2 billion; Portal do Sertão, with R$28.2 billion; South Coast, with R$16.5 billion; and Southwest Bahia, with R$14.1 billion [33]. Map 2.5 presents a summary of this information.

In 2024, the trade and services sector accounted for a majority share, representing 64.3% of total value added, corresponding to R$ 273.7 billion. The industrial sector contributed 25.2% (R$107 billion), and the agricultural sector contributed 10.5% (R$44.7 billion). Although there were no significant changes in the structure of participation among the major sectors, the increase in the contribution of agriculture stands out, rising from 6.8% in 2019 to 10.5% in 2024. Figure 2.8 shows the value added by major sectors from 2010 to 2024 [32].

Between 2010 and 2024, the structure of the agricultural sector in Bahia underwent significant changes, with the share of activities related to agriculture and related services increasing from 68.2% to 83.5%, while the shares of livestock, fishing and aquaculture, and forestry production declined over the same period (Figure 2.9) [32].

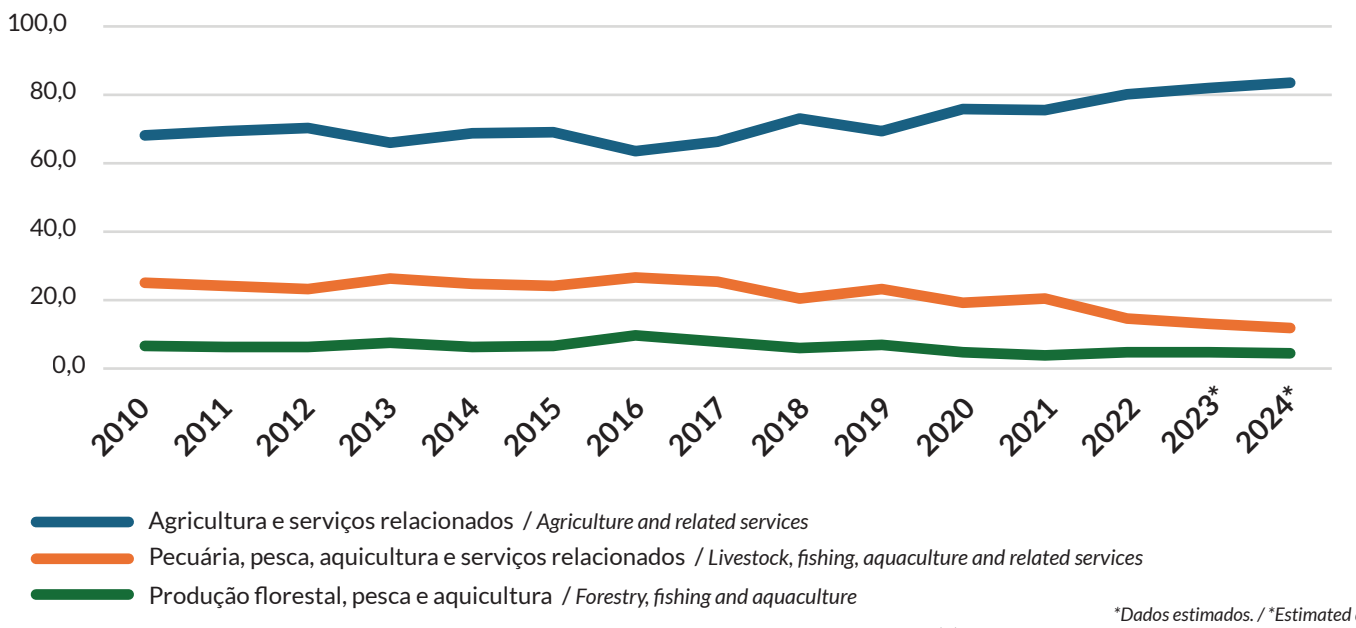
In terms of production value, Bahia's agriculture totalled R$43.3 billion in 2023, corresponding to 46% of the Northeast's regional production value, estimated at R$94.2 billion, and 5.3% of the national value. The main crops in the Northeast region include soybeans, corn, sugarcane, upland cotton, and bananas. In Bahia, the total planted area in 2023 was 4.6 million hectares, with 4.5 million hectares harvested. Soybeans accounted for the largest share of this area, with 42.7% of the harvested area, followed by corn, with 14.5%; cocoa, with 9.5%; beans, with 7.2%; upland cotton, with 7%; coffee, with 2.7%; and cassava, with 2.3% [12]. In terms of production value, the most relevant crops in 2023 were soybeans, with R$17 billion; upland cotton, with R$7.3 billion; corn, with R$2.9 billion; and coffee, with R$2.3 billion.

Figura 2.8 Evolução da participação dos grandes setores econômicos (2010 a 2024).
Figure 2.8 *Evolution of the share of major economic sectors (2010 to 2024).*



*Dados estimados. / *Estimated data.
Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [33]. / *Source: prepared by the authors based on data from [33].*

Figura 2.9 Evolução da participação do setor agropecuário na economia estadual (2010 a 2024).
Figure 2.9 *Evolution of the agricultural sector's share in the state's economy (2010 to 2024).*



*Dados estimados. / *Estimated data.
Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [33]. / *Source: prepared by the authors based on data from [33].*

A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

Bahia's phytogeographic characteristics greatly favor agricultural production. It is the Northeastern state with the greatest surface water availability, which has enabled the development of large irrigated fruit-growing projects, such as in the Submédio São Francisco, especially in the municipality of Juazeiro, and in the Rio de Contas basin, notably the Brumado irrigation perimeter, focused on the production of bananas, coconuts, papayas, guavas, mangos, and passion fruit [10].

In the Cerrado, favorable climate, soil, topography, and land area have enabled large-scale cultivation of soybeans, cotton, and corn, using irrigation, advanced technologies, and mechanized agricultural practices. Sugarcane, in turn, is cultivated at varying production scales in several municipalities in the South, Coastal, Recôncavo, Central, Cerrado, and Northern regions of the state. Municipalities such as Juazeiro, Santa Cruz de Cabrália, Medeiros Neto, Ibirapuã, and Muquém do São Francisco are home to sugar and ethanol plants, in addition to cultivated areas. On the Southern coast, cocoa cultivation is predominant, managed by various types of rural establishments (family-owned, settlements, and employers), with a focus on traditional agroforestry [10]. Banana is the second-largest permanent crop in the state, with a strong presence in the Center-South, South, and São Francisco Valley. Bahia is one of the largest national producers, with 12.6% of Brazilian production in 2023, with the municipality of Bom Jesus da Lapa being the largest banana producer in the country [12].

Regarding added value and municipal production by crop, the municipalities of Formosa do Rio Preto and São Desidério (soybean, corn, and cotton), Luís Eduardo Magalhães (soybean), and Correntina (cotton and corn) stand out in 2023. Cotton and soybean crops had significant shares in national production, with 19.4% and 5.1%, respectively. Fruit farming ranks 5th in production value and represents 8.5% of the national total of fruits [28].

com 14,5%; o cacau, com 9,5%; o feijão, com 7,2%; o algodão herbáceo, com 7%; o café, com 2,7%; e a mandioca, com 2,3% [12]. Em termos de valor da produção, as culturas mais relevantes em 2023 foram a soja, com R$ 17 bilhões; o algodão herbáceo, com R$ 7,3 bilhões; o milho, com R$ 2,9 bilhões; e o café, com R$ 2,3 bilhões.

A Bahia apresenta características fitogeográficas que favorecem amplamente a produção agrícola. É o Estado do Nordeste com maior disponibilidade hídrica superficial, o que viabilizou o desenvolvimento de grandes projetos de fruticultura irrigada, como no Submédio São Francisco, especialmente no município de Juazeiro, e na bacia do Rio de Contas, com destaque para o perímetro de irrigação de Brumado, voltado à produção de banana, coco, mamão, goiaba, manga e maracujá [10].

No Cerrado, as condições favoráveis de clima, solo, topografia e extensão territorial permitiram o cultivo em larga escala de soja, algodão e milho, com uso de irrigação, tecnologias avançadas e práticas agrícolas mecanizadas. A cana-de-açúcar, por sua vez, é cultivada em diferentes escalas de produção em diversos municípios das regiões Sul, Costa Litorânea, Recôncavo, Centro, Cerrado e Norte do Estado. Municípios como Juazeiro, Santa Cruz de Cabrália, Medeiros Neto, Ibirapuã e Muquém do São Francisco abrigam, além das áreas cultivadas, usinas sucroalcooleiras. No litoral Sul, o cultivo do cacau é predominante, sendo conduzido por distintos tipos de estabelecimento rurais (familiar, assentamentos e patronal), com destaque para o sistema agroflorestal tradicional [10]. A banana é a 2ª maior cultura permanente do Estado, com forte presença no Centro-sul, Sul e também no Vale do São Francisco.

Tabela 2.3 Principais Produtos Agrícolas da Bahia em 2023.
Table 2.3 *Main Agricultural Products of Bahia in 2023*

Cultura (em valor) *Crop (in value)*	Área plantada *Planted area*	Área colhida *Harvested area*	Produção (em t) *Production (in t)*	Município produtor *Producing municipality*
Soja/ *Soybean* **R$ 17 bilhões**	1.923.627	1.923.627	7,8 milhões	São Desidério Formosa do Rio Preto Luís Eduardo Magalhães
Milho */ Corn* **R$ 2,9 bilhões**	694.636	651.396	3,1 milhões	São Desidério Correntina Formosa do Rio Preto
Algodão */ Cotton* **R$ 7,3 bilhões**	312.521	312.521	1,4 milhão	São Desidério Formosa do Rio Preto Correntina

Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [28]. */ Source: prepared by the authors based on data from [28].*

Figura 2.10 Principais Rebanhos da Bahia em 2023.
Figure 2.10 *Main Herds in Bahia in 2023.*

% Brasil / *% Brazil*

Galináceos *Poultry*
45 milhões de aves *45 million chickens* — **2,9%**

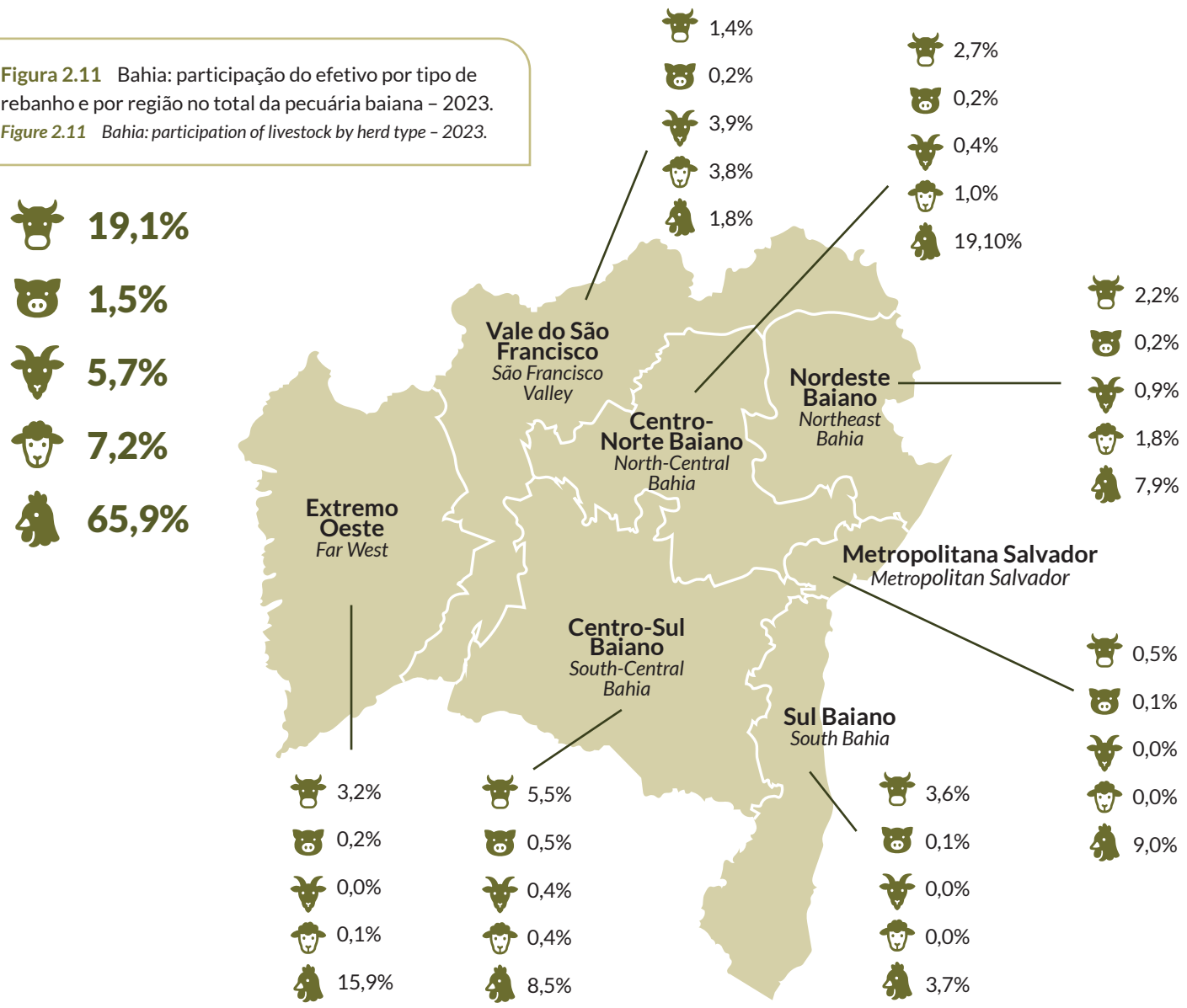
Bovinos *Cattle*
13,3milhões de cabeças *13.3 million heads* — **5,6%**

Ovinos *Sheep*
5 milhões de cabeças *5 million heads* — **23%**

Caprinos *Goats*
4 milhões de cabeças *4 million heads* — **30%**

Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [28].
Source: prepared by the authors based on data from [28].

Figura 2.11 Bahia: participação do efetivo por tipo de rebanho e por região no total da pecuária baiana – 2023.
Figure 2.11 *Bahia: participation of livestock by herd type – 2023.*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [16]. */ Source: prepared by the authors based on data from [16].*

A Bahia é um dos maiores produtores nacionais, com 12,6% da produção brasileira em 2023, sendo o município de Bom Jesus da Lapa o maior produtor de banana do país [12].

Em relação ao valor agregado e à produção municipal por cultura, destacam-se, em 2023, os municípios de Formosa do Rio Preto e São Desidério (soja, milho e algodão), Luís Eduardo Magalhães (soja) e Correntina (algodão e milho). As culturas do algodão e da soja apresentaram participações significativas na produção nacional, com 19,4% e 5,1%, respectivamente. A fruticultura ocupa a 5ª posição em valor de produção e representa 8,5% do total nacional de frutos [28].

Na pecuária, destacam-se os rebanhos caprino, ovino, bovino e de galináceos, que representam, respectivamente, 30,6%, 23%, 5,6% e 2,9% dos rebanhos nacionais [16]. Em 2023, a Bahia contava com 13.290.719 bovinos, 45.812.654 galináceos, 5.005.629 ovinos, 3.955.274 caprinos, 1.016.164 suínos, 463.297 equinos e 23.374 bubalinos. A distribuição espacial da pecuária é ampla no território baiano. Os maiores rebanhos bovinos concentram-se no Centro-Sul, Sul Baiano e Extremo Oeste. Os rebanhos caprino e ovino são expressivos no Vale do São Francisco. Já os galináceos representam 66% da pecuária baiana, com maior concentração no Centro-Norte Baiano e Extremo Oeste.

O setor florestal estadual, com área cultivada de 656.809 ha em 2023, ocupa a1ª posição em plantio no Nordeste, representando 65% da área total da região e contribuindo com 6,4% da área nacional, o que coloca o estado na 7ª posição em nível nacional. Do total da área plantada, 98% (643.094 ha) correspondem ao cultivo de árvores de eucalipto. A produção florestal está distribuída nas regiões Sul, Extremo Sul, Sudoeste, Oeste, Litoral Norte e, mais recentemente, na região de Maracás. Duas grandes empresas são os principais destinos dessa produção: a Veracel Celulose, localizada no município de Eunápolis, e a Suzano, em Mucuri [34].

A diversidade das atividades agropecuárias na Bahia revela padrões territoriais bem definidos, com predominância de determinadas culturas e práticas conforme as regiões do Estado. A pecuária bovina é a principal atividade em grande parte dos municípios, enquanto o cultivo de soja se destaca no Oeste; o café, no Sul e Centro; e as lavouras temporárias, nas regiões Central, Norte e Nordeste. As lavouras permanentes estão mais concentradas na faixa litorânea, e a pesca se desenvolve em municípios do Recôncavo, nas proximidades do Lago de Sobradinho e em áreas localizadas às margens do Rio São Francisco. Essas distribuições podem ser visualizadas no *Mapa 2.6*, que apresenta as atividades agropecuárias predominantes por município [9].

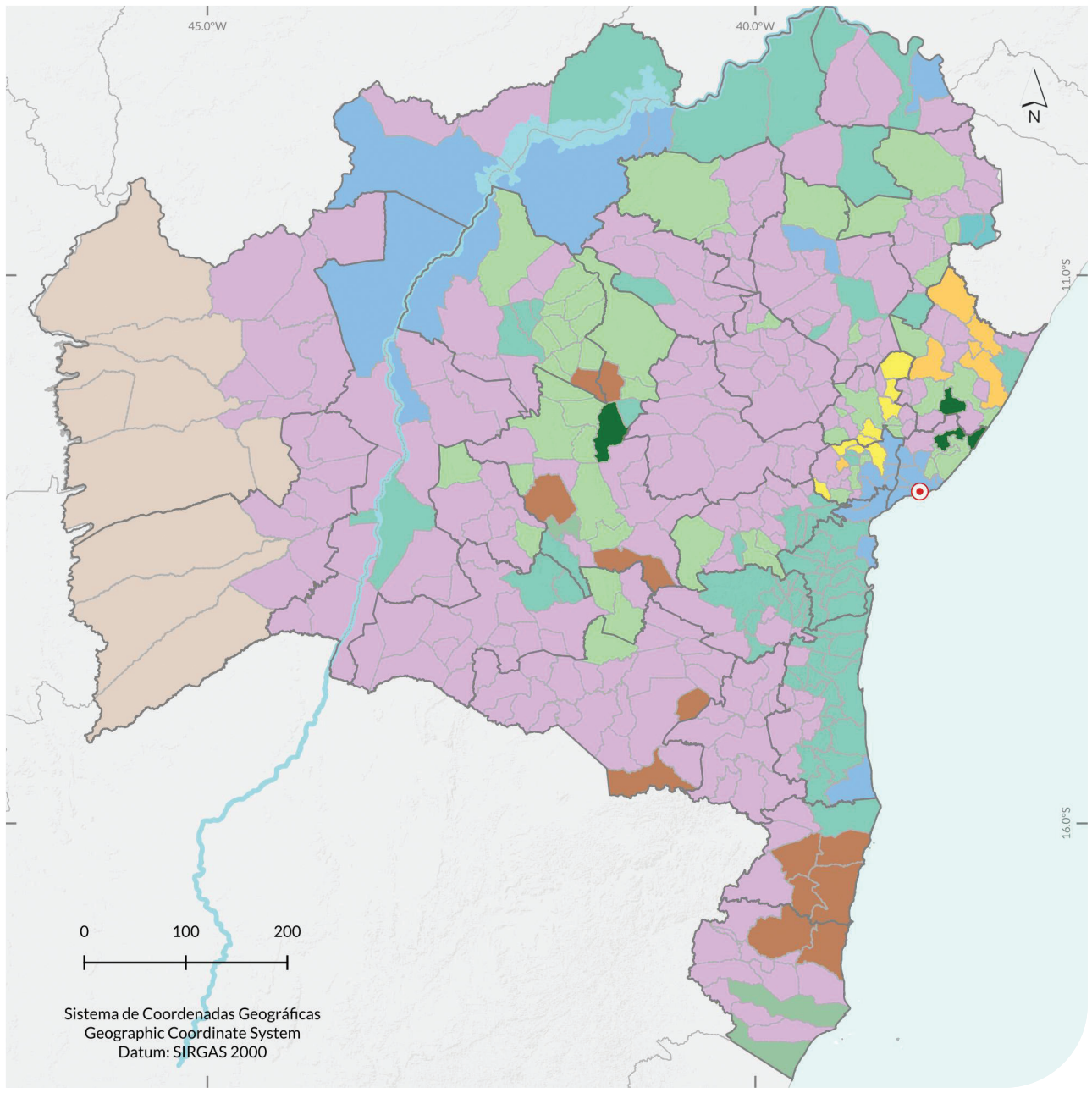
In livestock farming, the goat, cattle, and chicken herds stand out, representing, respectively, 23%, 5.6%, and 2.9% of the national herds [16]. In 2023, Bahia had 13,290,719 cattle, 45,812,654 chickens, 5,005,629 sheep, 3,955,274 goats, 1,016,164 pigs, 463,297 horses, and 23,374 buffaloes. The spatial distribution of livestock farming is wide in the State of Bahia. The largest cattle herds are concentrated in the South-Central region, Southern Bahia, Far West, and North-Central region, both with 3%. Goat and sheep herds are significant in the São Francisco Valley. Poultry herds represent 66% of Bahia's livestock, with the highest concentration in the North-Central Far West (16%).

The forestry sector in the state, with a cultivated area of 656,809 hectares in 2023, ranks 1st in the Northeast region, representing 65% of the region's total area and contributing 6.4% of the national area, placing the state in 7th place nationally. Of the total planted area, 98% (643,094 hectares) corresponds to eucalyptus cultivation. Forestry production is distributed across the South, Far South, Southwest, West, North Coast, and, more recently, the Maracás region. Two large companies are the main destinations for this production: Veracel Celulose, located in the municipality of Eunápolis, and Suzano, in Mucuri [34].

The diversity of agricultural activities in Bahia reveals well-defined territorial patterns, with a predominance of certain crops and practices depending on the state's regions. Cattle ranching is the main activity in most municipalities, while soybean cultivation is prominent in the West; coffee in the South and Center; and temporary crops in the Central, North, and Northeast regions. Permanent crops are more concentrated along the coastal strip, and fishing is developed in municipalities in the Recôncavo region, near Lake Sobradinho, and in areas located along the banks of the São Francisco River. These distributions can be seen in Map 2.6, which presents the predominant agricultural activities by municipality [9].

In the industrial sector, according to SEI estimates for 2024, manufacturing industry activities maintain their leading position, with a 15.1% share. Next in line are activities related to electricity, gas, water, sewage, waste management, and decontamination, with 5.1%. Construction and mineral extraction activities are declining, with shares of 3.8% and 1.1%, respectively [32]. Nationally, chemicals, with the 4th largest production; pulp and paper, also in 4th place; rubber and plastics, in 5th; and petrochemicals, in 7th place, stand out in the manufacturing industries [28].

Mapa 2.6 Atividades agropecuárias predominantes por município.
Map 2.6 *Predominant agricultural activities by municipality.*



Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [18,9]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [18,9].

A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

In the services sector, in 2024, the most relevant activities were public administration, education, healthcare, research and development, defence, and social security, which together accounted for 18.7% of value added. Vehicle trade and maintenance accounted for 12.5%, while real estate activities represented 8.7% [32].

It is also observed that, spatially, public administration, defence, education, and related services predominate in most municipalities. Agricultural activities are concentrated in the Western Region; plant extraction and fishing occur in specific areas of the Central and Northeast; livestock farming is predominant in the South, Southwest, and the Corrente River Basin. Electricity generation, including hydroelectric, wind, and solar power, is present in several municipalities near Lake Sobradinho, on the border with Alagoas, in the Southwest, and in the South. The manufacturing industry, on the other hand, is concentrated in municipalities in the Far South and the Salvador Metropolitan Region [9]. The distribution of these activities by municipality is presented in Map 2.7.

Bahia's socioeconomic and productive characteristics reveal a territory marked by regional contrasts and strong sectoral diversity, with population and economic concentration in certain Territories of Identity. Despite the inequalities evidenced by development and income indicators, the state has made significant progress, such as the increase in the IFDM and the growth of agricultural value added in recent years. Bahia's complex productive structure, which combines established sectors such as agriculture, livestock, manufacturing, and public services, creates favorable conditions for the development of integrated bioenergy policies. By leveraging its territorial potential and overcoming social and economic challenges, Bahia positions itself as a strategic state for expanding sustainable initiatives that articulate regional development, the rational use of natural resources, and the low-carbon energy transition.

2.2.3 BAHIA'S ENERGY OUTLOOK: PRODUCTION, INFRASTRUCTURE, AND RENEWABLE SOURCES

Bahia's energy mix is characterized by a diversity of sources, with a strong presence of renewable energy and a strategic role on the national stage. The state boasts significant production assets for oil, natural gas, biofuels, and electricity, as well as an expanding infrastructure focused on power generation, transmission, and distribution. With significant

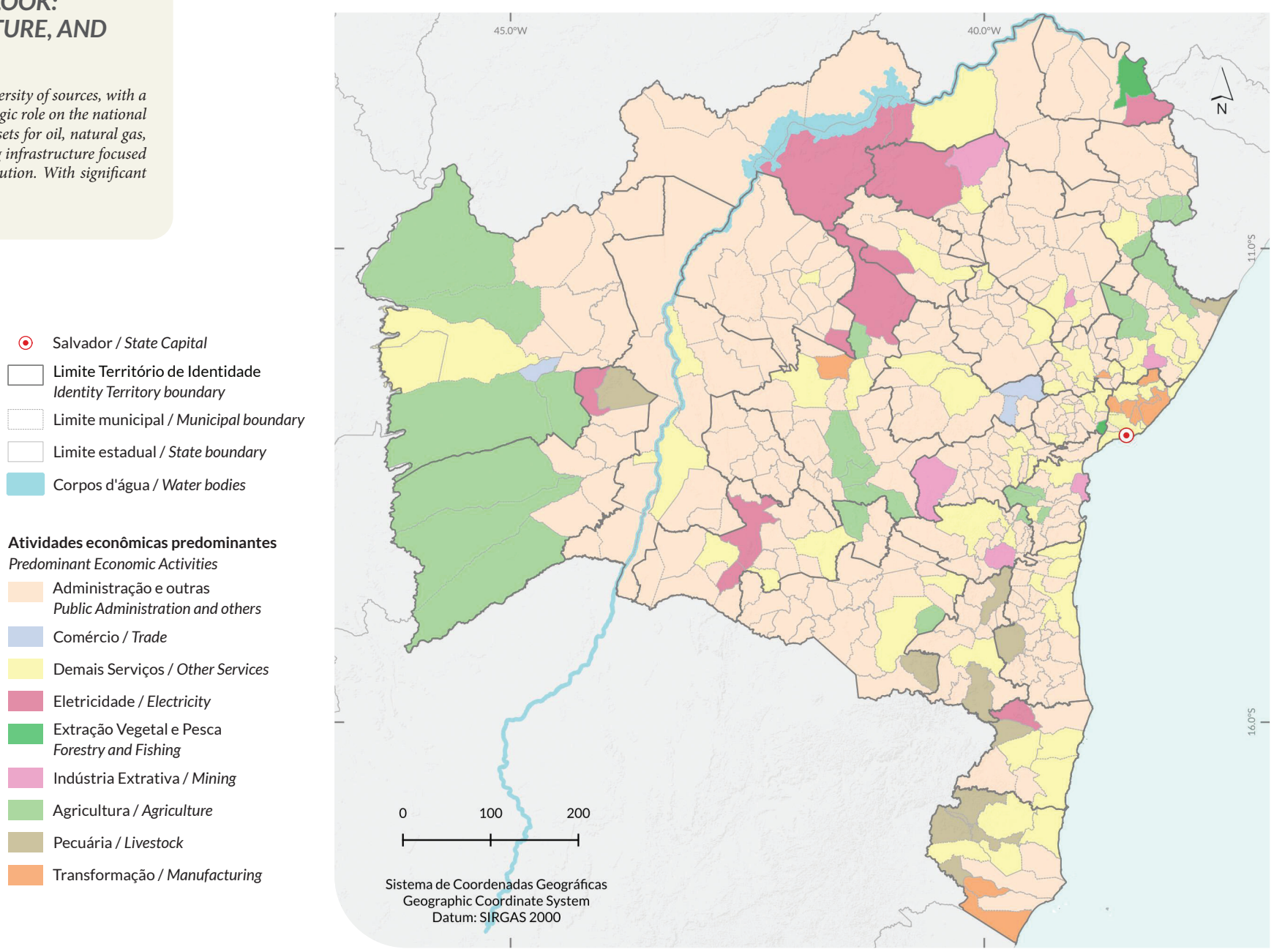
No setor industrial, conforme estimativas da SEI para 2024, as atividades da indústria de transformação mantêm a liderança, com participação de 15,1%. Em seguida, destacam-se as atividades relacionadas à eletricidade, gás, água, esgoto, gestão de resíduos e descontaminação, com 5,1%. As atividades da construção civil e da indústria extrativa mineral apresentam retração, com participações de 3,8% e 1,1%, respectivamente [32]. Em âmbito nacional, destacam-se na indústria de transformação os segmentos de produtos químicos, com a 4ª maior produção; papel e celulose, também em 4ª posição; borracha e plásticos, na 5ª; e produtos petroquímicos, na 7ª [28].

No setor de serviços, em 2024, as atividades de maior relevância foram administração pública, educação, saúde, pesquisa e desenvolvimento, defesa e seguridade social, que juntas representaram 18,7% do valor adicionado. O comércio e a manutenção de veículos responderam por 12,5%, enquanto as atividades imobiliárias representaram 8,7% [32].

Observa-se, ainda, que, em termos espaciais, as atividades de administração pública, defesa, educação e serviços correlatos predominam na maioria dos municípios. As atividades agrícolas concentram-se na Região Oeste; a extração vegetal e a pesca ocorrem em áreas pontuais do Centro e Nordeste; a pecuária é predominante no Sul, no Sudoeste e na Bacia do Rio Corrente. A geração de eletricidade, incluindo hidrelétrica, eólica e solar, está presente em diversos municípios próximos ao Lago de Sobradinho, na fronteira com Alagoas, no Sudoeste e no Sul. Já a indústria de transformação se concentra em municípios do Extremo Sul e da Região Metropolitana de Salvador [9]. A distribuição dessas atividades por município é apresentada no *Mapa 2.7*.

A caracterização socioeconômica e produtiva da Bahia revela um território marcado por contrastes regionais e forte diversidade setorial, com concentração populacional e econômica em determinados Territórios de Identidade. Apesar das desigualdades evidenciadas pelos indicadores de desenvolvimento e renda, o Estado apresenta avanços importantes, como a elevação do *IFDM* e o crescimento do valor agregado agropecuário nos últimos anos. A complexa estrutura produtiva baiana, que combina setores consolidados como agricultura, pecuária, indústria de transformação e serviços públicos, cria condições favoráveis para o desenvolvimento de políticas integradas de bioenergia. A partir da valorização das potencialidades territoriais e da superação dos desafios sociais e econômicos, a Bahia se posiciona como um Estado estratégico para a ampliação de iniciativas sustentáveis que articulem desenvolvimento regional, uso racional de recursos naturais e transição energética de baixo carbono.

Mapa 2.7 Atividades econômicas predominantes por município.
Map 2.7 *Predominant economic activities by municipality.*



Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [9,18]. */ Source: prepared by the authors based on data from [9,18].*

2.2.3 PANORAMA ENERGÉTICO DA BAHIA: PRODUÇÃO, INFRAESTRUTURA E FONTES RENOVÁVEIS

A matriz energética da Bahia é marcada por uma diversidade de fontes, com forte presença de energias renováveis e papel estratégico no cenário nacional. O Estado reúne importantes ativos de produção de petróleo, gás natural, biocombustíveis e eletricidade, além de uma infraestrutura em expansão voltada à geração, transmissão e distribuição de energia. Com elevado potencial para fontes como solar, eólica, hidráulica e biomassa, a Bahia destaca-se como uma das lideranças regionais na transição energética, ampliando sua capacidade instalada e atraindo investimentos em tecnologias limpas. A seguir, apresenta-se um panorama da produção e do consumo de energéticos no Estado, bem como da infraestrutura disponível e dos projetos previstos até 2032.

2.2.3.1 PRODUÇÃO E CONSUMO DE ENERGÉTICOS NO ESTADO

No Balanço Energético Nacional (BEN), na edição de 2025, referente ao ano de 2024, são apresentados dados sobre produção de petróleo, gás natural e álcool; geração de energia elétrica por fonte; capacidade instalada de produção; potencial hidráulico; e consumo no setor residencial. Em relação à biomassa, são apresentados apenas dados de energia elétrica oriunda de bagaço de cana, lenha, lixívia e outras biomassas, além dos biocombustíveis etanol e biodiesel. No consumo de energéticos, a Bahia representa 4,7% da eletricidade consumida pelo setor residencial nacional e 7,3% do GLP nesse mesmo setor [2].

Os dados mais recentes sobre a produção de energéticos na Bahia, referentes ao ano de 2024, indicam que o Estado possui destaque na produção de biodiesel, responsável por cerca de 8% do total nacional [2,35,36]. Em contraste, sua participação na produção de álcool é significativamente menor, representando apenas 1,1% do volume produzido no País. As informações disponíveis sobre biomassa são limitadas, abrangendo apenas os dados de álcool e biodiesel, sendo estes últimos obtidos diretamente do *site* da ANP [36]. Esses dados estão consolidados na *Tabela 2.4*.

O Estado possui três plantas produtoras de biodiesel: uma em Iraquara, com capacidade nominal de 1.300 m³/dia, que utiliza principalmente óleo de soja; outra em Simões Filho, com capacidade de 1.000 m³/dia e uso expressivo de óleo de cozinha usado; e uma terceira em Candeias, com capacidade de 845 m³/dia. A composição das matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel na Bahia segue tendência semelhante à observada no cenário nacional, com predominância do óleo de soja, que responde por mais de 60% do total em ambos os casos. No entanto, destaca-se o maior uso de outras fontes no Estado, especialmente algodão e sebo, cujos percentuais são, respectivamente, 4,9 e 2,9 vezes superiores aos verificados no Brasil [36]. Essas diferenças podem ser visualizadas na *Figura 2.12*, que apresenta a comparação entre as matérias-primas utilizadas nacionalmente e na Bahia.

No que se refere ao etanol, a Bahia conta com cinco unidades de produção localizadas nos municípios de Ibirapuã, Juazeiro, Medeiros Neto, Muquém do São Francisco e Santa Cruz de Cabrália [35]. O setor sucroenergético estadual, responsável por essa produção, é analisado em maior detalhe no *Capítulo 7* deste atlas.

A geração de energia elétrica na Bahia totalizou 59,1 TWh em 2024, sendo 97,2% oriundos de fontes renováveis. Desse total, apenas 4,1% foram provenientes de biomassas diversas, com destaque para o licor negro, que respondeu por 3,7% [2]. A potência instalada do Estado é de 21,2 GW, distribuída em 595 empreendimentos em operação, representando 9,9% da capacidade de geração nacional. A matriz é predominantemente renovável, com 95,8% de participação, contra 4,2% de fontes fósseis [4]. A *Figura 2.13* apresenta a capacidade instalada por fonte, com detalhamento das diferentes formas de biomassa [4]. A Bahia possui apenas uma planta de geração distribuída (GD) a biomassa, movida a bagaço de cana-de-açúcar, com 800 kW de potência instalada.

As usinas movidas a biomassa são pouco representativas na matriz elétrica da Bahia, apenas 2,5% do total instalado no Estado, sete empreendimentos, com 507,8 MW outorgados, 498 MW instalados [37]. Os maiores usinas são de empreendimentos florestais

potential for sources such as solar, wind, hydroelectric, and biomass, Bahia stands out as a regional leader in the energy transition, expanding its installed capacity and attracting investment in clean technologies. Below, it is presented an overview of energy production and consumption in the state, as well as the available infrastructure and projects planned through 2032.

2.2.3.1 ENERGY PRODUCTION AND CONSUMPTION IN THE STATE

The National Energy Balance (BEN), in its 2025 edition, covering the year 2024, presents data on oil, natural gas, and ethanol production; power generation by source; installed production capacity; hydroelectric potential; and consumption in the residential sector. Regarding biomass, only data on electricity from sugarcane bagasse, firewood, black liquor, and other renewable sources, in addition to the ethanol and biodiesel biofuels, are presented. Regarding energy consumption, Bahia accounts for 4.7% of the electricity consumed by the national residential sector and 7.3% of LPG in the same sector [2].

The most recent data on energy production in Bahia, for the year 2024, indicate that the state is a leading producer of biodiesel, accounting for approximately 8% of the national total [2,35,36]. In contrast, its share of ethanol production is significantly smaller, representing only 1.1% of the volume produced in the country. Available information on biomass is limited, covering only ethanol and biodiesel data, the latter obtained directly from the ANP website [36]. These data are consolidated in Table 2.4.

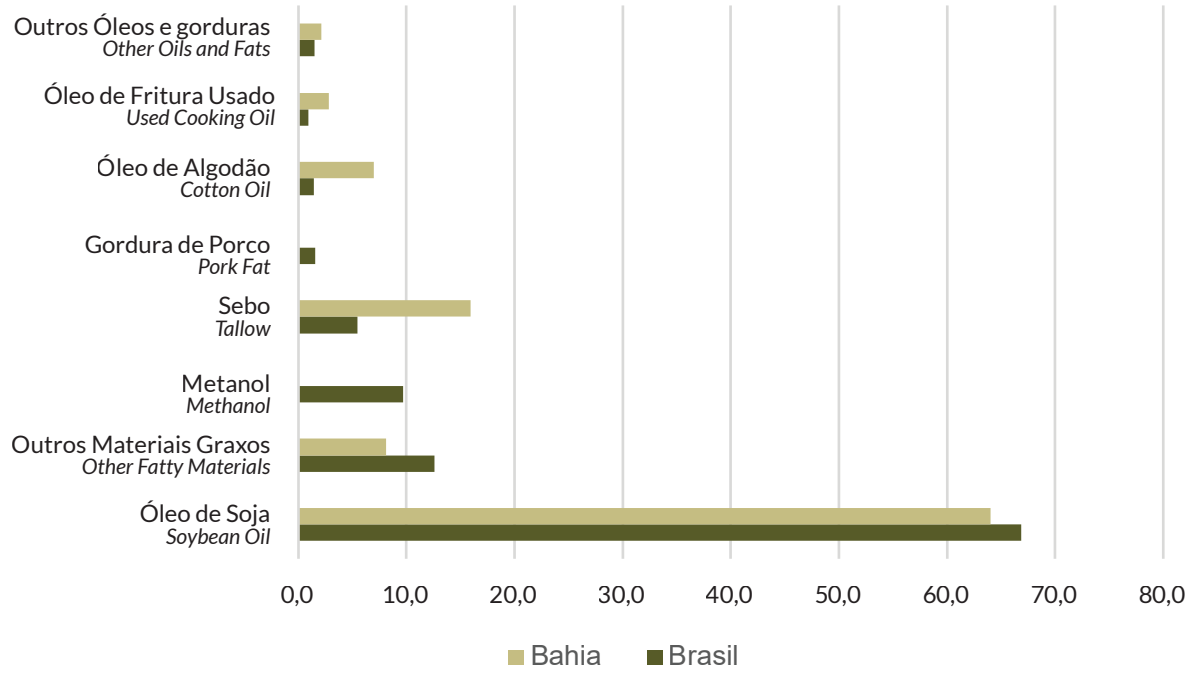
The state has three biodiesel production plants: one in Iraquara, with a nominal capacity of 1,300 m³/day, which primarily uses soybean oil; another in Simões Filho, with a capacity of 1,000 m³/day and significant use of used cooking oil; and a third in Candeias, with a capacity of 845 m³/day. The composition of the feedstocks used in biodiesel production in Bahia follows a similar trend to that observed nationally, with soybean oil predominating, accounting for over 60% of the total in both cases. However, the greater use of other sources in the state stands out, especially cotton and tallow, whose percentages are, respectively, 4.9 and 2.9 times higher than those observed in Brazil [36]. These differences can be seen in Figure 2.12, which presents a comparison between the feedstocks used nationally and in Bahia.

Tabela 2.4 Produção de energéticos – 2024
Table 2.4 *Energy production – 2024*

Fontes *Sources*	Produção *Production*	Unidade *Unit*	% Bahia/Brasil *% Bahia/Brazil*
Petróleo *Oil (Petroleum)*	1.145,4	10^3m^3	0,6%
Gás Natural *Natural Gas*	1.147,8	10^3m^3	2,0%
Energia Elétrica *Electicity*	59.106,0	GWh	7,9%
Álcool *Ethanol*	363,1	10^3m^3	1,0%
Biodiesel	715,2	10^3m^3	7,9%

Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [30,2,35,36].
Source: prepared by the authors based on data from [30,2,35,36].

Figura 2.12 Comparativo das matérias-primas para biodiesel no Brasil e na Bahia (%).
Figure 2.12 *Comparison of biodiesel feedstocks in Brazil and Bahia (%).*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [36]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [36].

A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

Regarding ethanol, Bahia has five production units located in the municipalities of Ibirapuã, Juazeiro, Medeiros Neto, Muquém do São Francisco, and Santa Cruz de Cabrália [35]. The state's sugarcane sector, responsible for this production, is analyzed in greater detail in Chapter 7 of this atlas.

Power generation in Bahia totalled 59.1 TWh in 2024, with 97.2% coming from renewable sources. Of this total, only 4.1% came from various biomasses, with black liquor accounting for 3.7% [2]. The state's installed capacity is 21.2 GW, distributed among 595 operating projects, representing 9.9% of the national generation capacity. The mix is predominantly renewable, with a 95.8% share, compared to 4.2% from fossil fuels [4]. Figure 2.13 shows the installed capacity by source, detailing the different forms of biomass [4]. Bahia has only one biomass-powered distributed generation (DG) plant, powered by sugarcane bagasse, with 800 kW of installed capacity.

Biomass-powered plants are not very representative in Bahia's electricity mix, accounting for only 2.5% of the total installed capacity in the state, seven projects, with 507.8 MW granted, and 498 MW installed [37]. The largest plants are from forestry projects that use black liquor as fuel and account for 88.5% of the installed capacity. Plants powered by sugarcane bagasse, biogas-MSW, and forest residues account for 4.3%, 3.8%, and 3.3%, respectively [4]. Table 2.5 presents data on installed capacity, fuel used, and location of the projects.

According to the Monitoring Report on the Expansion of ElectricityPower Generation Supply [37], Bahia's sub transmission network operates at voltages of 138, 69, and 34.5 kV, serving more than 6.7 million consumer units distributed throughout the 415 municipalities covered by the Bahia State Electricity Company's concession. The state's electrical infrastructure consists of 11,787 km of high-voltage feeders (69 kV and 138 kV) and 56,395 km of medium-voltage (34.5 kV) grid. Power distribution is organized by operational regions, which include the Salvador Metropolitan Region, the North/Northeast Region, and the South/Southeast/Central-West Region [39]. The system's coverage and layout can be seen in Map 2.8.

The electricity transmission infrastructure consists of 7,484 km of 230 kV lines and 6,677 km of 500 kV lines. However, there is less high-voltage power line coverage in the northwest of the state, especially in areas near the borders with Maranhão, Tocantins, and Piauí. To expand the power supply in this region, an additional 5,266 km of 500 kV lines and 1,313 km of 230 kV lines are planned for installation in the coming years [40].

Bahia's hydroelectric potential is 12,205 MW, representing 5.0% of the national potential, with 47% of this total already in operation, compared to 44% nationwide [41]. The Bahia Wind Atlas estimates a potential for power generation of 766.5 TWh/year for speeds above 7 m/s, at a height of 150 m, with an installable capacity of 195.2 GW [7]. The

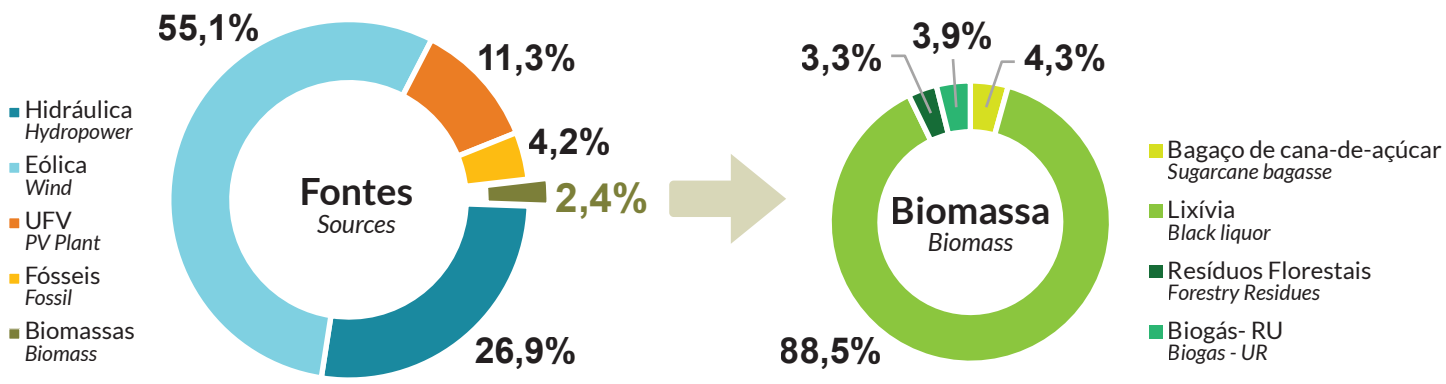
usam o licor negro como combustível e participam com 88,5 % da capacidade instalada. As usinas movidas a bagaço de cana, biogás-RSU e resíduos florestais participam com 4,3%, 3,8 % e 3,3%, respectivamente [4]. A *Tabela 2.5* apresenta os dados de potência instalada, combustível utilizado e localização desses empreendimentos.

De acordo com o *Relatório de Acompanhamento da Expansão da Oferta de Geração de Energia Elétrica* [37], espera-se que, até 2032, a Bahia receba 32.941 MW adicionais de capacidade instalada. Desse total, 8.003 MW serão de usinas eólicas, 24.796 MW de solar fotovoltaica e apenas 125 MW de empreendimentos a biomassa (*Tabela 2.6).* Os investimentos previstos até 2029 somam R$ 15,99 bilhões, abrangendo obras de expansão, melhorias e renovação. Entre 2025 e 2029, os investimentos em expansão, estimados em R$ 12,85 bilhões, representarão 80,4% do total previsto [38]. Com os dados deste atlas, espera-se que esse último valor seja substancialmente ampliado nos próximos anos.

A rede de subtransmissão da Bahia opera em tensões de 138, 69 e 34,5 kV, atendendo a mais de 6,7 milhões de unidades consumidoras distribuídas pelos 415 municípios abrangidos pela concessão da Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia. A infraestrutura elétrica do estado é composta por 11.787 km de alimentadores de alta tensão (69 kV e 138 kV) e 56.395 km de rede de média tensão (34,5 kV). A distribuição de energia está organizada por regiões operacionais, que incluem a Metropolitana de Salvador, Norte/Nordeste e Sul/Sudeste/Centro-Oeste [39]. A abrangência e o traçado do sistema podem ser visualizados no *Mapa 2.8.*

A infraestrutura de transmissão de energia elétrica é composta por 7.484 km de linhas em 230 kV e 6.677 km em 500 kV. No entanto, observa-se uma menor cobertura de linhas de alta tensão no Noroeste do Estado, especialmente nas áreas próximas às divisas com Maranhão, Tocantins e Piauí. Para ampliar o suprimento energético nessa região, estão previstas a instalação de 5.266 km adicionais de linhas em 500 kV e 1.313 km em 230 kV nos próximos anos [40].

Figura 2.13 Distribuição da capacidade instalada de geração de energia elétrica na Bahia por tipo de fonte, com detalhamento das biomassas (%).
Figure 2.13 *Distribution of installed power generation capacity in Bahia by source type, detailing the biomass (%).*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [4]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [4].

Tabela 2.5 Empreendimentos de geração elétrica a biomassa na Bahia: tipo, combustível final, potência outorgada e município de instalação.
Table 2.5 *Biomass power generation projects in Bahia: type, final fuel, granted capacity, and municipality of installation.*

Empreendimento *Project*	Tipo *Type*	Combustível Final *Final Fuel*	Potência Outorgada *Granted Capacity (MW)*	Município *Municipality*
Agrovale	Agroindústria / *Agribusiness*	Bagaço de Cana / *Sugarcane Bagasse*	16,0	Juazeiro
Bahia Etanol Energia Renovável	Agroindústria / *Agribusiness*	Bagaço de Cana / *Sugarcane Bagasse*	6,0	Ibirapuã
Bahia Pulp	Floresta / *Forestry*	Licor Negro / *Black Liquor*	108,6	Camaçari
ERB Candeias	Floresta / *Forestry*	Resíduos Florestais / *Forest Waste*	16,8	Candeias
Salvador	RSU / *MSW*	Biogás- RU / *Biogas- UR*	19,3	Salvador
Suzano Mucuri	Floresta / *Forestry*	Licor Negro / *Black Liquor*	214,0	Mucuri
Veracel	Floresta / *Forestry*	Licor Negro / *Black Liquor*	126,6	Eunápolis

Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [4]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [4].

Tabela 2.6 Expansão da oferta de energia elétrica por fonte, em MW (2025-2032).
Table 2.6 *Expansion of power energy supply by source, in MW (2025-2032).*

Origem *Origin*	2025	2026	2027	2029	2030	2031	2032	No projection	Total
Biomassa / *Biomass*	23				52	50			125
Eólica / *Wind*	212	35	336		5.854	1.325	242	0	8.003
Hídrica / *Hydro*								17	17
Solar	321	774	223	1.251	19.610	2.003		615	24.796
Total	**555**	**809**	**559**	**1.251**	**25.516**	**3.378**	**242**	**632**	**32.941**

Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [37]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [37].

45.0°W
40.0°W
11.0°S
16.0°S
N

Casa Nova
Juazeiro
Macururé
Remanso
Sento Sé
Senhor do Bonfim
Xique-Xique
Tucano
Araci
Miguel Calmon
Barreiras
Oliveira dos Brejinhos
Terra Nova
Paratinga
Mucugê
Paramirim
Riacho de Santana
Barra da Estiva
Brumado
Ilhéus
Licínio de Almeida
Vitória da Conquista
Itapetinga
Eunápolis
Mederios Neto

Mapa 2.8 Sistema de subtransmissão de energia elétrica da Bahia, por nível de tensão e abrangência regional da distribuidora estadual.
Map 2.8 *Bahia's electricity subtransmission system, by voltage level and regional coverage of the state distributor.*

Salvador / *State Capital*
Limite municipal / *Municipal boundary*
Limite estadual / *State boundary*
Corpos d'água / *Water bodies*

Sistema elétrico / *Electricity System*

Subestação de média tensão (34,5 kV)
Medium-Voltage Substation (34.5 kV)
Subestação de alta tensão (69 kV e 138 kV)
High-Voltage Substation (69 kV and 138 kV)

Linhas de Transmissão / *Transmission Lines*
230 kV
500 kV

Distribuição em alta tensão
High-Voltage Distribution Network
69 kV
138 kV

0 100 200

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [39,40]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [39,40].

A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

potential for centralized photovoltaic generation, for irradiation above 2,200 kWh/m²/year and crystalline silicon technology, is estimated at 101.0 GW and 172.4 TWh/year, and could reach five times this value for irradiation between 2,100 and 2,200 kWh/m²/year [42]. This atlas seeks to fill the gap in the potential of bioenergy in Bahia, standing out for offering, in most cases, firm capacity, which helps to mitigate the intermittency of wind and solar sources.

Bahia's existing gas pipeline network includes the facilities of Transportadora Associada de Gás S.A. (TAG) and Companhia de Gás da Bahia (Bahiagás), as well as integration stations between these two networks. TAG's supply infrastructure consists of two gas pipelines that cross the state in a north-south direction: the Cacimbas-Catu Gas Pipeline (Gascac) and the Catu-Itaporanga Gas Pipeline (Gaseb), which were part of the former Southeast-Northeast Gas Pipeline (Gasene) system. Together, these pipelines total 900 km in length and have the capacity to transport approximately 20 million m³ per day [43] In Bahia, both lines have compression stations in Prado (Gascac) and Catu 1 (Gasdeb), as well as several delivery points. In Gascac, the points in Mucuri, Eunápolis, Veracel, Itabuna, Caboto, Cexis, Camaçari-Manati, Aratu-Manati, and Candeias-Manati stand out; in Gaseb, the points are located in Araçás, Fazenda Bálsamo, and Fazenda Alvorada [44].

Bahiagás, the state-owned natural gas distributor, currently serves 22 municipalities, with expansion underway to reach 34 municipalities. Its portfolio includes Bahia's main industries and over 88,000 consumers. The pipeline network totals 1,314 km and recorded an average daily distribution of 4.8 million m³ in 2024 [44]. Among the company's main pipelines, the Itabuna-Ilhéus Distribution Pipeline and the Gas Sudoeste project, still under construction, stand out; upon completion, the latter will be 306 km long, connecting the municipalities of Ipiaú and Brumado, passing through Jequié, Maracás, and ten other municipalities in the region. Bahiagás has a broad and diverse portfolio of suppliers, with active contracts with ten different companies, including offshore and onshore suppliers [46].

The company has also invested in diversifying its supply chain through biomethane, using waste or specific crops, in line with the objectives of this atlas. In this sense, Bahiagás' Expansion Plan aims to serve 68 municipalities over the planning horizon. It also includes so-called "Local Networks" in municipalities not connected to the main grid but with potential for service via CNG/LNG, and by means of projects involving local biomethane production. In 2022, it launched its first public call for biomethane procurement, receiving two proposals from the consortium formed by Agrovale and Geo Bio Gas&Carbon. The biogas plant located in Juazeiro is expected to begin operations by the end of 2025. In 2024, the distributor promoted the second coordinated public call for the acquisition of biomethane and is in negotiations with the Water and Sanitation Company of Bahia (Embasa) for the implementation of a pilot project aimed at the production of biomethane from sanitary waste [44].

Bahiagás' investments in 2024 totalled R$203.64 million, accumulating R$966.8 million over the last decade, a period in which its network expanded from 816 km to the current 1,314 km. According to Bahiagás' Multi-Year Investment Plan (2025–2029), investments of approximately R$1,385.08 million are planned, with the goal of adding another 816.65 km to the existing network, totalling 2,038 km by 2029. For 2025, R$222.08 million in investments are planned, with emphasis on the start of construction on the 3rd section of the Southwest Gas Project, which will connect Maracás to Brumado [44].

The installed oil refining capacity in Bahia is 60,637 m³/day, representing 15.7% of the national total. The state's natural gas processing plant capacity is 8,900 m³/day, representing 9.0% of the national capacity. Regarding proven reserves, Bahia currently holds less than 0.7% of the country's oil reserves and 2.8% of its natural gas reserves [41].

2.2.4. GREENHOUSE GAS EMISSIONS PROFILE AND THE ROLE OF BIOENERGY IN MITIGATION

Globally, considering all greenhouse gases (GHG), data from the United Nations Environment Program [48] indicate a total of 57.1 Gt-CO_2e in 2023, distributed among five major sectors: energy, industrial processes, agriculture, residues and land use, land use change and forestry (LULUCF). Each sector is subdivided into several segments, with emphasis on power generation and road transportation.

O potencial hidráulico da Bahia é de 12.205 MW, representando 5,0% do potencial nacional, sendo que 47% desse total já está em operação, em comparação com os 44% em nível nacional [41]. O Atlas Eólico da Bahia estima um potencial de energia elétrica a ser gerada de 766,5 TWh/ano para velocidades acima de 7 m/s, a 150 m de altura, com potência instalável de 195,2 GW [7]. Já o potencial de geração fotovoltaica centralizada, para irradiação acima de 2.200 kWh/m²/ano e tecnologia de silício cristalino, é estimado em 101,0 GW e 172,4 TWh/ano, podendo chegar a cinco vezes esse valor para irradiações entre 2.100 e 2.200 kWh/m²/ano [42]. Este atlas busca suprir a lacuna sobre o potencial da bioenergia na Bahia, destacando-se por oferecer, na maioria dos casos, capacidade firme, o que contribui para mitigar a intermitência das fontes eólica e solar.

A rede de gasodutos existente na Bahia inclui as instalações da Transportadora Associada de Gás S.A. (TAG) e da Companhia de Gás da Bahia (Bahiagás), além das estações de integração entre essas duas redes. A infraestrutura de suprimento da TAG é formada por dois gasodutos que atravessam o Estado no sentido norte-sul: o Gasoduto Cacimbas-Catu (Gascac) e o Gasoduto Catu-Itaporanga (Gaseb), que integravam o antigo sistema Gasoduto Sudeste-Nordeste (Gasene). Juntos, esses dutos somam 900 km de extensão e têm capacidade para transportar, aproximadamente, 20 milhões de m³ por dia [43] No território baiano, as duas linhas contam com estações de compressão em Prado (Gascac) e Catu 1 (Gasdeb), além de diversos pontos de entrega. No Gascac, destacam-se os pontos em Mucuri, Eunápolis, Veracel, Itabuna, Caboto, Cexis, Camaçari-Manati, Aratu-Manati e Candeias-Manati; já no Gaseb, os pontos estão localizados em Araçás, Fazenda Bálsamo e Fazenda Alvorada [44].

A Bahiagás, distribuidora estadual de gás natural, atende atualmente a 22 municípios, com expansão em andamento para o total de 34 municípios. Mantém em sua carteira as principais indústrias da Bahia, além de mais de 88 mil consumidores. A rede canalizada soma 1.314 km e registrou uma distribuição média diária de 4,8 milhões de m³ em 2024 [44]. Entre os principais dutos da companhia, destacam-se o Duto de Distribuição Itabuna-Ilhéus e o projeto Gás Sudoeste, ainda em fase de instalação, que, ao ser concluído, terá 306 km de extensão, conectando os municípios de Ipiaú e Brumado, passando por Jequié, Maracás e outros dez municípios da região. A Bahiagás possui um portfólio amplo e diversificado de supridores, com contratos ativos com dez empresas diferentes, incluindo fornecedores *offshore e onshore* [46].

A empresa também tem investido na diversificação da matriz de suprimento por meio do biometano, a partir de resíduos ou cultivos específicos, alinhando-se aos objetivos deste atlas. Nesse sentido, o Plano de Expansão da Bahiagás tem perspectiva para atender a 68 municípios ao longo do horizonte de planejamento. Prevê ainda as chamadas "Redes Locais" em municípios não conectados à malha principal, porém com possibilidades de atendimento via modais GNC/GNL, e através de projetos com produção de Biometano localmente. Em 2022, lançou sua primeira chamada pública para aquisição de biometano, tendo recebido duas propostas do consórcio formado pela Agrovale e Geo Bio Gas&Carbon. A planta de biogás localizada em Juazeiro tem previsão de início de operação até o final de 2025. Em 2024, a distribuidora promoveu a segunda chamada pública coordenada para a aquisição de biometano e mantém tratativas com a Empresa Baiana de Águas e Saneamento (Embasa) para a implementação de um projeto piloto voltado à produção de biometano a partir de resíduos sanitários [44].

Os investimentos da Bahiagás em 2024 totalizaram R$ 203,64 milhões, acumulando R$ 966,8 milhões ao longo da última década, período em que sua rede se expandiu de 816 km para os atuais 1.314 km. Segundo o *Plano Plurianual de Investimentos da Bahiagás (2025–2029),* estão previstos aportes da ordem de R$ 1.385,08 milhões, com a meta de acrescentar mais 816,65 km à malha existente, totalizando 2.038 km até 2029. Para o ano de 2025, estão previstos R$ 222,08 milhões em investimentos, com destaque para o início das obras do 3º trecho do Projeto Gás Sudoeste, que ligará Maracás a Brumado [44].

A capacidade instalada de refino de petróleo na Bahia é de 60.637 m³/dia, o que representa 15,7% do total nacional. Já a capacidade das plantas de processamento de gás natural no estado é de 8.900 mil m³/dia, correspondendo a 9,0% da capacidade nacional. Em relação às reservas provadas, a Bahia apresenta atualmente menos de 0,7% das reservas de petróleo do País e 2,8% das reservas de gás natural [41].

2.2.4 PERFIL DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E O PAPEL DA BIOENERGIA NA MITIGAÇÃO

Globalmente, considerando todos os gases de efeito estufa (GEE), os dados do *Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente* [48] apontam um total de 57,1 GtCO_2e em 2023, distribuídos entre cinco grandes setores: energia, processos industriais, agropecuária, resíduos e uso da terra, mudança do uso da terra e florestas (*LULUCF*, na sigla em inglês). Cada setor se subdivide em diversos segmentos, com destaque para os de geração de energia elétrica e transporte rodoviário.

No Brasil, as emissões de GGE totalizaram 2,3 GtCO_2e em 2023. Destaca-se o setor de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas, responsável por 46,25% das emissões nacionais nesse ano, embora tenha perdido expressão à medida que as emissões desse setor foram reduzidas em 27% desde 1990. Em sentido oposto, os segmentos de geração de energia e transportes cresceram 213% e 162,5%, respectivamente, resultando em um crescimento de 119% no setor energético, que passou a representar 18,3% das emissões nacionais. O setor de resíduos também apresentou crescimento expressivo, com aumento de 205,3%, impulsionado pelos segmentos de proteína animal e de papel e celulose.

No Estado da Bahia, as emissões de GEE atingiram 135,0 Mt-CO_2e em 2023, o que representa 5,9% do total nacional. O perfil de emissões estaduais é semelhante ao do nacional, com destaque para o setor de Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas, responsável por 55,5% do total. Dentro desse setor, o segmento de resíduos florestais responde por 2,4% das emissões do Estado. O setor agropecuário representa 24,0% das emissões, sendo que os segmentos de manejo de resíduos animais e queima de resíduos agrícolas somam 1,0%. Em seguida vem o setor ener-

Atlas Bioenergia Bahia

45.0°W

40.0°W

11.0°S

16.0°S

N

Sátiro Dias

Camacari

Itabuna

Cacimbas-Catu (GASCAC)

Eunápolis

Mucuri

Mapa 2.9 Infraestrutura de transporte e distribuição de gás natural na Bahia.
Map 2.9 Natural gas transportation and distribution infrastructure in Bahia.

- Salvador / *State Capital*
- Limite estadual / *State boundary*
- Corpos d'água / *Water bodies*

Infraestrutura de Gás Natural / *Natural Gas Infrastructure*

- Terminais GNL / *LNG Terminals*
- Pontos de entrega de gás natural / *Natural Gas Delivery Points*
- Polos de processamento de gás natural / *Natural Gas Processing Plants*
- Estações de compressão / *Gas Compressor Stations*
- Dutos de escoamento / *Flowlines*
- Gasodutos de distribuição / *Distribution Pipelines*
- Gasodutos de transporte / *Transmission Pipelines*

0 100 200

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [45,9]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [45,9].

A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

In Brazil, GHG emissions totalled 2.3 $GtCO_2e$ in 2023 [47]. The Land Use, Land Use Change, and Forestry (LULUCF) sector stands out, accounting for 46.25% of national emissions that year, although it has lost significance as emissions from this sector have been reduced by 27% since 1990. Conversely, the power generation and transportation segments grew 213% and 162.5%, respectively, resulting in a 119% increase in the energy sector, which now represents 18.3% of national emissions. The waste and residues sector also showed significant growth, with a 205.3% increase, driven by the animal protein and pulp and paper segments.

In the State of Bahia, GHG emissions reached 135.0 $MtCO_2e$ in 2023, representing 5.9% of the national [47] total. The state's emissions profile is similar to that of the national average, with emphasis on the Land Use, Land Use Change, and Forestry sector, which accounts for 55.5% of the total. Within this sector, the forestry waste segment accounts for 2.4% of the state's emissions. The agricultural sector accounts for 24.0% of emissions, with the animal waste management and agricultural residues burning segments accounting for 1.0%. Next comes the energy sector, with 15.5%. The main difference compared to the national scenario is in the industrial processes and waste and residues sectors. In Brazil, the industrial sector ranks fourth, followed by the waste sector. In Bahia, these positions are reversed, with the waste sector ranking fourth, with 4.3%, of which the municipal solid waste and effluent segments account for 4%. Figure 2.14 presents a comparative overview of global, national and state emissions by sector and segment, highlighting those that can have their emissions mitigated by means of the use of bioenergy, such as the electricity, transportation, agricultural and urban waste, and forestry residues segments [47].

In the specific case of Bahia, the analysis shows that a significant portion of state emissions is concentrated in sectors and segments that present concrete opportunities for energy recovery from waste and residues. This scenario reinforces the importance of regional strategies aimed at replacing fossil fuels and more efficient use of existing biomass, considering the state's productive, territorial, and environmental specificities [47].

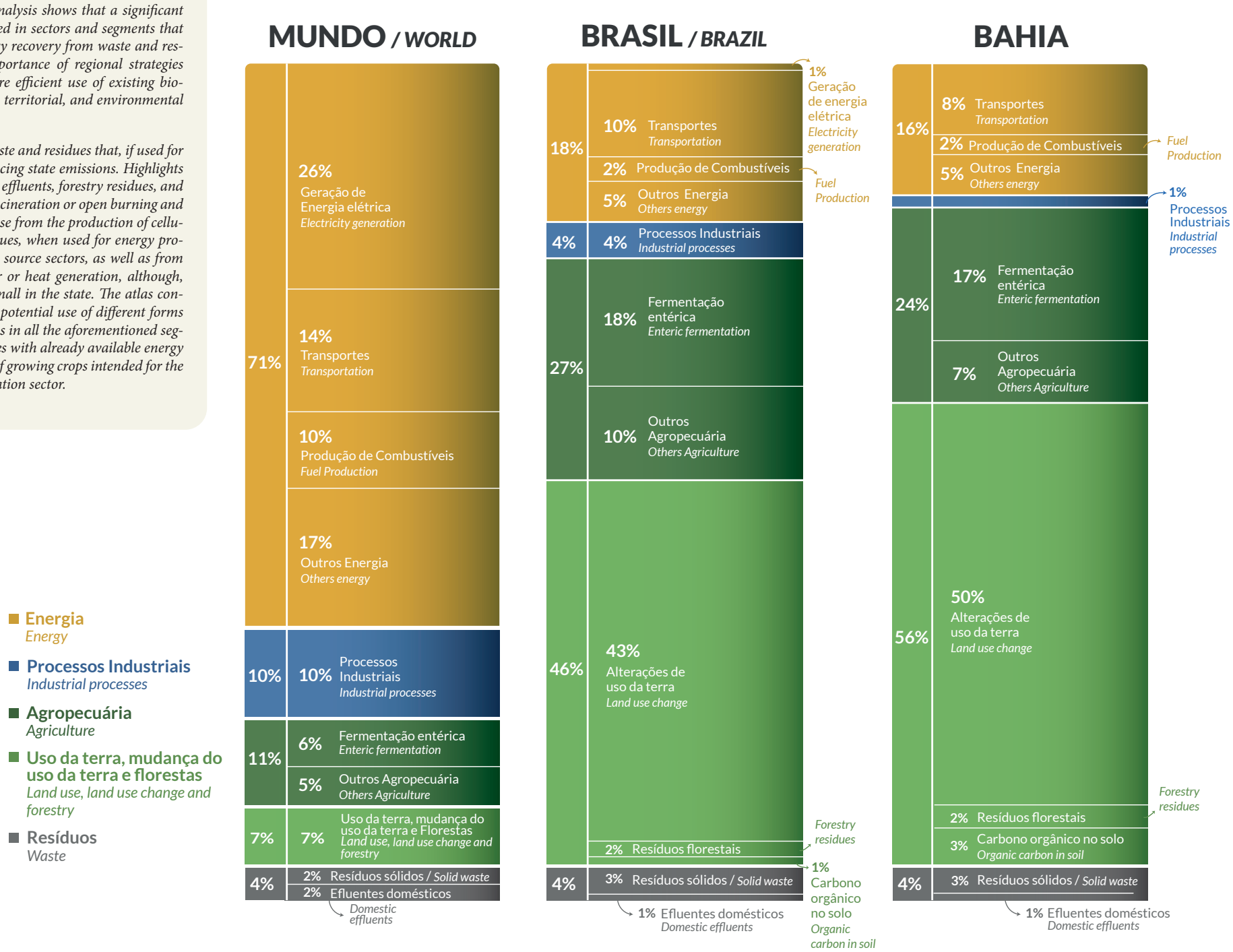
Thus, this atlas presents data on waste and residues that, if used for energy purposes, can contribute to reducing state emissions. Highlights include municipal solid waste, domestic effluents, forestry residues, and animal waste management, as well as incineration or open burning and industrial liquid effluents, including those from the production of cellulose and animal protein. All these residues, when used for energy production, can reduce emissions from the source sectors, as well as from activities that use fossil fuels for power or heat generation, although, overall, these emissions are relatively small in the state. The atlas contributes significantly to quantifying the potential use of different forms of biomass capable of reducing emissions in all the aforementioned segments, considering only biomass residues with already available energy potential, that is, excluding the impact of growing crops intended for the production of biofuels for the transportation sector.

gético, com 15,5%. A principal diferença em relação ao cenário nacional está nos setores de processos industriais e resíduos. No Brasil, o setor industrial ocupa a quarta posição, seguido pelo de resíduos. Já na Bahia, essas posições se invertem, com o setor de resíduos ocupando a 4ª posição, com 4,3%, dos quais os segmentos de resíduos sólidos urbanos e efluentes respondem por 4%. A *Figura 2.14* apresenta o panorama comparativo das emissões globais, nacionais e estaduais por setor e segmento, destacando aqueles que podem ter suas emissões mitigadas por meio do uso de bioenergia, como os segmentos de energia elétrica, transportes, resíduos agropecuários e urbanos, além de resíduos florestais [47].

No caso específico da Bahia, a análise evidencia que parte expressiva das emissões estaduais está concentrada em setores e segmentos que apresentam oportunidades concretas para o aproveitamento energético de resíduos. Esse cenário reforça a importância de estratégias regionais voltadas à substituição de fontes fósseis e ao uso mais eficiente da biomassa já disponível, considerando as especificidades produtivas, territoriais e ambientais do Estado [47].

Dessa forma, este atlas apresenta dados sobre resíduos que, se utilizados para fins energéticos, podem contribuir para a redução das emissões estaduais. Destacam-se os resíduos sólidos municipais, efluentes domésticos, resíduos florestais e o manejo de dejetos animais, além da incineração ou queima a céu aberto e dos efluentes líquidos industriais, incluindo aqueles provenientes da produção de celulose e de proteína animal. Todos esses resíduos, quando aproveitados para a produção de energia, podem reduzir as emissões dos setores de origem, bem como das atividades que utilizam combustíveis fósseis para geração de energia ou calor, ainda que, de modo geral, essas emissões sejam relativamente pequenas no Estado. O atlas contribui de forma significativa para quantificar a potencialidade de uso de diferentes formas de biomassa capazes de reduzir emissões em todos os segmentos mencionados, considerando apenas os resíduos de biomassa com potencial energético já disponíveis, ou seja, sem incluir o impacto do cultivo de culturas destinadas à produção de biocombustíveis para o setor de transportes.

Figura 2.14 Distribuição setorial das emissões de GEE (2023), com destaque para frações mitigáveis via bioenergia residual.
Figure 2.14 *Sectoral distribution of GHG emissions (2023), highlighting fractions that can be mitigated via residual bioenergy.*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [47,48]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [47,48].

Atlas Bioenergia Bahia

45.0°W

40.0°W

N

11.0°S

16.0°S

Casa Nova

Sento Sé

Paulo Afonso

BA-210

BR - 235

Buritirama

Barra

Monte Santo

BA-220

Formosa do Rio Preto

BA-225

BA-459

Irecê

Jacobina

BR - 407

BA-120

Cipó

BA-396

BA-233

BA-052

BA-505

Barreiras

Feira de Santana

BA-462

BA-463

BR - 242

Lençóis

BA-233

BA-293

Itaberaba

BA-488

Castro Alves

BA-880

Salvador

BR - 135

BR - 020

Bom Jesus da Lapa

Maracás

Valençaa

Santa Maria da Vitória

BR - 349

Jequié

Caetité

Guanambi

BR - 116

Ipiaú

BA-594

BA-180

Ilhéus

Vitória da Conquista

Una

Itapetinga

BA-982

Porto Seguro

BA-001

BR - 101

Prado

Teixeira de Freitas

BA-126

BA-697

0 100 200

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

Mapa 2.10 Infraestrutura logística da Bahia e recorte da Baía de Todos-os-Santos.
Map 2.10 *Logistics infrastructure of Bahia and a cross-section of Baía de Todos-os-Santos.*

- Salvador / *State Capital*
- Limite estadual / *State boundary*
- Corpos d'água / *Water bodies*

Infraestrutura logística / *Logistics Infrastructure*

- Aeroportos / *Airports*
- Porto / *Port*
- Terminal portuário de uso privado / *Private Port Terminal*
- Outras instalações portuárias / *Other Port Facilities*
- Ferrovia / *Railway*
- Hidrovia / *Waterway*
- Rodovia estadual / *State Highway*
- Rodovia federal / *Federal Highway*

Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [18,9]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [18,9].

2.2.5 STRATEGIC INFRASTRUCTURE FOR THE DEVELOPMENT OF BIOENERGY IN BAHIA

Bahia occupies a strategic position in the Northeast region, boasting a logistics network that includes highways, railways, ports, airports, and maritime and pipeline terminals. This infrastructure is essential for the transportation of agro-industrial products, the import of inputs, and the export of fuels and energy commodities, making it a central element for the development of the bioenergy sector.

Its extensive road network encompasses federal, state, and municipal highways, centered on the main federal highways that cross the state: BR-116, BR-101, BR-324, BR-407, and BR-242 [49]. BR-324, divided into two sections, is the main route into and out of the capital. The Southern Section, which is 515 km long, connects the border with Minas Gerais to the municipalities of Vitória da Conquista and Feira de Santana, where the largest traffic flow is concentrated. The Northern Section connects Feira de Santana to the municipalities of Tucano and Euclides da Cunha [50].

Highways BR-242, BR-101, BA001, BA026, BA046, BA052, BA093, and BA-099 are also important to Bahia's economy. BR-242, which begins in Maragogipe (BA) and continues to Sorriso (MT), is strategic for transporting grain produced in the state's far west and for access to Chapada Diamantina. The busiest section of this highway is between Luís Eduardo Magalhães and Rafael Jambeiro, where it intersects BR-116. BR-101, in addition to its national importance, connects the Far South and Recôncavo region to the capital via its junction with BR-324 in the municipality of Feira de Santana [50].

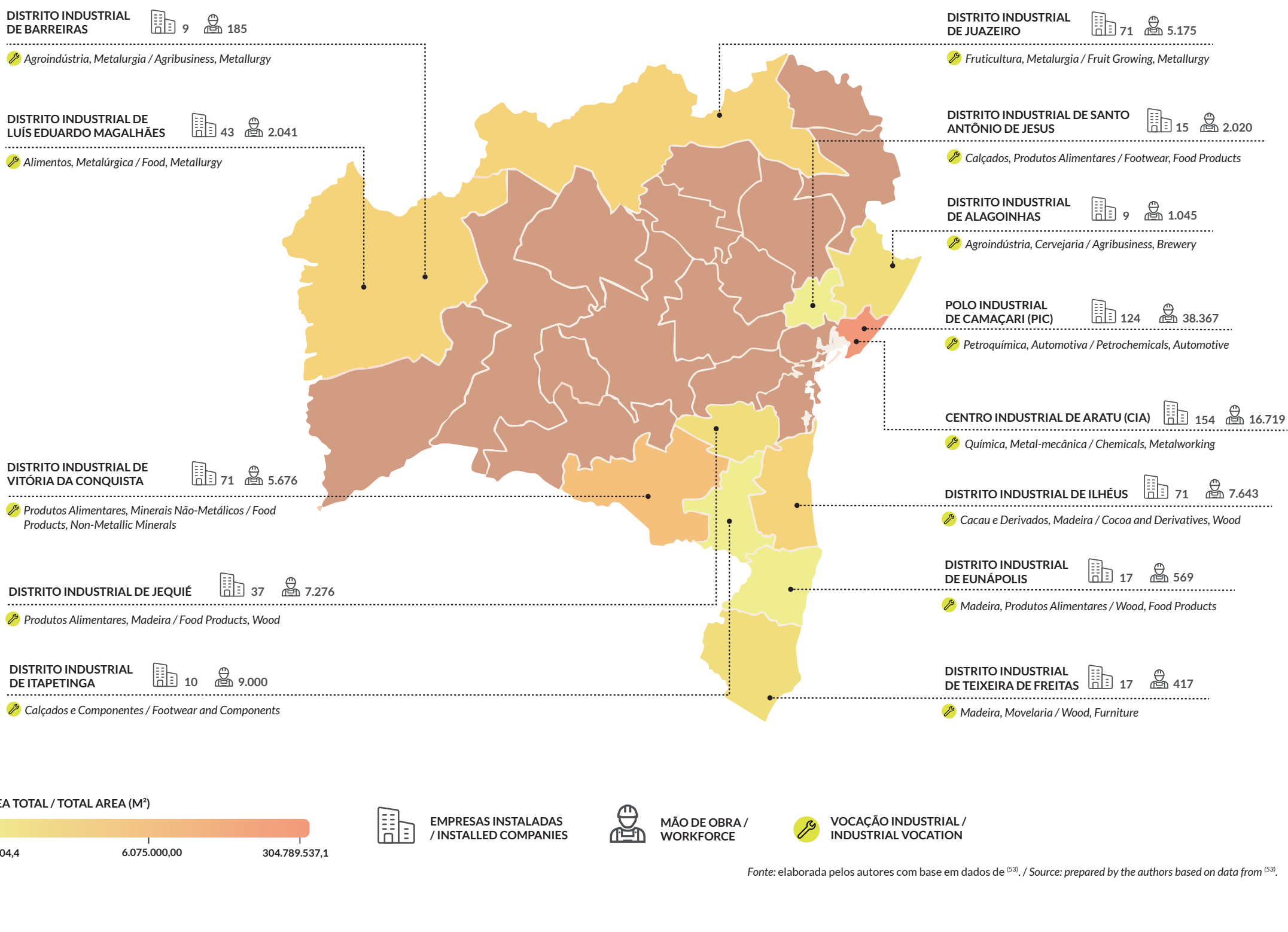
Federal highways total 12,696 km, representing 10% of the Brazilian federal highway network and 36% of the Northeast network. At the state level, the total length of the network by surface type was 120,701 km, of which 103,858 km were paved and 16,851 km were unpaved. Federal concessions cover 680 km operated by Via Bahia and 349 km operated by ECO101 in Bahia [49].

2.2.5 INFRAESTRUTURAS ESTRATÉGICAS AO DESENVOLVIMENTO DA BIOENERGIA NA BAHIA

A Bahia possui uma posição estratégica na Região Nordeste, com uma malha logística que inclui rodovias, ferrovias, portos, aeroportos e terminais marítimos e dutoviários. Esse conjunto de infraestruturas é essencial para o escoamento de produtos agroindustriais, a importação de insumos e a exportação de combustíveis e *commodities* energéticas, tornando-se um elemento central para o desenvolvimento do setor de bioenergia.

A sua extensa malha rodoviária abrange rodovias federais, estaduais e municipais, com estrutura centrada nos principais eixos federais que cruzam o Estado: BR-116, BR-101, BR-324, BR-407 e BR-242 [49]. A BR-324, dividida em dois trechos, é a principal via de entrada e saída da capital. O Trecho Sul, com 515 km, conecta a

Figura 2.15 Distritos, centro e polo industriais do Estado da Bahia.
Figure 2.15 *Industrial districts, center and hub of the State of Bahia.*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [53]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [53].

divisa com Minas Gerais aos municípios de Vitória da Conquista e Feira de Santana, onde se concentra o maior fluxo de veículos. O Trecho Norte liga Feira de Santana aos municípios de Tucano e Euclides da Cunha [50].

As BR-242, BR-101, BA001, BA026, BA 046, BA052, BA093 e BA-099 também se destacam por sua importância para a economia baiana. A BR-242, que se inicia em Maragogipe (BA) e segue até Sorriso (MT), é estratégica para o escoamento dos grãos produzidos no Extremo Oeste do Estado e para o acesso à Chapada Diamantina. O trecho mais movimentado dessa rodovia está entre Luís Eduardo Magalhães e Rafael Jambeiro, onde cruza a BR-116. A BR-101, além de sua relevância nacional, conecta o Extremo Sul e o Recôncavo à capital por meio do entroncamento com a BR-324, no município de Feira de Santana [50].

As rodovias federais somam 12.696 km, o que representa 10% da malha federal brasileira e 36% da malha do Nordeste. No âmbito estadual, a extensão total da malha por tipo de superfície foi de 120.701 km, sendo 103.858 km pavimentados e 16.851 km não pavimentadas. As concessões federais abrangem 680 km operados pela Via Bahia e 349 km da ECO101 em território baiano [49].

No modal ferroviário, o principal eixo de conexão entre a Bahia e as regiões Sudeste e Centro-Oeste é a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), subsidiária da VLI. Essa ferrovia atravessa importantes municípios baianos, como Brumado, São Gonçalo dos Campos, Candeias, Simões Filho, Camaçari, Dias D'Ávila, Mata de São João, Pojuca, Catu, Alagoinhas, Serrinha, Senhor do Bonfim e Juazeiro, oferecendo acesso a portos localizados nos Estados da Bahia, Espírito Santo, São Paulo e Rio de Janeiro. Com extensão total de 7.220 km, a FCA passa por mais de trezentos municípios distribuídos em seis Estados brasileiros, além da Bahia [51]. Na Bahia, do total de 1.871 km de linhas ferroviárias construídas, apenas o trecho Simões Filho (Mapele) – Monte Azul (MG), com 854 km, e mais 30 km do ramal Antônio Gonçalves (Bonfim) – Campo Formoso estão em operação, sob gestão da FCA. As linhas Salvador – Propriá (537 km) e Alagoinhas – Juazeiro (450 km) encontram-se desativadas. Pela Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL), estão em fase de construção os trechos Ilhéus – Caetité (537 km) e Caetité – Barreiras (485 km), enquanto o segmento Barreiras – Figueirópolis (505 km) está em fase de estudos [52].

A infraestrutura portuária estadual é composta por instalações públicas e privadas, entre as quais se destacam os portos de Aratu-Candeias, Salvador, Ilhéus e o futuro Porto Sul. O Porto de Aratu-Candeias é especializado na movimentação de granéis líquidos e gasosos, sendo relevante para o setor petroquímico e de combustíveis. Já o Porto de Salvador movimenta cargas gerais e conteinerizadas, enquanto o Porto de Ilhéus tem forte atuação na exportação de grãos e produtos agroindustriais. O Porto Sul, atualmente em construção, é um empreendimento estratégico para o desenvolvimento regional e poderá beneficiar o escoamento de biomassa e biocombustíveis [51].

A infraestrutura aeroportuária da Bahia conta com 387 aeródromos, sendo 39 aeroportos públicos (10,5%), 266 privados (68,5%) e 81 helipontos (20,8%) [49]. O Aeroporto Internacional Luís Eduardo Magalhães, em Salvador, é o único concedido do Estado, com média diária de 25 mil passageiros, chegando a 35 mil na alta estação [51]. Destacam-se ainda os aeroportos públicos de Porto Seguro, Ilhéus, Vitória da Conquista, Barreiras, Feira de Santana, Paulo Afonso e Juazeiro, aptos a operar com aeronaves de grande e médio portes. Os aeroportos de Salvador e Porto Seguro mantêm voos internacionais [52].

A infraestrutura dutoviária também possui papel estratégico para o setor de energia. A Bahia conta com 1.307 km de gasodutos, além de dutos curtos (142 km), longos (498 km), minerodutos (51 km) e amoniodutos (30 km), operados pela Transpetro, Dow Química, Unigel e Bahiagás. A Transpetro opera um poliduto e dois oleodutos, o Orsub e o Becan 6" e 8" [52]. O Orsub transporta combustíveis, nafta e gasóleo entre o terminal de Madre de Deus (Temadre) e os terminais de Itabuna e Jequié, com 498 km de extensão [51]. O Becan liga a RLAM ao terminal de Candeias, com 10 km cada. O principal mineroduto, da Dow Química, movimenta sal-gema por 51 km entre a Ilha de Matarandiba e Salvador [51,52].

A atividade industrial no Estado da Bahia está distribuída em catorze distritos, centros e polos industriais. Destacam-se o Polo Industrial de Camaçari e o Centro Industrial de Aratu, os quais concentram a maior parte da infraestrutura e da mão de obra empregada. Ambos apresentam localização estratégica em relação a centros urbanos, portos e aeroportos, além de abrigar uma ampla diversidade de vocações industriais [53]. Essas vocações incluem os setores químico, petroquímico, de fertilizantes, celulose, automotivo, plásticos, química fina, metalurgia, metal-mecânica, alimentício, cerâmico e de bebidas. A *Figura 2.15* apresenta as vocações industriais com sinergia com a biomassa, voltadas à agroindústria e ao beneficiamento de produtos agrícolas e florestais nos distritos industriais da Bahia.

2.2.6 PROJETOS E INVESTIMENTOS ESTRATÉGICOS EM BIOENERGIA EM DESENVOLVIMENTO NA BAHIA

A Bahia tem se consolidado como um território promissor para novos investimentos em bioenergia, impulsionada pela disponibilidade de recursos naturais, pela expansão da infraestrutura logística e pelas políticas de incentivo. Diversos empreendimentos encontram-se em fase de planejamento ou instalação, com destaque para projetos que integram produção agroindustrial, geração de energia e utilização de coprodutos, ampliando o valor agregado das cadeias produtivas regionais. Entre os principais, destacam-se os projetos em desenvolvimento da Acelen Renováveis, da Biocombustíveis do Oeste S.A. e da Inpasa Agroindustrial.

In the rail sector, the main connection between Bahia and the Southeast and Central-West regions is the Central-Atlantic Railway (FCA), a subsidiary of VLI. This railway passes through important municipalities in Bahia, such as Brumado, São Gonçalo dos Campos, Candeias, Simões Filho, Camaçari, Dias D'Ávila, Mata de São João, Pojuca, Catu, Alagoinhas, Serrinha, Senhor do Bonfim, and Juazeiro, providing access to ports located in the States of Bahia, Espírito Santo, São Paulo, and Rio de Janeiro. With a total length of 7,220 km, the FCA passes through more than three hundred municipalities distributed across six Brazilian states, in addition to Bahia [51]. In Bahia, of the total 1,871 km of railway lines built, only the Simões Filho (Mapele) – Monte Azul (MG) section, with 854 km, and another 30 km of the Antônio Gonçalves (Bonfim) – Campo Formoso branch are in operation, under FCA management. The Salvador – Propriá (537 km) and Alagoinhas – Juazeiro (450 km) lines are deactivated. Through the West-East Integration Railway (FIOL), the Ilhéus – Caetité (537 km) and Caetité – Barreiras (485 km) sections are under construction, while the Barreiras – Figueirópolis segment (505 km) is in the study phase [52].

The state's port infrastructure consists of public and private facilities, notably the ports of Aratu-Candeias, Salvador, Ilhéus, and the future Porto Sul. The Port of Aratu-Candeias specializes in the movement of liquid and gaseous bulk cargo and is important for the petrochemical and fuel sectors. The Port of Salvador handles general and containerized cargo, while the Port of Ilhéus is heavily involved in the export of grains and agro-industrial products. Porto Sul, currently under construction, is a strategic project for regional development and could benefit the flow of biomass and biofuels [51].

Bahia's airport infrastructure includes 387 airfields, including 39 public airports (10.5%), 266 private airports (68.5%), and 81 helipads (20.8%) [49]. Luís Eduardo Magalhães International Airport in Salvador is the only concessioned airport in the state, with a daily average of 25,000 passengers, reaching 35,000 during peak season [51]. Other notable airports are Porto Seguro, Ilhéus, Vitória da Conquista, Barreiras, Feira de Santana, Paulo Afonso, and Juazeiro, capable of handling large and medium-sized aircraft. The airports in Salvador and Porto Seguro also handle international flights [52].

The pipeline infrastructure also plays a strategic role in the energy sector. Bahia has 1,307 km of gas pipelines, as well as short (142 km), long (498 km), slurry pipelines (51 km), and ammonium pipelines (30 km), operated by Transpetro, Dow Química, Unigel, and Bahiagás. Transpetro operates a multi-pipeline and two oil pipelines, the Orsub and the Becan 6" and 8" pipelines [52]. Orsub transports fuels, naphtha, and diesel between the Madre de Deus terminal (Temadre) and the Itabuna and Jequié terminals, with a length of 498 km [51]. The Becan connects the RLAM to the Candeias terminal, each with a length of 10 km. The main slurry pipeline, owned by Dow Química, transports rock salt for 51 km between Matarandiba Island and Salvador [51,52].

Industrial activity in the state of Bahia is distributed across fourteen districts, centers, and industrial hubs. The Camaçari Industrial Hub and the Aratu Industrial Center stand out, concentrating most of the infrastructure and workforce. Both are strategically located in relation to urban centers, ports, and airports, and are home to a wide variety of industrial vocations [53]. These vocations include the chemicals, petrochemicals, fertilizers, pulp, automotive, plastics, fine chemicals, metallurgy, metalworking, food, ceramics, and beverages sectors. Figure 2.15 presents the industrial vocations with synergy with biomass, focused on agribusiness and the processing of agricultural and forestry products in Bahia's industrial districts.

2.2.6 STRATEGIC BIOENERGY PROJECTS AND INVESTMENTS UNDER DEVELOPMENT IN BAHIA

Bahia has established itself as a promising region for new bioenergy investments, driven by the availability of natural resources, the expansion of logistical infrastructure, and incentive policies. Several projects are in the planning or implementation phase, with emphasis on projects that integrate agroindustrial production, energy generation, and the use of byproducts, expanding the added value of regional production chains. Among the most important projects are the projects under development by Acelen Renováveis, Biocombustíveis do Oeste S.A. and Inpasa Agroindustrial.

A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

PROJETO ACELEN ENERGIA RENOVÁVEL

A Acelen Renováveis vem expandindo sua atuação com foco na produção de combustíveis a partir da macaúba [57] *(Figura 2.16)*. Destaca-se, nesse contexto, o *Projeto Acelen Energia Renovável*, que prevê a instalação de uma biorrefinaria no município de São Francisco do Conde. O empreendimento contempla um investimento inicial de US$ 3 bilhões para a instalação da primeira unidade integrada de biocombustíveis produzidos a partir de óleos vegetais e gordura animal [57,55].

O projeto envolve o cultivo dedicado da macaúba em 178 mil ha, além da utilização de óleo de soja, óleo de cozinha usado (UCO) e gordura animal, com capacidade de produção de 1 bilhão de litros por ano a partir de 2041. Os biocombustíveis produzidos serão totalmente *drop-in*, podendo ser utilizados sem modificações nos motores, com potencial de reduzir em até 80% as emissões de CO_2 em comparação com os combustíveis fósseis convencionais [57, 55].

A tecnologia adotada baseia-se no hidroprocessamento de óleos vegetais e gordura animal, com capacidade instalada de 20 mil barris por dia (bpd), o que permitirá a produção anual de 1.111.700 m³ de diesel verde (*Renewable Diesel* – RD) e querosene sustentável de aviação (*Sustainable Aviation Fuel* – SAF), ambos destinados à comercialização. O empreendimento estima gerar 1.557 empregos diretos no segmento agroindustrial até 2035, sendo 220 na planta industrial, com investimento total previsto de R$ 17,5 bilhões. A produção de *RD* e *SAF* a partir de óleo de macaúba está prevista para iniciar em 2030 [55].

Do ponto de vista ambiental, o projeto prevê a captura de carbono pela plantação de macaúba, estimada entre 310 e 444 t de CO_2e ao longo do ciclo de vida do empreendimento, até 2055. Para o tratamento de efluentes, serão implementadas estações de tratamento de efluentes (ETE) na biorrefinaria e nas unidades extratoras de óleo [55].

O projeto conta com parcerias estratégicas com diversas instituições de pesquisa nacionais e internacionais, como Esalq, UFV, Unicamp, UFMG, IAC, Embrapa Agroenergia, USP, Unimontes, FGV, *Wageningen University* e *Cornell University*, entre outras. As inovações tecnológicas aplicadas incluem processos de escarificação, germinação e clonagem da semente de macaúba, fundamentais para a viabilização e o aumento da produtividade da cultura [55].

Em abril de 2023, a Acelen Renováveis assinou com o Governo da Bahia um memorando de entendimento para a instalação da primeira fazenda modelo, com cerca de 200 ha, no município de Cachoeira. A unidade contará com 800 mil mudas de macaúba provenientes do viveiro localizado em Mucugê, na Chapada Diamantina. A escolha da área considerou aspectos agronômicos e a proximidade com São Francisco do Conde, onde será construída a biorrefinaria do grupo.

O *Atlas Bioenergia Bahia* constitui uma iniciativa relevante para evidenciar o potencial do Estado na transição energética. Nesse contexto, a Acelen Renováveis tem desenvolvido ações voltadas à produção de biocombustíveis sustentáveis a partir da macaúba, contribuindo para o desenvolvimento econômico, social e ambiental da Bahia e do Brasil.

ACELEN RENEWABLE ENERGY PROJECT

Acelen Renováveis has been expanding its operations with a focus on producing fuels from macauba palm [57] (Figure 2.16). A notable feature in this context is the Acelen Renewable Energy Project, which plans to install a biorefinery in the municipality of São Francisco do Conde. The project involves an initial investment of US$3 billion to build the first integrated biofuels unit produced from vegetable oils and animal fat [57,55].

The project involves the dedicated cultivation of macauba "palm (Acrocomia aculeata)" on 178,000 ha, in addition to the use of soybean oil, used cooking oil (UCO) and animal fat, with a production capacity of 1 billion liters per year from 2041. The biofuels produced will be completely drop-in, and can be used without modifications to the engines, with the potential to reduce CO_2 emissions by up to 80% compared to conventional fossil fuels [57, 55].

The technology adopted is based on the hydroprocessing of vegetable oils and animal fat, with an installed capacity of 20,000 barrels per day (bpd), which will enable the annual production of 1,111,700 m³ of green diesel (Renewable Diesel - RD) and sustainable aviation kerosene (Sustainable Aviation Fuel - SAF), both intended for commercialization. The project is estimated to generate 1,557 direct jobs in the agro-industrial segment by 2035, 220 of which will be at the industrial plant, with a total projected investment of R$17.5 billion. The production of RD and SAF from macauba oil is expected to begin in 2030 [55].

From an environmental point of view, the project foresees the capture of carbon by the macauba plantation, estimated at between 310 and 444 t of CO_2e over the life cycle of the project, until 2055. For the treatment of effluents, effluent treatment plants (ETE) will be implemented in the biorefinery and in the oil extraction units [55].

The project has strategic partnerships with several national and international research institutions, such as Esalq, UFV, Unicamp, UFMG, IAC, Embrapa Agroenergia, USP, Unimontes, FGV, Wageningen University and Cornell University, among others. The technological innovations applied include scarification, germination and cloning of macauba seeds, which are essential for the viability and increased productivity of the crop [55].

In April 2023, Acelen Renováveis signed a memorandum of understanding with the Government of Bahia to establish its first model farm, covering approximately 200 hectares, in the municipality of Cachoeira. The facility will house 800,000 macaúba seedlings from the nursery in Mucugê, in Chapada Diamantina. The site was selected based on agronomic considerations and its proximity to São Francisco do Conde, where the group's biorefinery will be built.

The Bahia Bioenergy Atlas is a significant initiative that highlights the State's potential in the energy transition. In this context, Acelen Renováveis has developed initiatives focused on producing sustainable biofuels from macauba palm, contributing to the economic, social, and environmental development of Bahia and Brazil.

Figura 2.16 Ciclo sustentável da macaúba, representando o aproveitamento integral da biomassa e a produção de biocombustíveis de baixo carbono.
Figure 2.16 *Sustainable macauba cycle, representing the full use of biomass and the production of low-carbon biofuels.*

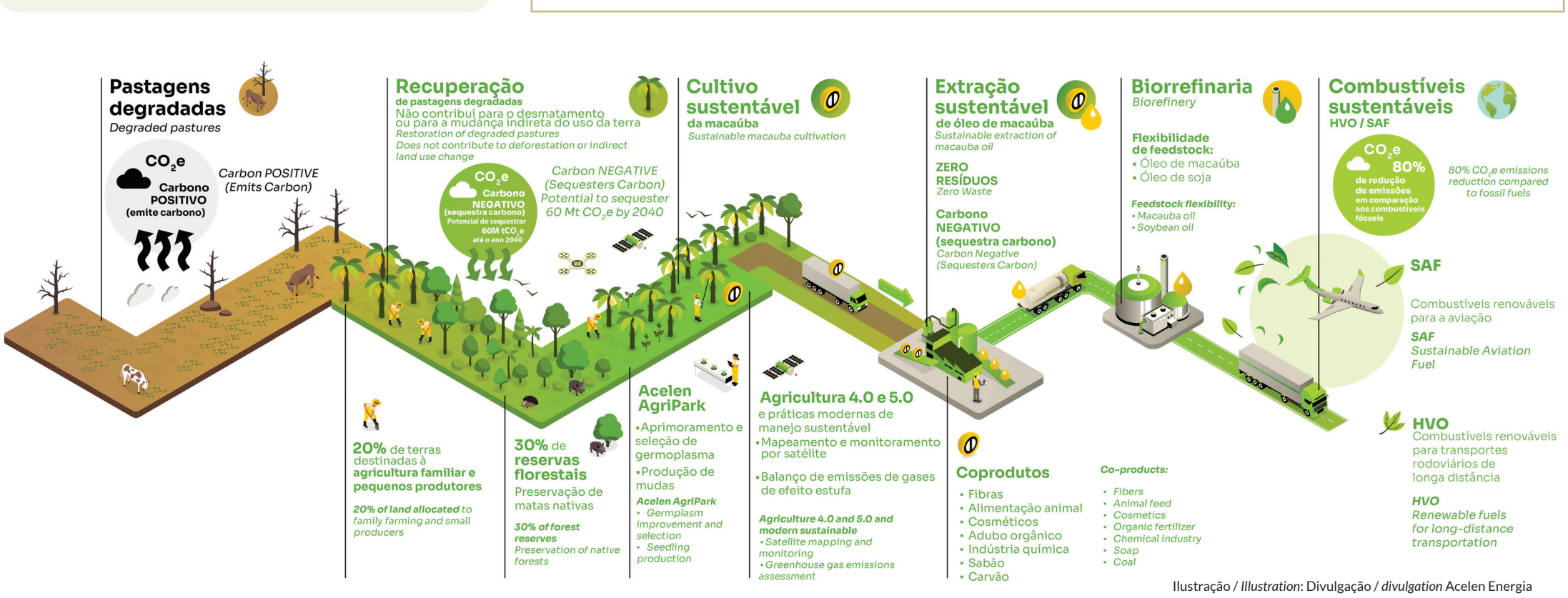


Ilustração / *Illustration*: Divulgação / *divulgation* Acelen Energia

BIOCOMBUSTÍVEIS DO OESTE S. A.

PROJETO FAROL – BIORREFINARIA DE ETANOL DE MILHO

Localizado no município de Jaborandi, o *Projeto Farol (Figura 2.17)*, desenvolvido pela Biocombustíveis do Oeste S.A., prevê inaugurar, em maio de 2027, uma planta *greenfield* para produção de etanol de milho. O projeto utiliza a tecnologia de plantas de etanol de milho da Intelligent Cleaning & Mechanicals (ICM), uma líder global nesse segmento [54]. A matéria-prima será cultivada em uma área de 200 mil ha nos municípios de Cocos, Correntina e Coribe, no Oeste da Bahia [55].

O empreendimento prevê a geração de 1.200 empregos diretos no setor agroindustrial e investimentos da ordem de R$ 3 bilhões. Há, ainda, planos de ampliar a área plantada em mais 60 mil ha, visando a atender a demanda de produção e a futura duplicação da planta, prevista para ocorrer em três anos, incluindo a produção de combustíveis renováveis de segunda geração [55].

Embora o foco principal seja a produção de etanol, o projeto prevê a verticalização da cadeia produtiva, com a fabricação de coprodutos como DDGS (*dried distillers grains with solubles* – grãos secos com solúveis, usados como fonte proteica na alimentação de bovinos, suínos e aves), óleo refinado especial e energia elétrica [55].

A planta contará com duas caldeiras elétricas, cada uma com 55 MW de potência instalada, destinadas ao autoconsumo na geração de vapor de média pressão. O consumo estimado de energia é de 831.600 MWh/ano. Estão previstos 150 empregos diretos, 700 indiretos e investimento adicional de R$ 1,2 bilhão. Com a substituição de caldeiras a biomassa ou combustíveis fósseis por caldeiras elétricas, estima-se a redução de 320 mil t de CO_2e por ano. O tratamento de resíduos e efluentes será realizado mediante o reaproveitamento do *blow-down* das caldeiras para irrigação. A planta contará com certificação ambiental *ISO 9001/14000* [55].

BIOCOMBUSTÍVEIS DO OESTE S.A. FAROL PROJECT – CORN ETHANOL BIOREFINERY

Located in the municipality of Jaborandi, the Farol Project (Figure 2.17), developed by Biocombustíveis do Oeste S.A., plans to open a greenfield corn ethanol production plant in May 2027. The project utilizes corn ethanol plant technology from Intelligent Cleaning & Mechanicals (ICM), a global leader in this segment [54]. The feedstock will be cultivated on an area of 200,000 hectares in the municipalities of Cocos, Correntina, and Coribe, in Western Bahia [55].

The project is expected to generate 1,200 direct jobs in the agro-industrial sector and involve investments of around R$3 billion. There are also plans to expand the planted area by another 60,000 hectares to meet production demand and the future doubling of the plant, expected to occur in three years, including the production of second-generation renewable fuels [55].

Although the main focus is ethanol production, the project envisages the verticalization of the production chain, with the manufacture of co-products such as DDGS (dried distillers grains with solubles – dried grains with solubles, used as a protein source in cattle, swine and poultry feed), special refined oil and electricity [55].

The plant will have two electric boilers, each with 55 MW of installed capacity, designed for self-consumption in the generation of medium-pressure steam. Estimated energy consumption is 831,600 MWh/year. 150 direct jobs and 700 indirect jobs are expected, with an additional investment of R$1.2 billion. Replacing biomass or fossil fuel boilers with electric boilers is estimated to reduce CO_2e emissions by 320,000 t per year. Waste and effluent treatment will be carried out by reusing the boiler blowdown for irrigation. The plant will be ISO 9001/14000 [55] environmentally certified.

Figura 2.17 Fluxograma do processo de produção de etanol de milho na biorrefinaria do Projeto Farol.
Figure 2.17 *Flowchart of the corn ethanol production process at the Farol Project biorefinery.*

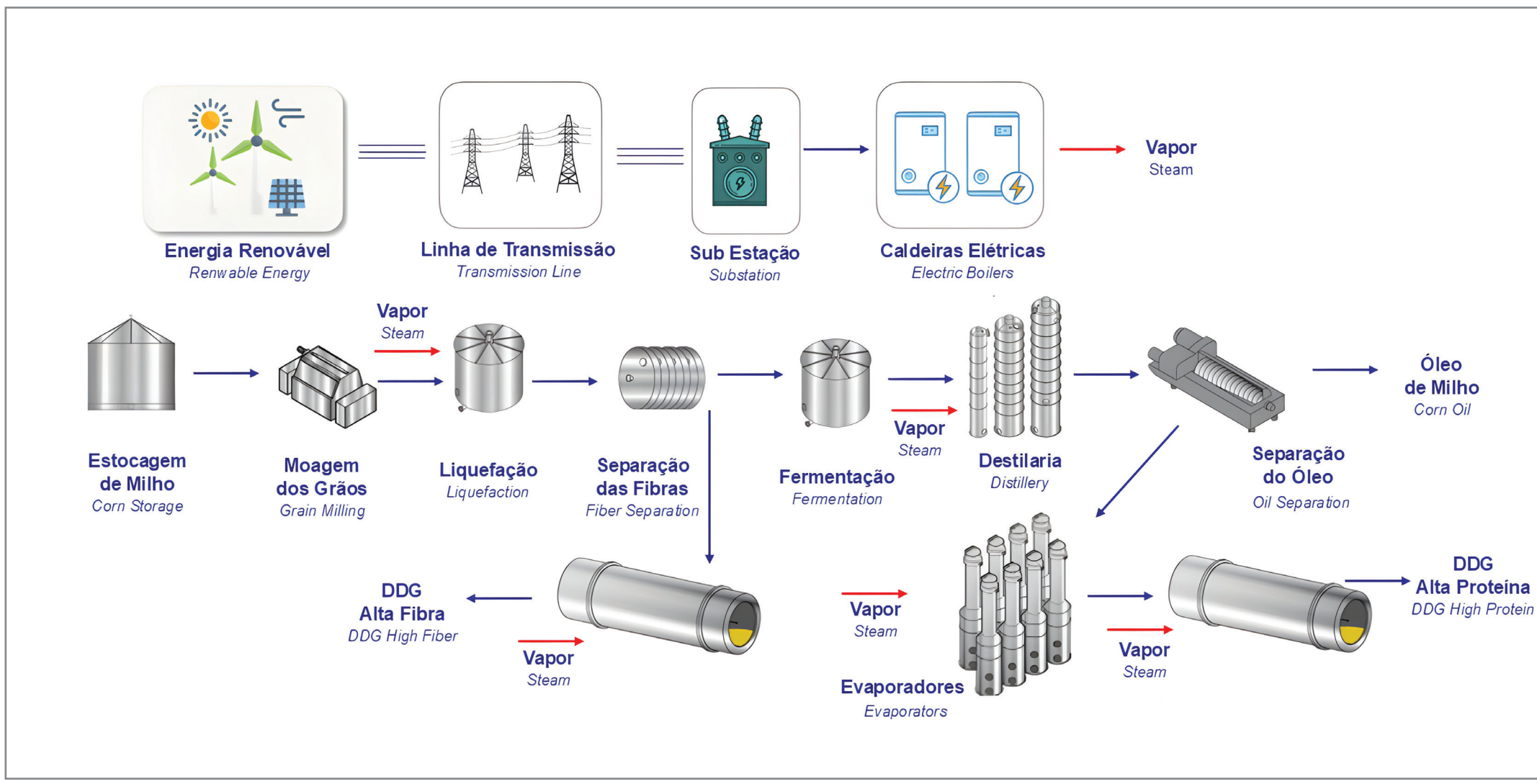


Ilustração / *Illustration*: Divulgação / *divulgation* Biocombustíveis do Oeste S.A.

INPASA AGROINDUSTRIAL

The ethanol production project developed by Inpasa Agroindustrial in the municipality of Luís Eduardo Magalhães, scheduled to begin operations in the third quarter of 2026 and with an estimated investment of R$2 billion, will use locally grown corn to produce anhydrous, hydrated, and neutral ethanol, as well as protein for animal feed and corn oil (56). Both this project and the Biocombustíveis do Oeste project were approved in November 2024 under Probahia, a program that established new tax incentives for ethanol production in the State, including a presumed ICMS tax credit for operations with anhydrous and hydrated ethanol, as well as benefits for the processing of DDG (dried distillers grains) [56].

The plant will have the capacity to process 1 million tons of grain and produce 500 million liters of ethanol per year. It is estimated that national production of corn ethanol will double from the current 10 billion liters in 2025 to 20 billion by 2032 [56].

Bahia's consolidation as a strategic hub for bioenergy investments reflects the State's ability to integrate natural resources, technological innovation, and incentive public policies. The projects under development demonstrate the growing alignment between environmental sustainability and economic value generation, with a focus on the diversification of energy sources and vertical production integration. This dynamic contributes to strengthening regional production chains, creating skilled jobs, and mitigating greenhouse gas emissions, positioning Bahia at the forefront of the bioenergy sector in Brazil.

INPASA AGROINDUSTRIAL

O projeto de produção de etanol desenvolvido pela Inpasa Agroindustrial no município de Luís Eduardo Magalhães, com início das operações previsto para o terceiro trimestre de 2026 e investimento estimado em R$ 2 bilhões, utilizará milho cultivado localmente para a produção de etanol anidro, hidratado e neutro, além de proteína para ração animal e óleo de milho [56].

Tanto esse projeto quanto o da Biocombustíveis do Oeste foram habilitados em novembro de 2024 no âmbito do *Probahia*, programa que instituiu novos incentivos fiscais à produção de etanol no Estado, incluindo crédito presumido de *ICMS* para as operações com etanol anidro e hidratado, além de benefícios para o processamento de DDG (*dried distillers grains*) [56].

A planta terá capacidade para processar 1 milhão de t de grãos e produzir 500 milhões de litros de etanol por ano. Estima-se que a produção nacional de etanol de milho dobre dos atuais 10 bilhões de litros em 2025 para 20 bilhões até 2032 [56].

A consolidação da Bahia como polo estratégico para investimentos em bioenergia reflete a capacidade do Estado de integrar recursos naturais, inovação tecnológica e políticas públicas de incentivo. Os projetos em desenvolvimento evidenciam o alinhamento crescente entre sustentabilidade ambiental e geração de valor econômico, com destaque para a diversificação das fontes energéticas e a verticalização produtiva. Essa dinâmica contribui para o fortalecimento das cadeias produtivas regionais, a criação de empregos qualificados e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, posicionando a Bahia na vanguarda do setor de bioenergia no Brasil.

Figura 2.18 Etanol de milho
Figure 2.18 *Corn ethanol*



Foto / *Photo*: Antonio / stock.adobe.com

2.3 HORIZONTES ESTRATÉGICOS DA BIOENERGIA NA BAHIA

A Bahia possui um potencial singular para se consolidar como um polo estratégico na transição energética brasileira, com destaque para a bioenergia. A combinação de uma matriz elétrica já predominantemente renovável com a ampla oferta de resíduos agroindustriais, florestais, urbanos e agropecuários cria condições ideais para a expansão da produção de energia a partir da biomassa, trazendo impactos positivos para a segurança energética, a economia e a redução de emissões.

A caracterização do Estado revela uma complexa configuração territorial e socioeconômica, marcada pela coexistência de biomas distintos (Caatinga, Mata Atlântica e Cerrado) e vocações produtivas específicas por região. Essa diversidade exige um planejamento cuidadoso e políticas públicas alinhadas às particularidades locais, mas também representa uma oportunidade para iniciativas sustentáveis que articulam o desenvolvimento regional com a conservação ambiental.

A Bahia se destaca na capacidade instalada de geração de energia eólica e solar. Contudo, o setor de bioenergia ainda tem muito espaço para crescer, especialmente na geração de eletricidade, que atualmente responde por apenas 2,5% do total instalado no Estado. Projetos em desenvolvimento, como as biorrefinarias de milho e macaúba, mostram um alinhamento crescente entre inovação tecnológica e sustentabilidade. Esses empreendimentos não apenas diversificam a matriz energética e geram empregos, mas também contribuem para a mitigação de GEE ao aproveitar resíduos e substituir combustíveis fósseis.

A infraestrutura logística e industrial do Estado, que inclui uma extensa malha rodoviária e portos estratégicos, é um fator crucial para o escoamento da produção e para o desenvolvimento do setor de bioenergia. Os investimentos previstos em gás natural, transmissão de energia e nos projetos de bioenergia reforçam a posição da Bahia na vanguarda da transição energética.

Este atlas contribui para quantificar o potencial de uso de diferentes formas de biomassa residual para a redução de emissões em diversos setores, como o de resíduos sólidos urbanos, efluentes domésticos e resíduos florestais. As informações detalhadas aqui apresentadas buscam servir como um guia para a elaboração de políticas e o direcionamento de investimentos que, ao valorizar a bioenergia, impulsionem um modelo de desenvolvimento econômico que é ao mesmo tempo robusto, inclusivo e alinhado aos desafios climáticos globais.

Figura 2.19 BR 324 - Município Simões Filho, Bahia
figure 2.19 *BR-324 – Simões Filho Municipality, Bahia*



Foto / *Photo*: Joa Souza / stock.adobe.com

Figura 2.20 Porto da cidade de Salvador, Bahia
Figure 2.20 *Port of the city of Salvador, Bahia*



Foto / *Photo*: Joa Souza / stock.adobe.com

2.3 STRATEGIC BIOENERGY HORIZONS IN BAHIA

Bahia has unique potential to establish itself as a strategic hub in the Brazilian energy transition, with a focus on bioenergy. The combination of an already predominantly renewable energy mix with ample supply of agro-industrial, forestry and agricultural residues and urban waste creates ideal conditions for the expansion of biomass-based energy production, bringing positive impacts to energy security, the economy, and reducing emissions.

The state's characterization reveals a complex territorial and socioeconomic configuration, marked by the coexistence of distinct biomes (Caatinga, Atlantic Forest, and Cerrado) and specific productive vocations by region. This diversity requires careful planning and public policies aligned with local specificities, but it also represents an opportunity for sustainable initiatives that combine regional development with environmental conservation.

Bahia stands out in its installed wind and solar power generation capacity. However, the bioenergy sector still has significant room for growth, especially in power generation, which currently accounts for only 2.5% of the total installed capacity in the state. Projects under development, such as the corn and macaúba biorefineries, demonstrate a growing alignment between technological innovation and sustainability. These projects not only diversify the energy mix and generate jobs, but also contribute to GHG mitigation by utilizing waste and residues and replacing fossil fuels.

The state's logistics and industrial infrastructure, which includes an extensive road network and strategic ports, is crucial for the flow of production and the development of the bioenergy sector. Planned investments in natural gas, power transmission, and bioenergy projects reinforce Bahia's position at the forefront of the energy transition.

This atlas contributes to quantifying the potential use of different forms of residual biomass to reduce emissions in various sectors, such as municipal solid waste, domestic effluents, and forestry residues. The detailed information presented here aims to serve as a guide for policy-making and investment targeting that, by valuing bioenergy, promotes an economic development model that is both robust, inclusive, and aligned with global climate challenges.

Atlas Bioenergia Bahia

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA BAHIA

ENERGY RECOVERY FROM MUNICIPAL SOLID WASTE IN BAHIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar um panorama geral da geração e gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, com ênfase no Estado da Bahia, explorando as possibilidades de recuperação energética por meio de tecnologias térmicas e bioquímicas. Serão discutidas as principais rotas tecnológicas de conversão de resíduos em formas úteis de energia, como eletricidade, biogás, biometano e hidrogênio. Adicionalmente, são apresentadas as metodologias adotadas na análise, as premissas consideradas, os resultados estimados para o Estado da Bahia e os principais desafios associados à implementação de soluções de tratamento e valorização energética dos RSU.

3.1 INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) configura-se como uma das principais preocupações ambientais e de saúde pública nas sociedades contemporâneas. No contexto brasileiro, fatores como o crescimento populacional, a urbanização acelerada e o aumento do consumo agravam os desafios relacionados à gestão eficiente e sustentável desses resíduos. Embora a promulgação da *Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)*, instituída *pela Lei nº 12.305/2010*, tenha representado um marco regulatório importante, a destinação final inadequada, como vazadouros a céu aberto e aterros controlados, ainda predomina em diversas regiões do País, comprometendo a integridade dos recursos naturais e a sustentabilidade urbana.

Diante desse cenário, ganham relevância as abordagens que transcendem o descarte convencional, com destaque para as tecnologias de tratamento com recuperação de energia. Essas soluções alinham-se aos princípios da economia circular e da transição para matrizes energéticas renováveis, representando uma estratégia complementar à reciclagem e à logística reversa. A valorização energética dos RSU, por meio de processos termoquímicos (como a incineração com recuperação térmica e/ou elétrica e a gaseificação) ou bioquímicos (como a digestão anaeróbia para produção de biogás), desponta como alternativa técnica e ambientalmente viável. Além de reduzir o volume de resíduos destinados a aterros, essas tecnologias contribuem para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), promovem a diversificação da matriz energética e possibilitam a geração de novas receitas e empregos no âmbito municipal.

No contexto nacional, o *Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares)* e os estaduais, como o *Plano Estadual de Resíduos Sólidos da Bahia (PERS-BA)*, orientam a implementação dessas diretrizes, estabelecendo metas para 2040 que incluem a universalização da coleta, a eliminação dos vazadouros a céu aberto e a ampliação da valorização energética e material dos resíduos. A Bahia, com 417 municípios organizados em Territórios de Identidade, apresenta desafios e oportunidades significativos no campo da gestão integrada de resíduos, especialmente pela predominância da fração orgânica na composição gravimétrica estadual (aproximadamente, 56%) e pela concentração populacional e econômica na Região Metropolitana de Salvador.

A compreensão desses desafios e potencialidades é essencial para subsidiar políticas públicas, orientar investimentos e fomentar parcerias que viabilizem a adoção de soluções inovadoras e sustentáveis na gestão dos RSU. Nesse sentido, este capítulo propõe uma análise integrada das oportunidades de valorização energética dos resíduos sólidos urbanos no Estado da Bahia, considerando suas especificidades territoriais, socioeconômicas e ambientais, com vistas à construção de um modelo de gestão mais eficiente, resiliente e alinhado às diretrizes nacionais de sustentabilidade.

3.2 CENÁRIO BRASILEIRO DOS RSU: DESAFIOS E OPORTUNIDADES ENERGÉTICAS

De acordo com a *PNRS*, os RSU são definidos como aqueles provenientes de atividades domésticas em residências localizadas em áreas urbanas, também denominados resíduos domiciliares, além dos gerados por serviços de varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, manutenção urbana, estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços [1]. Os RSU constituem uma matriz heterogênea de materiais, composta por resíduos orgânicos (como restos de alimentos e resíduos de poda), papel, plásticos e outros componentes diversos, oriundos majoritariamente de atividades residenciais, comerciais, institucionais e, em menor grau, industriais. As características físico-químicas e térmicas desses resíduos estão diretamente relacionadas à natureza dos materiais que os compõem [2].

A PNRS, ao reconhecer o potencial de aproveitamento presente em grande parte dos resíduos gerados, estabelece uma hierarquia para sua gestão integrada e sustentável. Conforme representado na *Figura 3.1*, essa hierarquia orienta a tomada de decisão quanto ao manejo de resíduos, priorizando as seguintes etapas,

Figura 3.1 Hierarquia de gestão de resíduos sólidos.
Figure 3.1 *Solid waste management hierarchy.*



Fonte: adaptada de [1]. / *Source: adapted from* [1].

This chapter aims to provide an overview of municipal solid waste (MSW) generation and management in Brazil, with an emphasis on the State of Bahia, exploring opportunities for energy recovery via thermal and biochemical technologies. It discusses the principal technological pathways for converting waste into useful energy carriers' electricity, biogas, biomethane, and hydrogen. In addition, it presents the methodologies employed in the analysis, the underlying assumptions, the results estimated for Bahia, and the main challenges associated with implementing MSW treatment and energy recovery solutions.

3.1 INTRODUCTION

The growing generation of municipal solid waste (MSW) has emerged as one of the foremost environmental and public-health concerns in contemporary societies. In Brazil, factors such as population growth, rapid urbanization, and rising consumption exacerbate the challenges of efficient and sustainable waste management. Although the enactment of the National Solid Waste Policy (PNRS), established by Law nº. 12305/2010, represented an important regulatory milestone, inadequate final disposal, such as open dumps and controlled landfills, still predominates in several regions of the country, compromising natural-resource integrity and urban sustainability.

Against this backdrop, approaches that go beyond conventional disposal gain prominence, particularly treatment technologies with energy recovery. These solutions align with circular economy principles and the transition to renewable energy systems, serving as a complementary strategy to recycle and reverse logistics. Energy recovery from MSW, via thermochemical processes (such as incineration with thermal and/or electrical recovery and gasification) or biochemical processes (such as anaerobic digestion for biogas production), are emerging as a technical and environmentally viable alternative. Beyond reducing the volume of waste sent to landfills, these technologies help mitigate greenhouse gas (GHG) emissions, diversify the energy mix, and enable new revenue streams and job creation at the municipal level.

In the national context, the National Solid Waste Plan (Planares) and state-level plans, such as Solid Waste Management Plan (PERS-Bahia), guide implementation of these directives, set 2040 targets that include universal collection, eradication of open dumpsites, and expanded material and energy valorization of waste. The State of Bahia, with 417 municipalities organized into Identity Territories, presents significant challenges and opportunities for integrated waste management, particularly due to the predominance of the organic fraction in the state's gravimetric composition (approximately 56%) and the concentration of population and economic activity in the Metropolitan Region of Salvador.

Understanding these challenges and opportunities is essential to inform public policy, guide investment, and foster partnerships that enable the adoption of innovative, sustainable solutions for MSW management. Accordingly, this chapter presents an integrated analysis of opportunities for energy valorization of municipal solid waste in the State of Bahia, considering its territorial, socioeconomic, and environmental specificities, with the aim of building a more efficient and resilient management model aligned with national sustainability guidelines.

3.2 BRAZILIAN MSW SCENARIO: ENERGY CHALLENGES AND OPPORTUNITIES

According to the PNRS, MSW is defined as waste originating from household activities in residences located in urban areas, also referred to as household waste, as well as waste generated by street sweeping, cleaning of public thoroughfares and spaces, urban maintenance, commercial establishments, and service providers [1]. MSW comprises a heterogeneous mix of materials, including organic waste (such as food scraps and pruning waste), paper, plastics, and other diverse components, derived predominantly from residential, commercial, and institutional activities and, to a lesser extent, industrial sources. The physicochemical and thermal characteristics of these wastes are directly related to the nature of their constituent materials [2].

The PNRS, recognizing the potential for reuse present in a large of the waste generated, establishes a hierarchy for its integrated and sustainable management. As represented in Figure 3.1, this hierarchy guides decision-making regarding waste management, prioritizing the following steps, in decreasing order of preference: prevention, reduction,

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA BAHIA

reuse, recycling, treatment with energy recovery, and, finally, environmentally sound final disposal [1].

The hierarchical solid waste management model, represented by an inverted pyramid, prioritizes strategies with lower environmental impact and greater resource efficiency. At the top are prevention and source reduction, followed by reuse, recycling, and recovery (composting, biodigestion, gasification, and incineration with energy recovery). The final stage, used only when the previous stages are exhausted, is environmentally appropriate final disposal, preferably in sanitary landfills. The application of this hierarchy varies according to public policies, available infrastructure, the level of technological development, and the degree of commitment to the circular economy, which proposes replacing the linear model with practices of sustainable design, reuse, recycling, and extended producer responsibility [3].

Municipal solid waste management (MSWM) is crucial to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDG 11 (sustainable cities) and SDG 12 (responsible consumption and production) [4]. This management contributes by means of the appropriate provision of services and the application of the waste hierarchy: prevention, reduction, reuse, and recycling. MSWM also relates to other SDGs by promoting waste-to-energy conversion, improving the well-being of informal waste pickers, supporting climate action, and combating marine plastic pollution.

In turn, Brazil has the National Solid Waste Plan (Planares), established within the scope of the PNRS, as established by Law no. 12,305/2010. It is a strategic instrument that guides, on a national scale, the integrated and environmentally sound management of solid waste [4]. Published in 2022, Planares defines guidelines, goals, and actions with a planning horizon until 2040, with priorities including universal collection and proper waste treatment, the eradication of open dumps, the valorization of waste as a resource, the strengthening of reverse logistics and shared responsibility, the socioeconomic inclusion of waste pickers, and the expansion of energy recovery from non-recyclable waste.

em ordem decrescente de preferência: prevenção, redução, reutilização, reciclagem, tratamento com valorização energética e, por fim, disposição final ambientalmente adequada [1].

O modelo hierárquico de gestão de resíduos sólidos, representado por uma pirâmide invertida, prioriza estratégias de menor impacto ambiental e maior eficiência no uso de recursos. No topo estão a prevenção e a redução na fonte, seguidas pela reutilização, reciclagem e recuperação (compostagem, biodigestão, gaseificação e incineração com recuperação energética). A última etapa, utilizada apenas quando esgotadas as anteriores, é a disposição final ambientalmente adequada, preferencialmente em aterros sanitários. A aplicação dessa hierarquia varia conforme as políticas públicas, a infraestrutura disponível, o nível de desenvolvimento tecnológico e o grau de comprometimento com a economia circular, que propõe substituir o modelo linear por práticas de design sustentável, reuso, reciclagem e responsabilidade estendida do produtor [3].

A gestão de resíduos sólidos urbanos (GRSU) é fundamental para o cumprimento dos *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)*, especialmente o *ODS 11* (cidades sustentáveis) e o *ODS 12* (produção e consumo responsáveis) [4]. Essa gestão contribui por meio da prestação adequada de serviços e da aplicação da hierarquia dos resíduos: prevenção, redução, reutilização e reciclagem. A GRSU também se relaciona a outros *ODS* ao promover a conversão de resíduos em energia, melhorar o bem-estar de catadores informais, apoiar a ação climática e combater a poluição marinha por plásticos.

Por sua vez, o Brasil conta com o *Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares)*, instituído no âmbito da *PNRS*, conforme estabelecido pela *Lei nº 12.305/2010*. Trata-se de um instrumento estratégico que orienta, em escala nacional, a gestão integrada e ambientalmente adequada dos resíduos sólidos [4]. Publicado em 2022, o *Planares* define diretrizes, metas e ações com horizonte de planejamento até 2040, tendo como prioridades a universalização da coleta e do tratamento adequado dos resíduos, a erradicação dos vazadouros a céu aberto (lixões), a valorização dos resíduos como recurso, o fortalecimento da logística reversa e da responsabilidade compartilhada, a inclusão socioeconômica dos catadores e a ampliação da recuperação energética dos resíduos não recicláveis.



Ilustração / *Illustration: Cristiane Martins com imagens do / with images from* stock.adobe.com

Entre as metas definidas pelo *Planares*, destacam-se a redução de 48% da massa de resíduos encaminhados à disposição final até o ano de 2040 e a universalização da coleta seletiva nas sedes urbanas de todos os municípios brasileiros no mesmo horizonte temporal. O *Quadro 3.1* apresenta um comparativo entre a situação atual da gestão de resíduos sólidos no Brasil e as metas estabelecidas pelo Planares para o período até 2040.

De acordo com dados do *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico* [6], a taxa de cobertura do serviço de coleta convencional de resíduos domiciliares no Brasil é de 91,3%. A coleta convencional, ou coleta indiferenciada, consiste na coleta dos RSU sem segregação prévia, reunindo todos os materiais independentemente de sua natureza. Pode ser realizada de forma direta (porta a porta) ou indireta (em pontos de entrega voluntária).

Em contraste, a coleta seletiva, também denominada diferenciada, caracteriza-se pela separação prévia dos resíduos recicláveis no momento da sua geração. Esse sistema deve, no mínimo, distinguir entre resíduos recicláveis secos e resíduos orgânicos, sendo passível de aprimoramento contínuo com o objetivo de ampliar os níveis de segregação e a eficiência na recuperação e reaproveitamento dos materiais [6]. A coleta seletiva alcança apenas 37,1% da população residente no território nacional, que, segundo o Sinisa (ano-base 2023), corresponde a 205.123.500 habitantes.

As menores taxas de cobertura para esse tipo de coleta são verificadas nas regiões Norte (4,8%) e Nordeste (4,4%), enquanto os maiores índices concentram-se nas regiões Sul (69,3%) e Centro-Oeste (45,5%). No meio rural, a cobertura do serviço de coleta de resíduos domiciliares é substancialmente inferior à observada em áreas urbanas, com apenas 53,8% de abrangência.

Among the goals defined by Planares, the following ones stand out: a 48% reduction in the mass of waste sent for final disposal by 2040 and the universalization of selective waste collection in urban centers of all Brazilian municipalities within the same timeframe. Table 3.1 presents a comparison between the current situation of solid waste management in Brazil and the goals established by Planares for the period up to 2040.

According to data from the National Basic Sanitation Information System [6], the coverage rate of the conventional household waste collection service in Brazil is 91.3%. Conventional collection, or undifferentiated collection, consists of collecting MSW without prior segregation, combining all materials regardless of their nature. It can be carried out directly (door-to-door) or indirectly (at voluntary drop-off points).

In contrast, selective collection, also called differentiated collection, is characterized by the prior separation of recyclable waste at the time of its generation. This system must, at a minimum, distinguish between dry recyclable waste and organic waste, and is subject to continuous improvement to increase segregation levels and efficiency in material recovery and reuse [6]. Selective collection reaches only 37.1% of the population residing in Brazil, which, according to SINISA (base year 2023), corresponds to 205,123,500 inhabitants.

The lowest coverage rates for this type of collection are found in the North (4.8%) and Northeast (4.4%) regions, while the highest rates are concentrated in the South (69.3%) and Central-West (45.5%) regions. In rural areas, household waste collection service coverage is substantially lower than in urban areas, with only 53.8%.

Tabela 3.1 Comparativo entre a situação atual da gestão de resíduos sólidos no Brasil e as metas do *Planares* para 2040.
Table 3.1 *Comparison between the current status of solid waste management in Brazil and the Planares goals for 2040.*

Indicador / *Indicator*	Situação atual (aprox.) / *Current situation (approx.)*	Meta do *Planares* 2040 / *Planares 2040 Goal*
Cobertura de resíduos domiciliares / *Household waste coverage* (cobertura nacional / *national coverage*)	93% da população atendida *93% of the population served*	100% da população urbana e rural atendida *100% of the urban and rural population served*
Coleta seletiva / *Selective waste collection* (cobertura nos municípios / *municipal coverage*)	Presente em 37% dos municípios[a] *Present in 37% of municipalitiesa*	100% das sedes municipais com coleta seletiva *100% of municipal centers with selective collection*
Disposição inadequada / *Inadequate disposal* (vazadouros a céu aberto e aterros controlados / *open dumps and controlled landfills*)	41,5% dos resíduos ainda são destinados a vazadouros a céu aberto / *41.5% of waste is still disposed of in open-air dumps*	Eliminação total dos vazadouros a céu aberto e aterros controlados / *Total elimination of open-air dumps and controlled landfills*
Reciclagem de recicláveis secos[b] *Recycling of dry recyclablesb*	< 3%	Aumentar para 20% da fração reciclável *Increase the recyclable fraction to 20%*
Recuperação energética de resíduos não recicláveis *Energy recovery from non-recyclable waste*	Projetos em desenvolvimento / *Projects under development*	30% dos resíduos não recicláveis com valorização energética / *30% of non-recyclable waste with energy recovery*
Aproveitamento de resíduos orgânicos[b] / *Organic waste valorization*[b] (Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos) *(Organic Fraction of Municipal Solid Waste)*	2,7% com compostagem ou biodigestão *2.7% with composting or biodigestion*	13,5% dos resíduos orgânicos com tratamento adequado *13.5% of organic waste with adequate treatment*
Inclusão de catadores / *Inclusion of waste pickers* (com contratos formais / *with formal contract*)	Presença em 1.630 municípios[a] *Presence in 1,630 municipalities*[a]	Universalização da contratação em municípios com coleta seletiva / *Universalization of contracting in municipalities with selective collection*
Planos de gestão municipais/regionalizados *Municipal/regional management plans*	Pouco mais de 44% dos municípios possuem planos de gestão de resíduos sólidos em conformidade com a PNRS *Just over 44% of municipalities have solid waste management plans in compliance with the PNRS*	100% dos municípios com planos de gestão atualizados *100% of municipalities with updated management plans*

Notas: [a] participantes SINISA-Resíduos 2024: Adesão de 4.778 municípios ao Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico. / *Notes: [a] SINISA-Waste 2024 participants: 4,778 municipalities joined the National Basic Sanitation Information System.*
[b]em relação à massa total de RSU. / [b]*in relation to the total mass of MSW.*
Fonte: elaborada pelos autores com base em [5,6,4,1] / *Source: prepared by the authors based on* [5,6,4,1]

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA BAHIA

MSW processing units in Brazil comprise infrastructure dedicated to the management and treatment of solid waste, ranging from simple disposal of in open dumps to advanced material recovery systems. These units are classified into three main categories:

- *Transfer units, where waste is transferred to larger capacity vehicles;*
- *Treatment units, where waste is subjected to physical, chemical, and/or biological processes to reduce volume, recover materials, and mitigate environmental impacts; and*
- *Final disposal units, intended for the disposal of waste that is not technically or economically viable for reuse, such as sanitary landfills and inert material landfills* [6].

Brazil currently has 6,170 processing units distributed among these categories, as shown in Table 3.2.

According to the data shown in Table 5.2, the country still has 1,923 inadequate disposals units, such as open dumps and controlled landfills, with the North and Northeast regions having the highest number of these units.

In terms of gravimetric composition, which corresponds to the proportion, expressed in percentages, between the weight of each component fraction of solid waste (such as organic matter, paper, plastic, met-

As unidades de processamento de RSU no País compreendem infraestruturas voltadas ao manejo e tratamento dos resíduos sólidos, variando desde a simples disposição em vazadouros a céu aberto até sistemas avançados de recuperação de materiais. Essas unidades são classificadas em três categorias principais:

- Unidades de transferência, onde ocorre o transbordo dos resíduos para veículos de maior capacidade;
- Unidades de tratamento, nas quais os resíduos são submetidos a processos físicos, químicos e/ou biológicos com o objetivo de reduzir o volume, recuperar materiais e mitigar impactos ambientais; e
- Unidades de disposição final, destinadas ao descarte de rejeitos que não apresentam viabilidade técnica ou econômica de reaproveitamento, como aterros sanitários e aterros de inertes [6].

O Brasil contabiliza, atualmente, 6.170 unidades de processamento distribuídas entre essas categorias, conforme apresentado na *Tabela 3.2*.

Conforme os dados exibidos na *Tabela 5.2*, o País ainda conta com 1.923 unidades de disposição inadequadas, tais como vazadouros a céu aberto e aterros controlados, sendo que as regiões Norte e Nordeste apresentam os maiores números dessas unidades.

Em termos de composição gravimétrica, que corresponde à proporção, expressa em percentuais, entre o peso de cada fração componente dos resíduos sólidos (como matéria orgânica, papel, plástico, metais e vidro, entre outros) e o peso total dos resíduos coletados, o fluxo de resíduos sólidos gerados no País é composto, principalmente, por resíduos de alimentos e resíduos verdes (43,2%), seguido pelas categorias de "outros" (22,2%) e plásticos (15,3%). A distribuição da composição gravimétrica está apresentada na *Figura 3.2*.

Em 2023, o Brasil gerou e coletou, aproximadamente, 78,2 milhões de t de RSU, o que corresponde a uma média per capita de 1,04 kg/hab.dia. Desse total, cerca de 73,11 milhões de t foram destinadas à disposição final em solo, a qual engloba diferentes formas de destinação de resíduos sólidos, incluindo o aterro sani-

Tabela 3.2 Unidades de processamento de resíduos sólidos.
Table 3.2 *Solid waste processing units.*

Tipo de unidade de processamento de resíduos sólidos *Type of solid waste processing unit*	Quantidade de unidades de processamento por macrorregião geográfica *Number of processing units by geographic macro-region*					Total de unidades / *Total units*	
	Norte *North*	Nordeste *Northeast*	Sudeste *Southeast*	Sul *South*	Centro-Oeste *Central-West*	Valor absoluto *Absolute value*	Valor relativo *Relative value* (%)
Unidade de transbordo / *Transshipment unit*	11	32	190	127	31	391	6,3%
Aterro sanitário / *Sanitary landfill*	20	68	363	193	44	688	11,2%
Aterro de inertes / *Inert material landfill*	29	60	270	262	37	658	10,7%
Lixão ou vazadouro / *Open dumps*	308	763	218	61	256	1.606	26,0%
Aterro controlado / *Controlled landfill*	35	64	162	116	18	317	5,1%
Unidade de manejo de resíduos de áreas verdes (galhadas e podas) *Green area waste management unit (branches and pruning)*	9	17	116	19	9	229	3,7%
Unidade de triagem (galpão ou usina) / *Sorting unit (warehouse or plant)*	50	263	842	709	159	2.023	32,8%
Unidade de compostagem / *Composting unit*	4	14	55	40	5	118	1,9%
Área de Transbordo e Triagem de resíduos da construção civil e volumosos (ATT) / *Transshipment and sorting area for construction and bulky waste (ATT)*	2	14	60	40	5	137	2,2%
Unidade de coprocessamento / *Co-processing unit*	0	0	1	1	1	3	0,0%
Total	468	1.295	2.254	1.588	565	6.170	100,0%

Fonte: adaptada de [6]. / *Source: adapted from* [6].

tário, o vazadouro a céu aberto e o aterro controlado [6], conforme apresentado na *Figura 3.3*.

No que se refere ao tipo de disposição, 74,4% dos resíduos foram encaminhados para aterros sanitários, totalizando 688 unidades em operação no País. Por outro lado, 15,3% (cerca de 11 milhões de t) foram destinados a 1.606 vazadouros a céu aberto, e 10,3% (aproximadamente, 7 milhões de t), a 317 aterros controlados [6], revelando a persistência de práticas inadequadas de disposição final, em desacordo com os princípios estabelecidos pela *PNRS*.

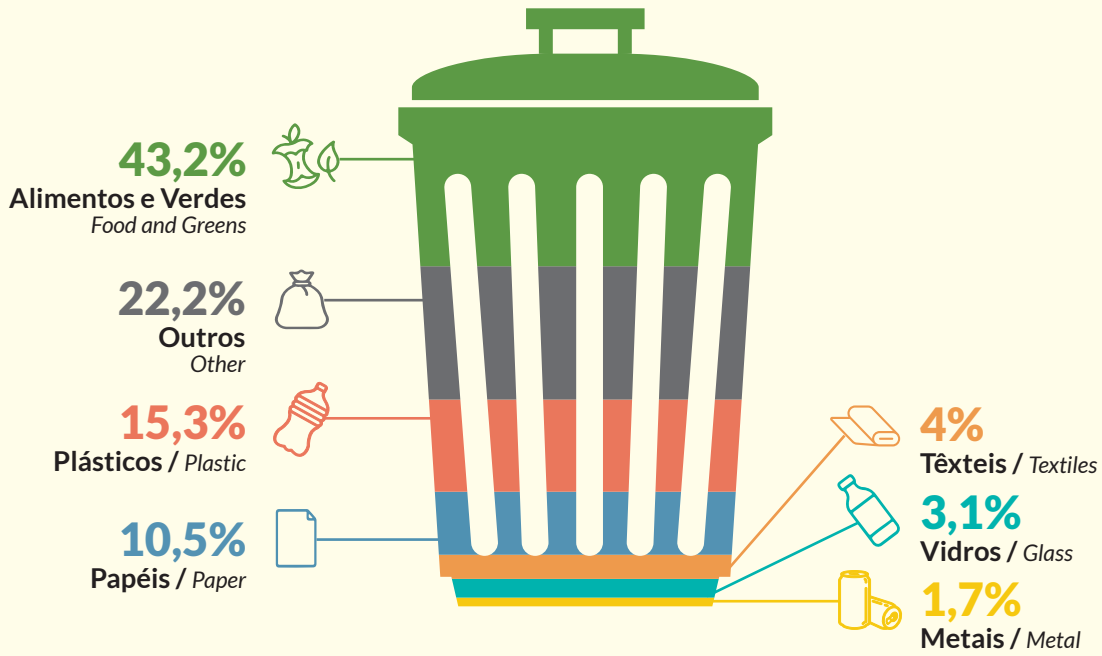
als, and glass, among others) and the total weight of the waste collected, the solid waste stream generated in the country is composed mainly of food waste and green waste (43.2%), followed by the "other" categories (22.2%) and plastics (15.3%). The distribution of gravimetric composition is shown in Figure 3.2.

In 2023, Brazil generated and collected approximately 78.2 million tons of MSW, corresponding to a per capita average of 1.04 kg/inhabtants.day. Of this total, approximately 73.11 million tons were destined for final disposal in land, which encompasses different forms of solid waste disposal, including sanitary landfills, open dumps, and controlled landfills [6], as shown in Figure 3.3.

Regarding the type of disposal, 74.4% of the waste was sent to sanitary landfills, totaling 688 units in operation in the country. On the other hand, 15.3% (approximately 11 million tons) were sent to 1,606 open dumps, and 10.3% (approximately 7 million tons) to 317 controlled landfills [6], revealing the persistence of inadequate final disposal practices, in disagreement with the principles established by the PNRS.

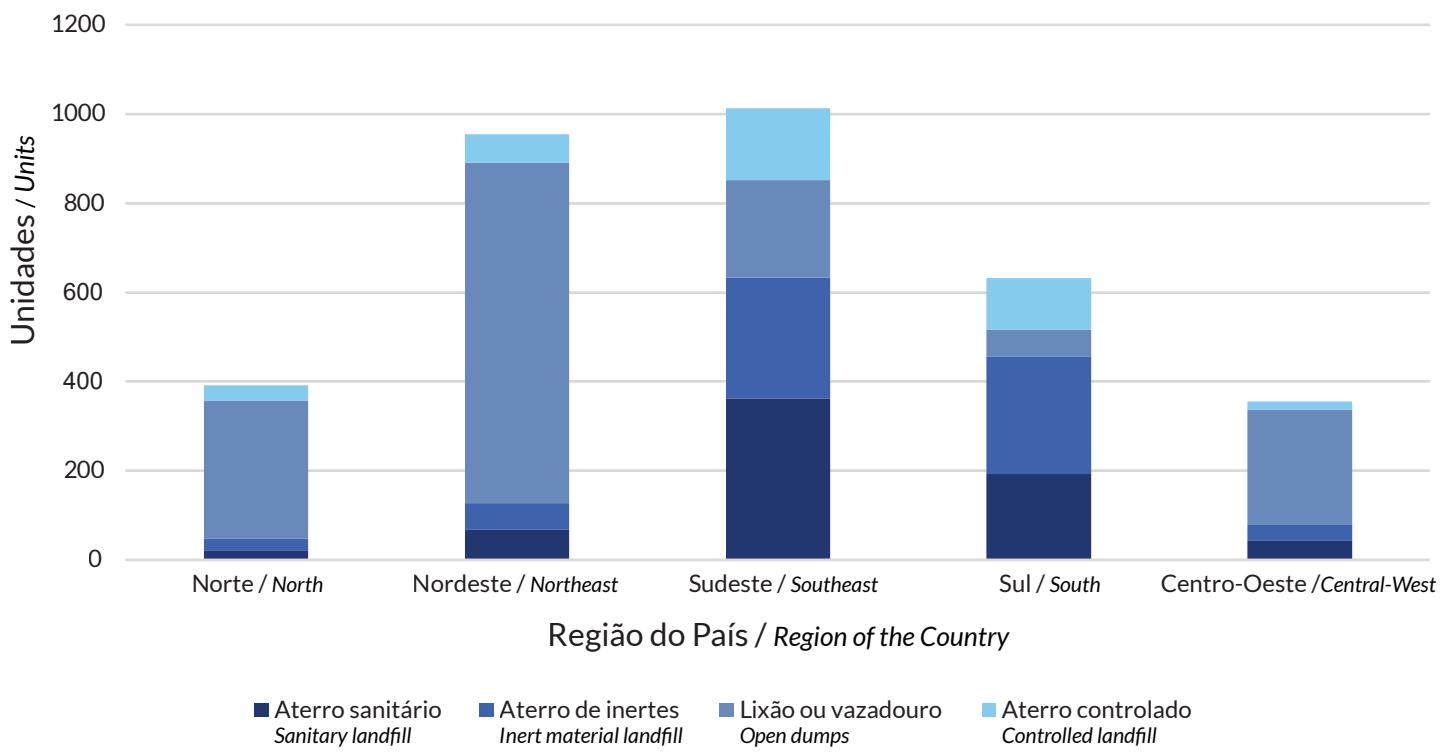
According to selective waste collection data, Brazil recovered 159,040 tons of organic recyclable materials and 1,171,420 tons of dry materials in 2023. Furthermore, initiatives to produce refuse-derived fuel (RDF) (Figure 3.4) have been identified in the country, which represents an alternative for the use of MSW that is no longer viable for reuse or recycling, according to the PNRS hierarchy. The process involves sorting and grinding materials with a high heating value, resulting in a fuel used primarily in industrial furnaces, particularly in the cement industry, which uses it in co-processing. In 2023, an estimated 47,600 tons of RDF were produced in Brazil, from 144,200 tons of MSW, which corresponds to only 0.2% of national waste generation [5].

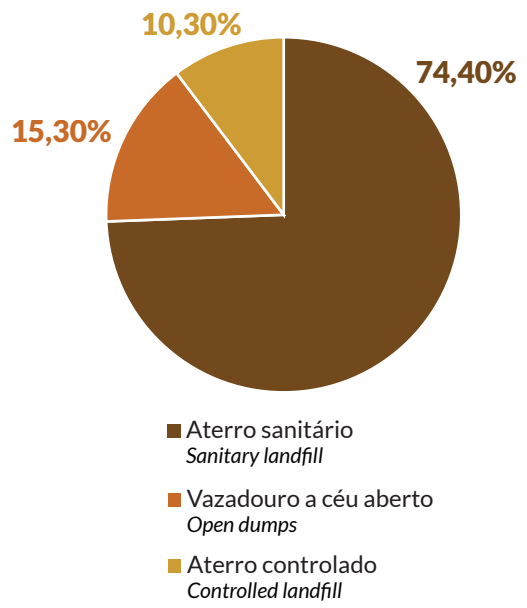
Figura 3.2 Composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil.
Figure 3.2 *Average gravimetric composition of municipal solid waste generated in Brazil.*



Fonte: Adaptada de [6]. / *Source: Adapted from* [6].

Figura 3.3 Distribuição regional da disposição final dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2024, considerando dados do ano-base 2023.
Figure 3.3 *Regional distribution of the final disposal of municipal solid waste collected in Brazil in 2024, considering data from the base year 2023.*





Fonte: Adaptada de [6]. / *Source: Adapted from* [6].

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA BAHIA

In 2023, approximately 4.6 million tons of MSW were open burned in Brazil [5], an illegal practice that occurs mainly in rural or remote areas without formal collection coverage, posing an environmental and health risk. In the same year, the waste sector accounted for 92 million tons of CO_2e (4% of national emissions), a 1% increase compared to 2022, although remaining stable over the last five years (Figure 3.5). Landfill disposal was the main source (65.4% of sectoral emissions), with methane generated by organic decomposition standing out. Composting contributed minimally (<0.1%), while incineration and open burning accounted for approximately 1.6 $MtCO_2e$ [7].

In the context of the national energy mix, the main form of energy recovery from waste continues to be the use of biogas for electricity generation, with an annual production of approximately 2.757 billion Nm^3. Next in line is biomethane production, with an installed capacity of 1.744 billion Nm^3 per year. It should be noted that MSW or sanitary sewage correspond to approximately 60% of the national installed capacity, totaling approximately 2.855 billion Nm^3 per year. Among Brazilian states, São Paulo and Rio de Janeiro have the largest installed capacities, with 1,555 and 579 million Nm^3 per year, respectively [8]

Furthermore, projects under construction, such as the Barueri Energy Recovery Unit in the State of São Paulo, are scheduled to begin operations in 2027 and are expected to process 300,000 tons of MSW per year, generating energy for approximately 320,000 people [9]. Another example is the MSW Power Generation Plant of the Paranapanema Valley Intermunicipal Consortium (Civap), which is building a plant in the municipality of Palmital, São Paulo, that will utilize the Advanced Municipal Solid Waste Energy Recovery System (Save-RSU). This plant will transform waste into electricity through the gasification of RDF, with a processing capacity of 157 tons per day [10].

3.3 MUNICIPAL SOLID WASTE IN BAHIA: TERRITORIAL ANALYSIS, GENERATION, COMPOSITION, AND FINAL DISPOSAL

The Bahia State Secretariat of Urban Development (SEDUR) released the State Solid Waste Plan (PERS-Bahia), which defines guidelines for integrated waste management in the state. In accordance with State Law nº. 10705/2007, the 417 municipalities of Bahia were grouped into 27 Identity Territories, established based on socioeconomic, cultur-

De acordo com os dados da coleta seletiva, o Brasil recuperou, em 2023, 159.040 t de materiais recicláveis orgânicos e 1.171.420 t de materiais secos. Além disso, têm sido evidenciadas no País iniciativas de produção de combustível derivado de resíduos urbanos (CDRU) *(Figura 3.4)*, que representa uma alternativa para o aproveitamento de RSU que não possuem mais viabilidade de reutilização ou reciclagem, conforme a hierarquia da *PNRS*. O processo envolve a triagem e trituração de materiais com alto poder calorífico, resultando em um combustível utilizado principalmente em fornos industriais, com destaque para a indústria cimenteira, que o emprega no coprocessamento. Em 2023, estima-se que foram produzidas 47,6 mil t de CDRU no Brasil, a partir de 144.200 t de RSU, o que corresponde a apenas 0,2% da geração nacional de resíduos [5].

Em 2023, cerca de 4,6 milhões de t de RSU foram incineradas a céu aberto no Brasil [5], prática ilegal que ocorre sobretudo em áreas rurais ou afastadas, sem cobertura de coleta formal, representando risco ambiental e sanitário. No mesmo ano, o setor de resíduos respondeu por 92 milhões de t de CO_2e (4% das emissões nacionais), com aumento de 1% em relação a 2022, embora mantendo estabilidade nos últimos cinco anos (*Figura 3.5)*. A disposição final em aterros sanitários foi a principal fonte (65,4% das emissões setoriais), destacando-se o metano gerado pela decomposição orgânica. A compostagem teve contribuição ínfima (<0,1%), enquanto a incineração e a queima a céu aberto corresponderam a cerca de 1,6 $MtCO_2e$ [7].

No contexto da matriz energética nacional, a principal forma de aproveitamento energético de resíduos continua sendo a utilização do biogás para a geração de energia elétrica, com uma produção anual de aproximadamente 2.757 milhões de Nm^3. Em seguida, destaca-se a produção de biometano, cuja capacidade instalada atinge 1.744 milhões de Nm^3 por ano. Ressalte-se que os RSU ou o esgoto sanitário correspondem a cerca de 60% da capacidade instalada nacional, totalizando, aproximadamente, 2.855 milhões de Nm^3 anuais. Entre os estados brasileiros, São Paulo e Rio de Janeiro concentram as maiores capacidades instaladas, com 1.555 e 579 milhões de Nm^3 por ano, respectivamente [8]

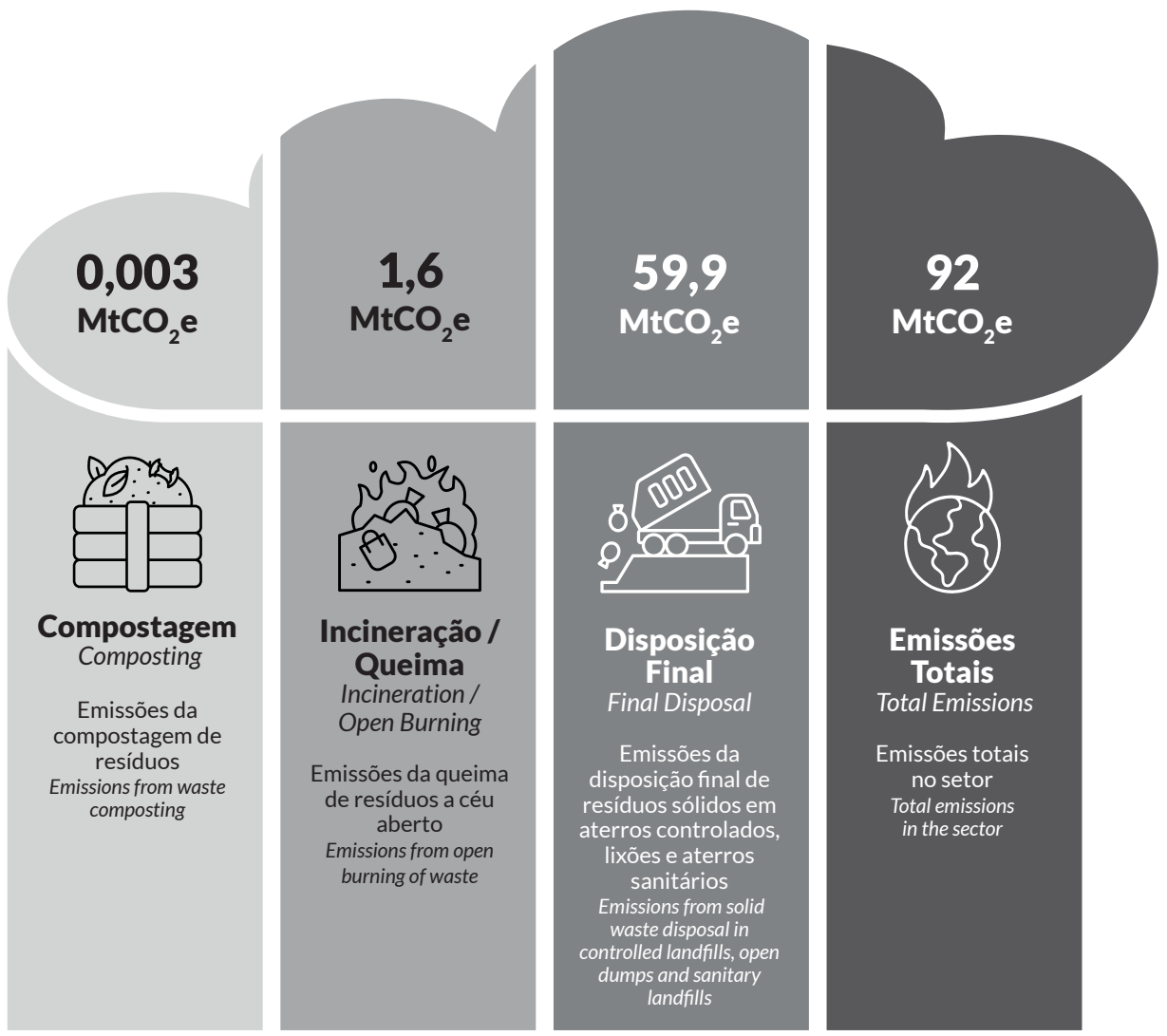
Além disso, empreendimentos em construção, como a Unidade de Recuperação de Energia de Barueri, em São Paulo, têm previsão de entrada em operação em 2027 e deverão processar 300 mil t de RSU por ano, gerando energia para cerca de 320 mil pessoas [9]. Outro exemplo é a Usina de Geração de Energia com RSU do Consórcio Intermunicipal do Vale do Paranapanema (Civap), que está construindo uma usina em Palmital, São Paulo, que utilizará o Sistema Avançado de Valorização Energética de Resíduos Sólidos Urbanos (Save-RSU). Essa usina transformará resíduos em energia elétrica a partir da gaseificação de CDRU, com capacidade de processamento de 157 t por dia [10].

Figura 3.4 Processamento de combustível derivado de resíduos urbanos.
Figure 3.4 *Refuse-derived fuel processing.*



Foto / *Photo:* Martin Mecnarowski / stock.adobe.com

Figura 3.5 Distribuição das emissões de gases de efeito estufa no setor de resíduos. Ano base 2023.
Figure 3.5 *Distribution of greenhouse gas emissions in the waste sector. Base year 2023*



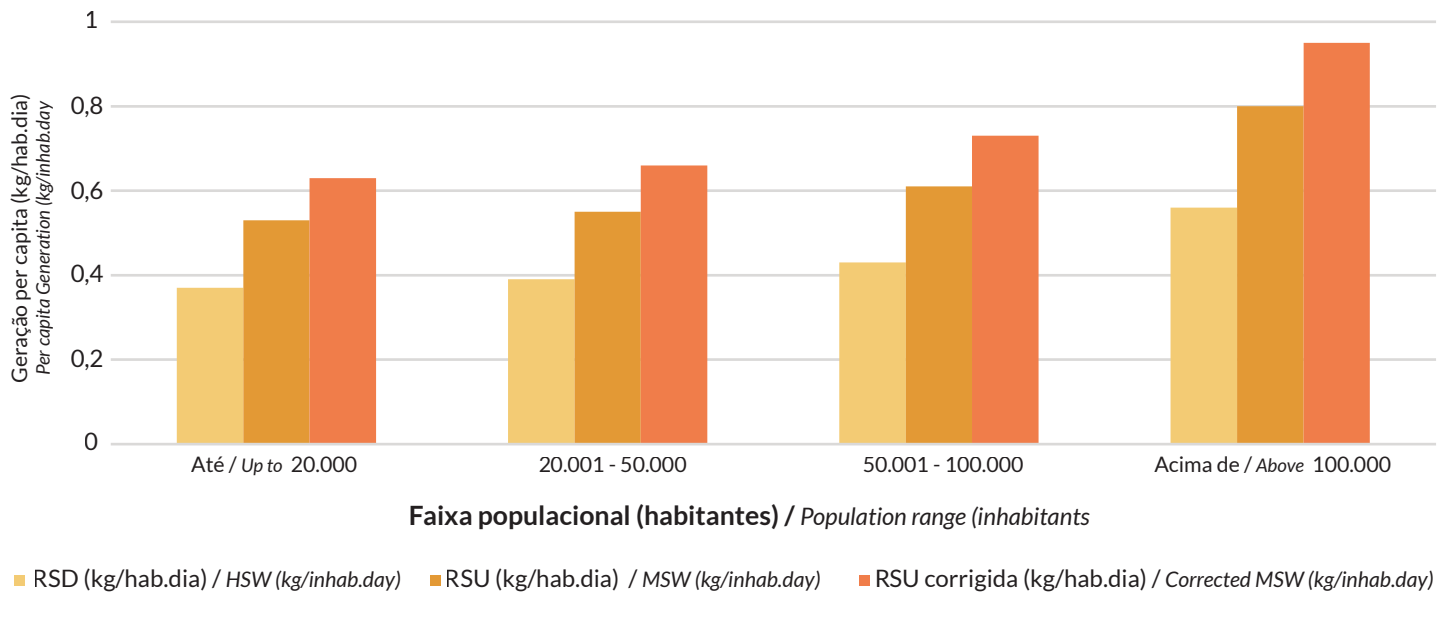
Fonte: adaptada de [7]. *Source: adapted from* [7].

3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA BAHIA: ANÁLISE TERRITORIAL, GERAÇÃO, COMPOSIÇÃO E DESTINAÇÃO FINAL

A Secretaria de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia (Sedur) disponibilizou o *Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS-BAHIA)*, que define diretrizes para a gestão integrada de resíduos no Estado. Em conformidade com a *Lei Estadual nº 10.705/2007*, os 417 municípios baianos foram agrupados em 27 Territórios de Identidade, estabelecidos com base em critérios socioeconômicos, culturais, políticos, ambientais e físicos, constituindo unidades de referência para o diagnóstico e o planejamento de políticas públicas. No contexto da gestão de resíduos sólidos, essa divisão territorial tem sido adotada como base metodológica para subsidiar a formulação de propostas e a construção de um panorama regionalizado e integrado da situação dos resíduos no Estado [11]. Observa-se que, considerando as diferentes faixas populacionais municipais, a geração *per capita* de RSU varia de 0,63 a 0,95 kg/hab.dia, conforme apresentado na *Figura 3.6*.

Com base na composição gravimétrica, os RSU gerados no Estado da Bahia apresentam, em média, 55,9% de matéria orgânica, seguidos pelas frações de plásticos (21,0%) e de papel/papelão (9,44%). A distribuição dessa composição é apresentada por bloco na *Figura 3.7*.

Figura 3.6 Geração per capita de resíduos sólidos domiciliares (RSD) e resíduos sólidos urbanos (RSU) segundo a categorização dos municípios amostrados no PERS-BA, estratificados por faixas populacionais.
Figure 3.6 *Per capita generation of household solid waste (HSW) and municipal solid waste (MSW) according to the categorization of municipalities sampled in PERS-BA, stratified by population groups.*

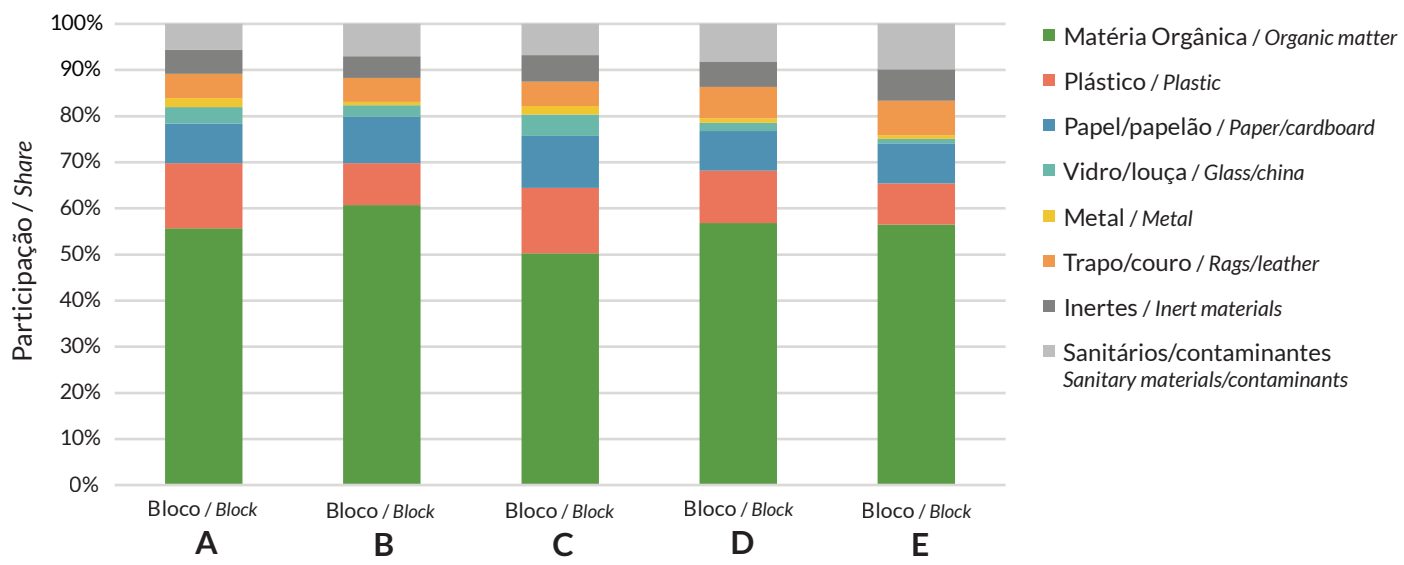


Fonte: adaptado de [11]. *Source: adapted from* [11].

al, political, environmental, and physical criteria, constituting reference units for the diagnosis and planning of public policies. In the context of solid waste management, this territorial division has been adopted as a methodological basis to support the formulation of proposals and the construction of a regionalized and integrated overview of the waste situation in the state [11]. It can be observed that, considering the different municipal population ranges, the per capita generation of MSW varies from 0.63 to 0.95 kg/inhabtants.day, as shown in Figure 3.6.

Based on gravimetric composition, MSW generated in the State of Bahia contains, on average, 55.9% organic matter, followed by plastic (21.0%) and paper/cardboard (9.44%) fractions. The distribution of this composition is shown by block in Figure 3.7.

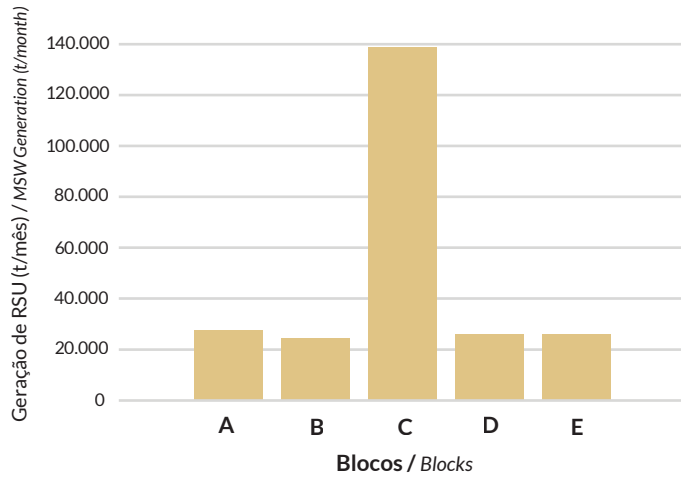
Figura 3.7 Estimativa da geração de RSU e a composição gravimétrica por Território de Identidade.
Figure 3.7 *Estimated MSW generation and gravimetric composition by Identity Territory.*



Bloco A ***/ Block A*** TI 05 – Litoral Sul; TI 06 – Baixo Sul; TI 07 – Extremo Sul; TI 08 – Médio Sudoeste da Bahia; TI 27 – Costa do Descobrimento
Bloco B ***/ Block B:*** TI 09 – Vale do Jiquiriçá; TI 12 – Bacia do Paramirim; TI 13 – Sertão Produtivo; TI 20 – Sudoeste Baiano; TI 22 – Médio Rio de Contas
Bloco C ***/ Block C:*** TI 15 – Bacia do Jacuípe; TI 18 – Litoral Norte e Agreste; TI 19 – Portal do Sertão; TI 21 – Recôncavo Baiano; TI 26 – Metropolitano de Salvador

Bloco D ***/ Block D:*** TI 04 – Sisal; TI 10 – Sertão do São Francisco; TI 16 – Piemonte Diamantina; TI 17 – Semiárido Nordeste II; TI 24 – Itaparica; TI 25 – Piemonte Norte do Itapirucu
Bloco / E ***Block E:*** TI 01 – Irecê; TI 02 – Velho Chico; TI 03 – Chapada Diamantina; TI 14 – Bacia do Rio Grande; TI 23 – Piemonte Paraguaçu; TI 28 – Bacia do Rio Corrente

Geração total de RSU por bloco – 2023
Total MSW generation by block – 2023



Fonte: adaptada de [11]. *Source: adapted from* [11].

Based on the reported data, the Identity Territories comprising Block C, except for the 'Bacia do Jacuípe' Identity Territory, are the main generators of MSW in Bahia, with particular emphasis on the 'Metropolitano de Salvador' Identity Territory. The latter accounts for approximately 36.5% of the state's monthly waste generation. Regarding final disposal units, Bahia has 345 open landfills in operation and 31 small, uncharacterized landfills also in operation [11]. Selective waste collection in Blocks A and E is mostly informal and poorly structured, with practices concentrated on waste pickers working in landfills and public roads. Municipalities with formal programs, such as Salvador and Camaçari, have limited monitoring. Collection reaches over 90% of urban areas but is insufficient in rural areas. Only 40% of municipalities have legal sanitation instruments, compromising planning and universal service provision [11].

3.4 ENERGY RECOVERY FROM MSW: BENEFITS AND CHALLENGES IN THE BRAZILIAN CONTEXT

Energy recovery from municipal solid waste (MSW) presents integrated benefits from environmental, social, health, and economic perspectives. From an environmental perspective, it helps reduce the volume of waste sent to landfills and mitigates the impacts of improper disposal, such as greenhouse gas emissions and soil and water contamination. At the same time, it promotes the circular economy (Figure 3.8) by means of technologies such as incineration with energy recovery, biodigestion, and gasification, which transform waste into electrical energy, thermal energy, or alternative fuels.

From a social perspective, the implementation of these systems generates direct and indirect jobs in the collection, sorting, operation, and maintenance stages. Furthermore, it enables the integration of waste pickers and cooperatives into formal value chains, promoting inclusion and better working conditions. At the same time, community engagement and environmental education programs are essential to strengthen the acceptance and sustainability of these initiatives.

From a sanitary perspective, the energetic treatment of MSW reduces the exposure of the population and workers to pathogens and disease vectors common in landfills, eliminating organic fractions susceptible to decomposition and the generation of odors and leachate. This results in improved environmental health conditions.

Finally, from an economic perspective, energy recovery adds value to waste management by generating revenue from the sale of electricity, biogas, or derived fuels, reducing disposal costs, and participating in carbon credit markets. However, its viability depends on regional analyses related to waste volume, available infrastructure, and incentive policies.

Despite its benefits, implementing this strategy in Brazil faces several barriers. Regulatory barriers include fragmented competencies and the lack of specific standards. Economically, the main obstacles are related to high costs and limited financing. From a technological perspective, the heterogeneity and high moisture content of waste, in addition to limited experience with advanced technologies, pose significant challenges. Social barriers include community resistance, while structural barriers involve low collection efficiency, high logistical costs, and a lack of integration with sectors such as sanitation and energy.

3.5 ESTIMATED ENERGY POTENTIAL FROM MSW

3.5.1 CALCULATION METHODOLOGY

Energy recovery from municipal solid waste (MSW) occurs through three main pathways: thermochemical (focused on waste with low moisture content, with processes such as incineration, gasification, and pyrolysis), biochemical (applied to wet and organic waste, such as anaerobic digestion, which generates biogas and biofertilizer), and physicochemical (focused on improving properties by means of drying, separation, and compaction, producing pellets or high-heating-value RDF) [12].

Biogas can be used for combined heat and power (CHP) or purified into biomethane [13], while other fuels, such as ethanol, methanol, biodiesel, and hydrogen, can also be obtained from waste. Sanitary landfills, in addition to serving as a final disposal site for MSW, allow the

Com base nos dados reportados, observa-se que os Territórios de Identidade integrantes do Bloco C, com exceção do TI Bacia do Jacuípe, configuram-se como os principais geradores de RSU na Bahia, com destaque para o Território Metropolitano de Salvador. Este último responde por, aproximadamente, 36,5% da geração mensal de resíduos do Estado. No que se refere às unidades de destinação final, a Bahia apresenta 345 vazadouros a céu aberto em operação e 31 aterros sanitários de pequeno porte descaracterizados igualmente em operação [11]. A coleta seletiva nos blocos A E é majoritariamente informal e pouco estruturada, com práticas concentradas em catadores atuando em vazadouros e vias públicas. Municípios com programas formais, como Salvador e Camaçari, apresentam monitoramento limitado. A coleta atinge mais de 90% das áreas urbanas, mas é insuficiente em zonas rurais. Apenas 40% dos municípios possuem instrumentos legais de saneamento, comprometendo o planejamento e a universalização do serviço [11].

3.4 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RSU: BENEFÍCIOS E DESAFIOS NO CONTEXTO BRASILEIRO

O aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) apresenta benefícios integrados sob as perspectivas ambiental, social, sanitária e econômica. Do ponto de vista ambiental, contribui para a redução do volume destinado a aterros sanitários e mitiga os impactos da disposição inadequada, como a emissão de gases de efeito estufa e a contaminação do solo e da água. Ao mesmo tempo, promove a economia circular *(Figura 3.8)* por meio de tecnologias como a incineração com recuperação energética, a biodigestão e a gaseificação, que transformam resíduos em energia elétrica, térmica ou combustíveis alternativos.

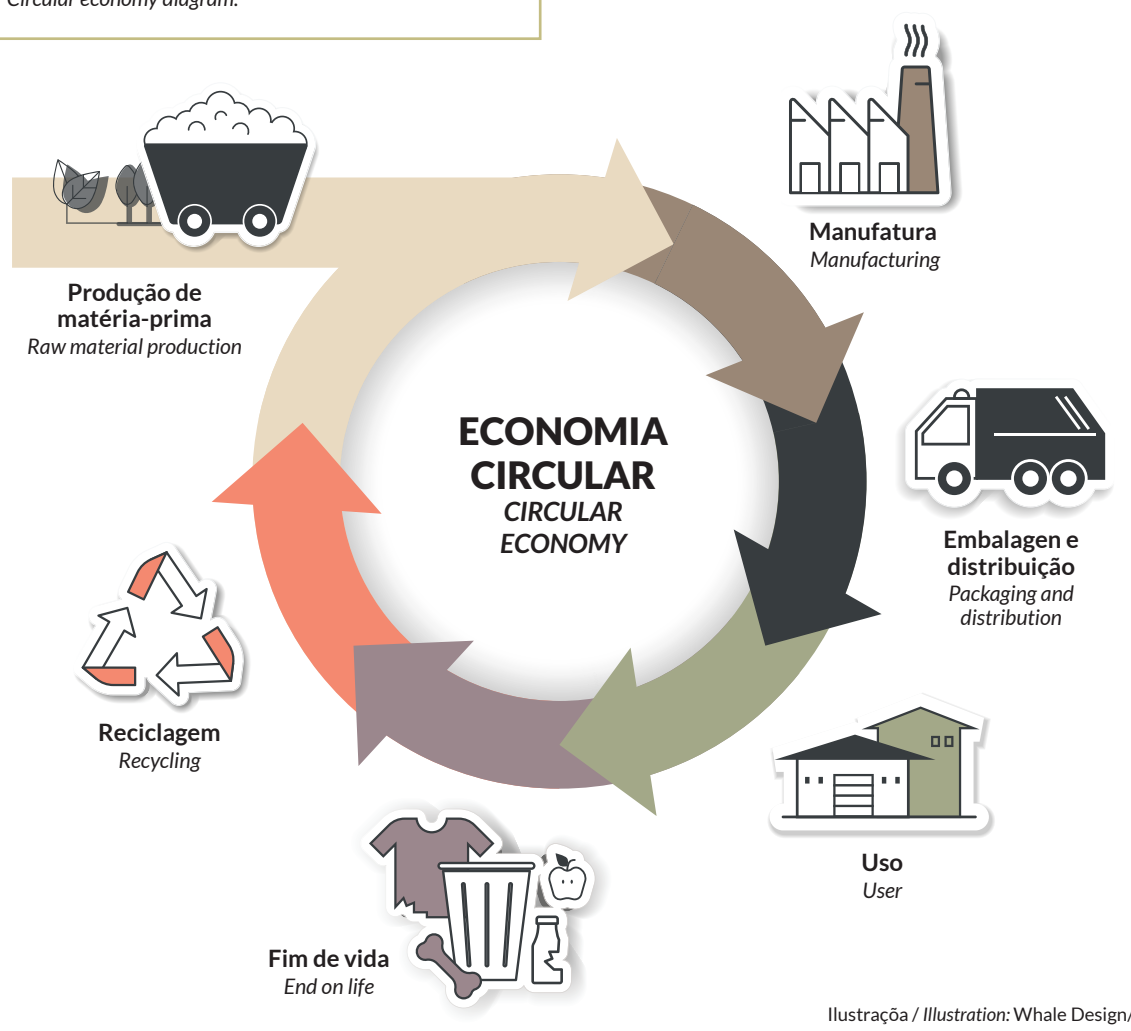
No âmbito social, a implementação desses sistemas gera empregos diretos e indiretos nas etapas de coleta, triagem, operação e manutenção. Além disso, possibilita a integração de catadores e cooperativas em cadeias formais de valor, promovendo a inclusão e melhores condições de trabalho. Paralelamente, o engajamento comunitário e os programas de educação ambiental são fundamentais para fortalecer a aceitação e a sustentabilidade das iniciativas.

Sob o enfoque sanitário, o tratamento energético dos RSU reduz a exposição da população e dos trabalhadores a agentes patogênicos e vetores de doenças comuns em vazadouros, eliminando frações orgânicas suscetíveis à decomposição e à geração de odores e lixiviados. Isso resulta em melhores condições de salubridade ambiental.

Por fim, do ponto de vista econômico, o aproveitamento energético agrega valor à gestão de resíduos por meio da geração de receita com a comercialização de energia elétrica, biogás ou combustíveis derivados, da redução de custos com a destinação final e da participação em mercados de créditos de carbono. Contudo, sua viabilidade depende de análises regionais relacionadas ao volume de resíduos, à infraestrutura disponível e às políticas de incentivo.

Apesar de seus benefícios, a implementação dessa estratégia no Brasil enfrenta diversas barreiras. Entre as barreiras regulatórias, destacam-se a fragmentação de competências e a ausência de normas específicas. No campo econômico, os principais entraves estão relacionados aos altos custos e à dificuldade de financiamento. Do ponto de vista tecnológico, a heterogeneidade e o elevado teor de umidade dos resíduos, além da limitada experiência com tecnologias avançadas, representam desafios significativos. As barreiras sociais incluem a resistência comunitária, enquanto as estruturais envolvem a baixa eficiência da coleta, os elevados custos logísticos e a falta de integração com setores como saneamento e energia.

Figura 3.8 Diagrama de economia circular.
Figure 3.8 *Circular economy diagram.*



Ilustraçõa / *Illustration:* Whale Design/stock.adobe.com

3.5 POTENCIAIS ENERGÉTICOS ESTIMADOS A PARTIR DOS RSU

3.5.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO

A valorização energética dos resíduos sólidos urbanos (RSU) ocorre por três vias principais: termoquímica (voltada para resíduos com baixa umidade, com processos como incineração, gaseificação e pirólise), bioquímica (aplicada a resíduos úmidos e orgânicos, como na digestão anaeróbia, que gera biogás e biofertilizante) e físico-química (focada no aprimoramento das propriedades por meio de secagem, separação e compactação, originando *pellets* ou CDRU de alto poder calorífico) [12].

O biogás pode ser utilizado para a cogeração de eletricidade e calor ou purificado em biometano [13], enquanto outros combustíveis, como etanol, metanol, biodiesel e hidrogênio, também podem ser obtidos a partir de resíduos. Os aterros sanitários, além de funcionarem como destino final de RSU, permitem a captura do gás de aterro (metano e CO_2), que pode ser aproveitado para geração de energia e mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

A conversão de resíduos em energia (em inglês *Waste-to-Energy – WtE*) complementa a reciclagem, promovendo o saneamento, a segurança energética e a redução dos impactos ambientais [14]. A eficiência desses processos depende da segregação adequada na fonte e do conhecimento da composição gravimétrica dos RSU, que varia conforme fatores socioeconômicos e culturais e influencia diretamente a viabilidade e o desempenho das unidades de recuperação energética (UREs) no planejamento da gestão sustentável de resíduos.

A seguir, apresentam-se as metodologias e as premissas da valorização energética dos RSU por meio de tecnologias de conversão térmica e biológica, incluindo digestão anaeróbia, captura de biogás em aterros, gaseificação e incineração, voltadas à produção de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio.

3.5.2 QUANTIFICAÇÃO DOS RSU GERADOS NO ESTADO DA BAHIA

A quantificação dos resíduos sólidos urbanos gerados por município no Estado foi realizada com base na população estimada para 2024 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e na geração *per capita* de RSU para o mesmo ano, conforme dados do *Plano Estadual de Resíduos Sólidos da Bahia (PERS-Bahia)* [11].

A partir das informações fornecidas pela Sedur/GAB/SGT/DRES [15], estimou-se a composição gravimétrica dos RSU no Estado. Na ausência de dados específicos para determinados municípios, foram adotados valores médios por Território de Identidade (TI) e, para os TIs sem informações disponíveis, aplicou-se a média estadual calculada a partir do conjunto de dados obtidos.

Para os cálculos, a composição gravimétrica foi reorganizada em categorias agregadas: MO: matéria orgânica (resíduos alimentares e verdes); PAP: papel e papelão (todos os tipos); V: vidro; ME: metal; TX: têxteis (incluindo trapos e couro); PL: plástico; RS: resíduos sanitários; MI: materiais inertes (como Isopor, pedras e similares).

Assim, a *Figura 3.9* exibe a composição gravimétrica média do Estado da Bahia por Território de Identidade, utilizada nos cálculos realizados.

capture of sanitary landfill gas (methane and CO_2), which can be used to generate energy and mitigate greenhouse gas emissions.

Waste-to-Energy (WtE) conversion complements recycling, promoting sanitation, energy security, and reducing environmental impacts [14]. The efficiency of these processes depends on proper segregation at source and knowledge of the gravimetric composition of MSW, which varies according to socioeconomic and cultural factors and directly influences the viability and performance of energy recovery units (ERUs) in sustainable waste management planning.

The following presents the methodologies and premises for energy recovery from MSW through thermal and biological conversion technologies, including anaerobic digestion, landfill biogas capture, gasification, and incineration, aimed at producing biogas, biomethane, electricity, and hydrogen.

3.5.2 QUANTIFICATION OF MSW GENERATED IN THE STATE OF BAHIA

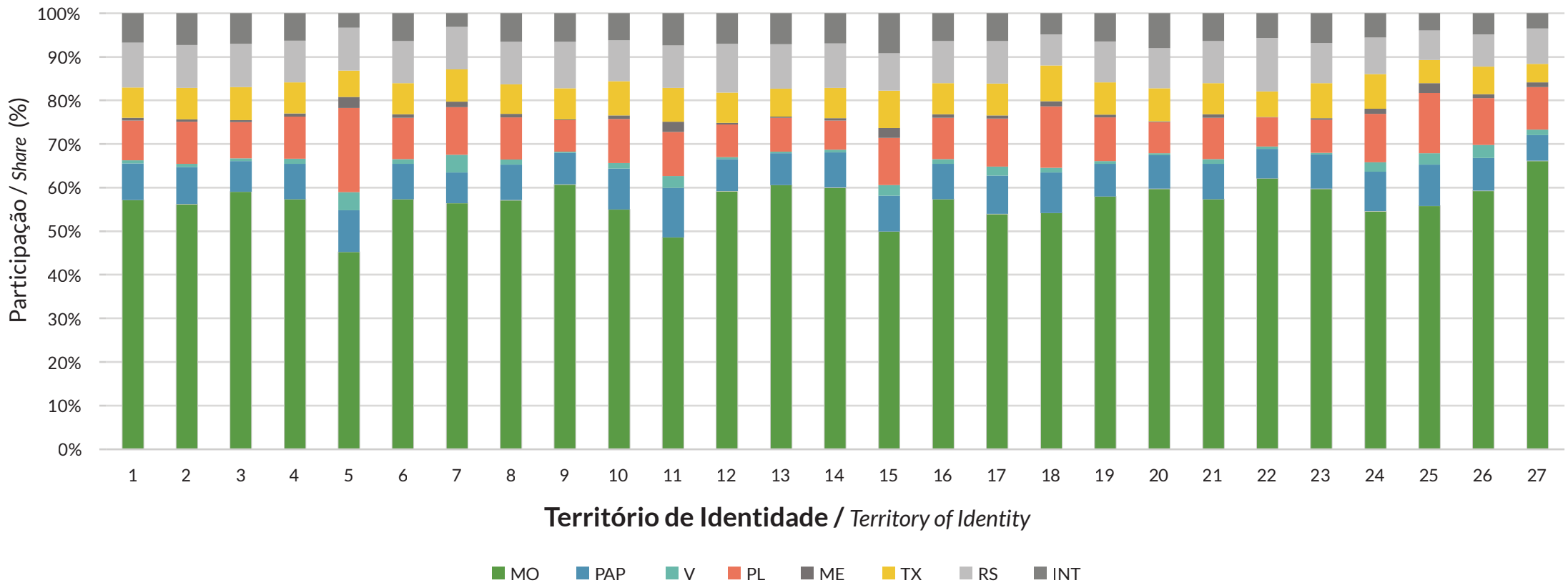
The quantification of municipal solid waste generated by each municipality in the state was based on the population estimated for 2024 by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) and the per capita MSW generation for the same year, according to data from the Solid Waste Management Plan (PERS-Bahia) [11].

Based on information provided by SEDUR/GAB/SGT/DRES (15), the gravimetric composition of MSW in the state was estimated. In the absence of specific data for certain municipalities, average values were adopted by Identity Territory (IT), and for ITs without available information, the state average calculated from the obtained dataset was applied.

For the calculations, the gravimetric composition was reorganized into aggregated categories: MO: organic matter (food and green waste); PAP: paper and cardboard (all types); V: glass; ME: metal; TX: textiles (including rags and leather); PL: plastics; RS: sanitary waste; MI: inert materials (such as Styrofoam, stones, and similar materials).

Thus, Figure 3.9 shows the average gravimetric composition of MSW in the state of Bahia by Identity Territory, used in the calculations.

Figura 3.9 Distribuição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos, segundo os territórios de identidade do Estado da Bahia.
Figure 3.9 *Average gravimetric distribution of municipal solid waste, according to the identity territories of the State of Bahia.*



Fonte: elaborada pelos autores a partir dos dados de [15]. / *Source: prepared by the authors based on data from [15].*

3.5.3 ENERGY RECOVERY FROM MSW IN SANITARY LANDFILLS

The recovery of municipal solid waste in sanitary landfills was estimated based on the methodology of the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo [13]) and aligned with the National Solid Waste Policy (PNRS), established by Law nº. 12305/2010 [1].

Two scenarios were modeled: the scenario, reflecting current practices, and the ideal scenario, based on the Planares 2040 targets, which set a 20% recovery of dry recyclables and 100% collection coverage (Figure 3.10). The analysis considered recycling practices currently in place and planned, including reverse logistics, conventional sorting, and selective collection.

For residual waste (rejected waste) from sorting carried out by cooperatives, the assumption was adopted that 20% of the materials (paper, cardboard, and plastics) have no commercial value [5]. In the absence of specific data on the gravimetric composition of waste disposal of in sanitary landfill, the composition of the generating source was used. Calculations of the production potential for biogas, biomethane, electricity, and hydrogen were based on the municipal population and the average per capita generation of MSW available in [11], with methodological details described in the Appendices of this atlas.

3.5.3.1 METHODOLOGY FOR ESTIMATING BIOGAS GENERATION POTENTIAL

The quantification of methane (CH_4) generated from the anaerobic treatment of municipal solid waste (MSW) disposed of in sanitary landfills was performed based on the methodology of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), in accordance with the 2019 Refinement of the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [16], also adopted in the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo [13].

The calculations considered factors provided by the Brazilian Biogas and Biomethane Association (Abiogas) [17] and secondary data from bibliographic references, including generation coefficients. An average biogas extraction efficiency in sanitary landfills of approximately 75% was adopted, indicating that only this fraction of the biogas produced can be captured and used for different applications. To estimate the total biogas volume, the methane percentage in its composition was considered. The applied mathematical model is detailed in the Appendices of this atlas.

3.5.3.2 METHODOLOGY FOR ESTIMATING BIOMETHANE GENERATION POTENTIAL

To estimate the available biomethane volume, the methane content of the purified gas was considered in accordance with the existing standards set by Resolution ANP 886/2022 of the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), which sets minimum quality requirements for using biomethane as a fuel and requires a methane purity of at least 90% [18]. This specification already accounts for potential methane losses and residual impurities. The mathematical model used for these calculations is described in the Appendices of this atlas.

3.5.3 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RSU EM ATERROS SANITÁRIOS

A valorização dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários foi estimada com base na metodologia do *Atlas de Resíduos do Estado de São Paulo* [13] e alinhada à *Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)*, instituída pela *Lei nº 12.305/2010* [1].

Foram modelados dois cenários: real e ideal (*Figura 3.10*), definidos a partir das metas do *Planares 2040*, que prevê 20% de recuperação de recicláveis secos e 100% de cobertura da coleta. A análise considerou práticas atuais e futuras de reciclagem, incluindo logística reversa, triagem convencional e coleta seletiva.

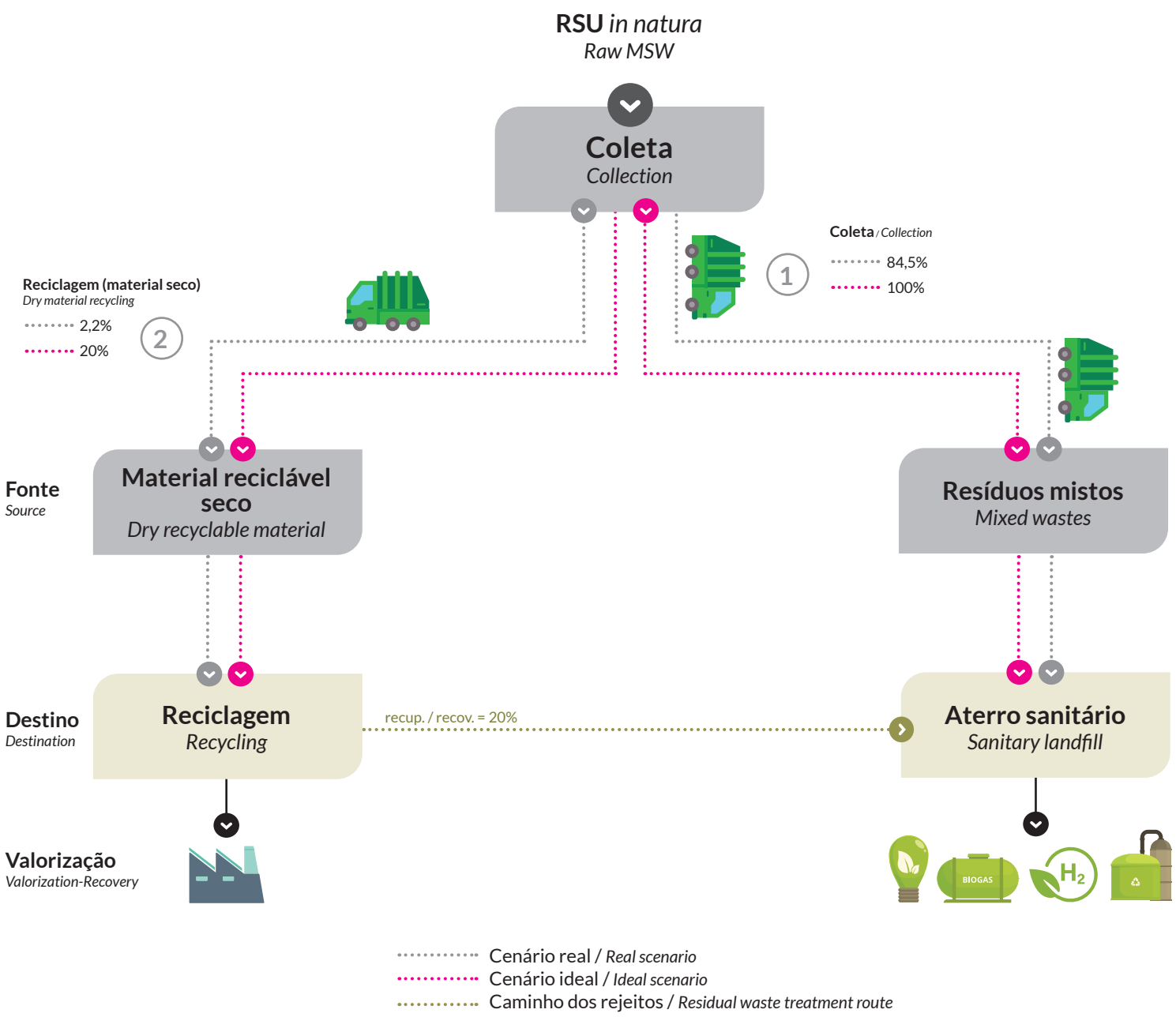
Para os rejeitos da triagem realizada por cooperativas, adotou-se o pressuposto de que 20% dos materiais (papel, papelão e plásticos) não possuem valor comercial [5]. Na ausência de dados específicos sobre a composição gravimétrica dos resíduos dispostos em aterros, utilizou-se a composição da fonte geradora.

Os cálculos do potencial de produção de biogás, biometano, energia elétrica e hidrogênio basearam-se na população municipal e na média de geração per capita de RSU disponível em [11], com o detalhamento metodológico descrito no *Apêndice* do atlas.

3.5.3.1 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

A quantificação do metano (CH_4) gerado a partir do tratamento anaeróbio de resíduos sólidos urbanos (RSU) dispostos em aterros sanitários foi realizada com base na metodologia do *Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas* (em inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*), conforme o *Refinamento de 2019 das Diretrizes do IPCC de 2006 para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa* [16], também adotado no *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [13].

Figura 3.10 Fluxograma da metodologia e premissas adotadas para os cálculos de valorização energética de resíduos sólidos urbanos em Aterros Sanitários.
Figure 3.10 *Flowchart of the methodology and assumptions adopted for calculating the energy recovery of municipal solid waste in Sanitary Landfills.*



Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Os cálculos consideraram fatores fornecidos pela Associação Brasileira de Biogás e Biometano (Abiogas) [17] e dados secundários de referências bibliográficas, incluindo coeficientes de geração. Adotou-se uma eficiência média de extração de biogás em aterros sanitários de, aproximadamente, 75%, indicando que apenas essa fração do biogás produzido pode ser captada e utilizada para diferentes aplicações. Para estimar o volume total de biogás, considerou-se o percentual de metano presente em sua composição. O modelo matemático aplicado encontra-se detalhado no *Apêndice* deste atlas.

3.5.3.2 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOMETANO

Para a estimativa do volume de biometano disponível, considerou-se o teor de metano presente no gás purificado em conformidade com os padrões definidos pela *Resolução ANP nº 886/2022*, que estabelece a qualidade mínima para utilização do biometano como combustível, exigindo pureza de, no mínimo, 90% [18]. Esse valor já contempla eventuais perdas de metano e a presença de impurezas residuais. O modelo matemático empregado para esses cálculos encontra-se descrito no *Apêndice* deste atlas.

3.5.3.3 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

O cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir dos RSU dispostos em aterros sanitários em cada município fundamenta-se no volume de biogás produzido e na utilização de motores de ciclo Otto, tecnologia amplamente empregada no Brasil, embora de origem importada [13]. Para tal estimativa, são utilizados o Poder Calorífico Inferior (PCI) do metano e a concentração de metano presente no biogás de ater-ro, conforme valores obtidos em referências técnicas e igualmente adotados no *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [13].

3.5.3.4 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DO BIOMETANO

Para a estimativa da produção de hidrogênio a partir do biometano, os cálculos foram obtidos a partir de balanços de massa e energia, considerados em operações típicas de unidades industriais que empregam o processo de reforma a vapor convencional. No caso do biometano, adotaram-se as condições operacionais da reforma a vapor do gás natural, uma vez que ambos os combustíveis têm o metano como principal componente. O potencial de produção de hidrogênio por reforma a vapor foi obtido com base no fluxo mássico, conteúdo térmico e PCI do hidrogênio, assegurando maior precisão na avaliação energética. O modelo matemático utilizado está descrito no *Apêndice* deste atlas.

3.5.4 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RSU POR MEIO DE TECNOLOGIAS *WASTE-TO-ENERGY*

A valorização dos resíduos sólidos urbanos por meio de tecnologias *Waste-to-Energy* (WtE), em cada município avaliado, foi estimada com base na destinação final ambientalmente adequada, em conformidade com os princípios da hierarquia de gestão de resíduos estabelecida pela *PNRS*, instituída pela *Lei nº 12.305/2010*. O enfoque recai sobre a reciclagem de materiais secos e da fração orgânica (Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos – Forsu), aliada à promoção do consumo consciente e do descarte adequado. No âmbito dos processos térmicos, a valorização energética é considerada uma estratégia complementar, restrita aos resíduos para os quais não existem alternativas viáveis de tratamento ou recuperação (rejeitos), sendo esses destinados à valorização térmica [14]. Nesse contexto, a *Figura 3.11* apresenta a segregação recomendada pela Confederação Europeia de Centrais de Conversão de Resíduos em Energia (em inglês, *Confederation of European Waste-to-Energy Plants*), no âmbito dos processos térmicos.

3.5.3.3 METHODOLOGY FOR ESTIMATING ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL

The calculation of the electricity generation potential from MSW disposed of in sanitary landfills in each municipality is based on the volume of biogas produced and the use of Otto cycle motor, a technology widely used in Brazil, although of imported origin [13]. For this estimate, the lower heating value (LHV) of methane and the methane concentration in landfill biogas are used, according to values reported in technical references and adopted in the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo [13].

3.5.3.4 METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE HYDROGEN GENERATION POTENTIAL FROM BIOMETHANE

To estimate hydrogen production from biomethane, calculations were derived from mass- and energy-balance methods representative of typical operations in industrial units employing conventional steam reforming. For biomethane, the operating conditions of natural-gas steam reforming were adopted, since both fuels have methane as their principal component. The hydrogen production potential via steam reforming was obtained from the mass flow rate, energy content, and the lower heating value (LHV) of hydrogen, ensuring greater accuracy in the energy assessment. The mathematical model used is described in the Appendix to this Atlas.

3.5.4 ENERGY RECOVERY FROM MSW THROUGH WASTE-TO-ENERGY *TECHNOLOGIES*

Energy recovery from municipal solid waste (MSW) through Waste-to-Energy (WtE) technologies, in each municipality analyzed was estimated based on environmentally appropriate final disposal, in accordance with the waste management hierarchy principles established by the National Solid Waste Policy (PNRS), instituted by Law nº. 12305/2010. The emphasis is on the recycling of dry materials and of the organic fraction (Organic Fraction of Municipal Solid Waste-OFMSW), coupled with the promotion of responsible consumption and proper disposal. Within thermal processes, energy recovery is treated as a complementary strategy, restricted to waste for which no viable treatment or recovery alternatives exist (rejected waste), which are therefore directed to thermal recovery [14]. In this context, Figure 3.11 presents the segregation recommended by the Confederation of European Waste-to-Energy Plants, for thermal processes.

Figura 3.11 Segregação de resíduos sólidos sugerida pela Confederação Europeia de Centrais de Conversão de Resíduos em Energia.
Figure 3.11 *Segregation of solid waste suggested by the European Confederation of Waste-to-Energy plants.*



Ilustração / *Illustration: Cristiane Martins com imagens do / with images from* Freepik

To perform the calculations, assumptions were defined that enabled the analysis of two scenarios: real and ideal (Figure 3.12), established in accordance with the targets set forth in the National Solid Waste Plan (Planares 2040). It was assumed that 85% of source generated OFMSW is recoverable, while the remaining portion is destined to the residual waste fraction [4].

In addition, it was assumed that 20% of the recyclable materials present in the waste stream, consisting of paper, cardboard, and plastics from selective collection, have no commercial value and are therefore classified as residual waste [5]. The sanitary waste and textile categories were classified as residual waste, since these fractions are not recyclable [19]. These assumptions were applied to each municipality individually, considering the specific gravimetric composition adopted for each location.

In municipalities without source segregation, is sent in its entirety to thermochemical conversion units. During this process, non-combustible materials, such as glass, metals, and inert fractions, are retained in the ashes, resulting in reduced heat transfer and, consequently, lower energy-recovery efficiency [20]. It should be noted that the magnitude of this effect has not yet been fully quantified, and due to this behavior, these fractions were excluded from the composition of the evaluated waste stream.

3.5.4.1 ENERGY RECOVERY FROM OFMSW THROUGH ANAEROBIC DIGESTION

As previously described, approximately 85% of the total mass of the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) was allocated to energy recovery. This percentage was applied individually to each municipality in the State of Bahia, considering the MSW gravimetric composition. The mathematical model used is described in the Appendices of this atlas.

3.5.4.1.1 METHODOLOGY FOR ESTIMATING BIOGAS GENERATION POTENTIAL

The quantification of methane (CH_4) generated from the anaerobic treatment of MSW was performed according to the methodology employed in the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo [13]. The calculations considered secondary data from bibliographic sources, including generation coefficients based on an average methane concentration of 55% in the biogas produced. The mathematical model used is described in the Appendices of this atlas.

3.5.4.1.2 METHODOLOGY FOR ESTIMATING BIOMETHANE GENERATION POTENTIAL

To estimate the available biomethane volume, the methane content of the purified gas was considered in accordance with the standards set by Resolution ANP Nº. 886/2022, which establishes minimum quality requirements for the use of biomethane as a fuel and requires a methane purity of at least 90% [18]. This specification already accounts for potential methane losses and residual impurities. The mathematical model used for these calculations is described in the Appendices of this atlas.

Para a realização dos cálculos, foram definidas premissas que possibilitaram a análise de dois cenários, real e ideal *(Figura 3.12)*, estabelecidos de acordo com as metas previstas no *Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares 2040)*. Considerou-se que 85% da Forsu gerada na fonte é passível de recuperação, enquanto a parcela remanescente é destinada à fração de rejeitos [4].

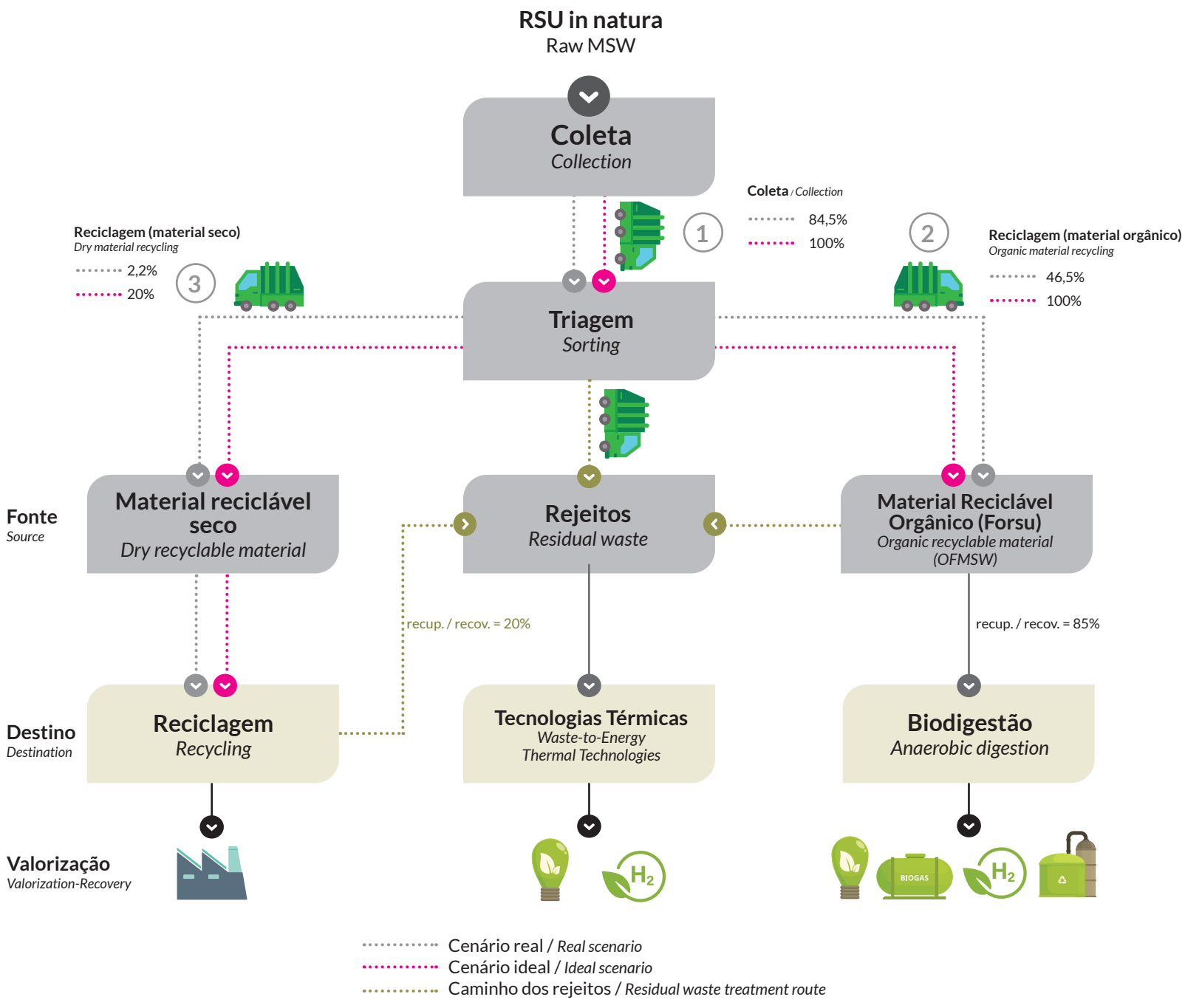
Adicionalmente, admitiu-se que 20% dos materiais recicláveis presentes no fluxo de resíduos, compostos por papel, papelão e plásticos provenientes da coleta seletiva, não apresentam valor comercial, sendo, portanto, classificados como rejeitos [5]. As categorias de resíduos sanitários e têxteis foram classificadas como rejeitos, uma vez que tais frações não são passíveis de reciclagem [19]. Essas premissas foram aplicadas individualmente a cada município, considerando-se a composição gravimétrica específica adotada para cada localidade.

Nos municípios em que não há segregação na fonte, os RSU são destinados integralmente às unidades de conversão termoquímica. Durante esse processo, materiais não combustíveis, como vidro, metais e frações inertes, permanecem retidos nas cinzas, resultando em redução da transferência de calor e, consequentemente, da eficiência do processo de recuperação energética [20]. Destaque-se que o impacto decorrente dessa influência ainda não foi integralmente quantificado e, em função desse comportamento, tais frações foram desconsideradas na composição do fluxo de resíduos avaliado.

3.5.4.1 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DA FORSU POR MEIO DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Conforme descrito anteriormente, cerca de 85% da massa total da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (Forsu) foi destinada à valorização energética. Esse percentual foi aplicado individualmente a cada município do Estado da Bahia, considerando-se a composição gravimétrica dos resíduos. O modelo matemático utilizado está descrito no *Apêndice* deste atlas.

Figura 3.12 Fluxograma da metodologia e premissas adotadas para os cálculos de valorização energética de resíduos sólidos urbanos por meio de tecnologias *Waste-to-Energy*.
Figure 3.12 *Flowchart of the methodology and assumptions adopted for calculating the energy recovery from municipal solid waste through Waste-to-Energy technologies.*



Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

3.5.4.1.1 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

A quantificação do metano (CH_4) gerado a partir do tratamento anaeróbio dos RSU foi realizada segundo a metodologia utilizada no *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [13]. Os cálculos consideraram dados secundários de referências bibliográficas, incluindo coeficientes de geração com base em uma concentração média de 55% de metano no biogás produzido. O modelo matemático utilizado está descrito no *Apêndice* deste atlas.

3.5.4.1.2 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOMETANO

Para a estimativa do volume de biometano disponível, considerou-se o teor de metano presente no gás purificado em conformidade com os padrões definidos pela *Resolução ANP nº 886/2022*, que estabelece a qualidade mínima para utilização do biometano como combustível, exigindo pureza de, no mínimo, 90% [18]. Esse valor já contempla eventuais perdas de metano e a presença de impurezas residuais. O modelo matemático empregado para esses cálculos encontra-se descrito no *Apêndice* deste atlas.

3.5.4.1.3 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

O cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir da Forsu, em cada município, baseia-se no volume de biogás produzido e na utilização de motores de ciclo Otto, tecnologia amplamente empregada no Brasil, embora de origem importada [13]. Para essa estimativa, são utilizados o poder calorífico inferior (PCI) do metano e a concentração de metano presente no biogás, conforme valores obtidos em referências técnicas e igualmente adotados no *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [13]. O modelo matemático utilizado está descrito no *Apêndice* deste atlas.

3.5.4.1.4 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE HIDROGÊNIO A PARTIR DO BIOMETANO

Para a estimativa da produção de hidrogênio a partir do biometano, os cálculos foram realizados com base em dados de balanços de massa e energia, considerados em operações típicas de unidades industriais que empregam o processo de reforma a vapor convencional. No caso do biometano, adotaram-se as condições operacionais da reforma a vapor do gás natural, uma vez que ambos os combustíveis têm o metano como principal componente. O potencial de produção de hidrogênio por reforma a vapor foi estimado com base no fluxo mássico, no conteúdo térmico e no poder calorífico inferior (PCI) do hidrogênio, assegurando maior precisão na avaliação energética. O modelo matemático utilizado para esses cálculos encontra-se descrito no *Apêndice* deste atlas.

3.5.4.2 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RSU POR MEIO DE TECNOLOGIAS TÉRMICAS *WASTE-TO-ENERGY*

O potencial energético proveniente da valorização dos rejeitos foi estimado na forma de eletricidade, considerando as tecnologias de gaseificação e incineração (*mass burning*). Os resíduos gerados nos 417 municípios do Estado da Bahia foram avaliados com base nas tecnologias de recuperação de energia elétrica descritas por [13], conforme apresentado na *Tabela 3.3*.

A seguir, são apresentadas as metodologias de valorização energética dos rejeitos por meio de tecnologias de conversão térmica voltadas à produção de eletricidade e hidrogênio a partir da gaseificação.

Tabela 3.3 Potencial de geração de energia elétrica por tipo de tecnologia de conversão.
Table 3.3 *Electricity generation potential by type of conversion technology*

População (habitantes) *Population (inhabitants)*	Potência instalada *Installed capacity*	Tecnologia *Technology*
≥ 1.000.000	≥10 MW	Incineração / *Incineration*
≥ 60.000 ≤ 1.000.000	≥1 MW ≤ 10 MW	Gaseificação de leito fluidizado / *Fluidized bed gasification*
≥ 5.000	≥75 kW	Gaseificação leito fixo / *Fixed bed gasification*

Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [13] / *Source: prepared by the authors based on data from* [13]

3.5.4.1.3 METHODOLOGY FOR ESTIMATING ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL

The calculation of electricity generation potential from OFMSW in each municipality is based on the volume of biogas produced and the use of Otto cycle motor, a technology widely used in Brazil, though of imported origin [13]. For this estimate, the lower heating value (LHV) of methane and the methane concentration in the biogas are used, according to values reported in technical references and likewise adopted in the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo [13]. The mathematical model used is described in the Appendix of this Atlas.

3.5.4.1.4 METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE HYDROGEN POTENTIAL FROM BIOMETHANE

To estimate hydrogen production from biomethane, calculations were performed based on mass and energy balances representative of typical operations in industrial units employing conventional steam reforming. For biomethane, the operating conditions of natural-gas steam reforming were adopted, since both fuels have methane as their principal component. The hydrogen production potential via steam reforming was estimated by the mass flow rate, energy content, and the lower heating value (LHV) of hydrogen, ensuring greater accuracy in the energy assessment. The mathematical model used for these calculations is described in the Appendices to this atlas.

3.5.4.2 ENERGY RECOVERY FROM MUNICIPAL SOLID WASTE THROUGH THERMAL WASTE-TO-ENERGY TECHNOLOGIES

The energy potential from valorizing the residual waste was estimated in the form of electricity, considering gasification and mass-burn incineration technologies. The waste generated in the 417 municipalities of the State of Bahia was evaluated based on the electricity-recovery technologies described in [13], as shown in Table 3.3.

The following section presents the methodologies for energy recovery of residual waste through thermal conversion technologies aimed at producing electricity and hydrogen via gasification.

3.5.4.2.1 METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE POTENTIAL FOR ELECTRICITY GENERATION THROUGH INCINERATION

The calculation of electricity generation potential from residual waste was based on moving-grate incineration technology, also referred to as mass-burn incineration, widely used for MSW treatment. This system is designed to process large waste volumes with minimal or no pretreatment. The estimates were performed using the total mass of rejects and values reported in technical references, adopting the calculation methodology described in [13]. The corresponding mathematical model is detailed in the Appendices to this atlas.

3.5.4.2.2 METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE POTENTIAL FOR ELECTRICITY GENERATION THROUGH GASIFICATION

The gasification system uses rejects converted into refuse-derived fuel (RDF), obtained through preprocessing to meet process requirements. The electricity generation calculations considered the mass of rejects, the lower heating value (LHV), conversion efficiency, and syngas volume, based on Brazilian industry data and the methodology in [13], detailed in the Appendices to this atlas.

3.5.4.2.3 METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE HYDROGEN GENERATION POTENTIAL FROM GASIFICATION

Steam gasification was adopted for converting municipal solid waste into synthesis gas (syngas) due to its greater hydrogen production efficiency and reduced byproduct formation compared with air gasification. The process comprises preprocessing, gasification, syngas conditioning, the water-gas shift (WGS) reaction, and purification by pressure swing adsorption (PSA). The corresponding mathematical model is detailed in the Appendix to this Atlas.

3.6 RESULTS AND SPATIAL REPRESENTATION OF POTENTIALS

Presented below are the results for the technical energy potential associated with energy recovery from municipal solid waste (MSW) disposed of in sanitary landfills, as well as with the application of Waste-to-Energy (WtE) technologies. The analysis covers estimates of biogas generation, upgrading to biomethane, electricity-generation potential, and hydrogen production, considering real and ideal scenarios for the municipalities assessed.

In this context, Table 3.4 presents the technical energy potentials from the treatment of municipal solid waste (MSW) in sanitary landfills, based on the distribution of estimated values for the two scenarios analyzed. For each municipality, the following indicators are reported for the scenario: volume of captured biogas; amount of biomethane produced via biogas upgrading; electricity-generation potential; and estimated hydrogen production from biomethane.

Table 3.5 presents the same indicators, pertaining to the technical energy potential from the treatment of municipal solid waste (MSW) in sanitary landfills, for the ten municipalities with the highest available potential in the State of Bahia, considering the ideal scenario.

According to the data obtained, the assessment of the energy potential from the recovery of municipal solid waste (MSW) disposed of in sanitary landfills in the State of Bahia reveals notable patterns related to population distribution, the volume of collected waste, and energy utilization. In the scenario (Table 3.4), Salvador municipality, the state's principal urban center, has approximately 2.57 million inhabitants, corresponding to 17% of the state's population, and is responsible for 21% of the total collected waste (752 thousand t per year out of a statewide total of 3.6 million t). This representation is directly reflected in the capital's contribution to the state energy potential, which reaches about 20% for biogas, biomethane, and hydrogen, and 22% for electricity generation.

The conversion-efficiency analysis indicates that the ratio of biogas produced to waste collected in Salvador municipality is approximately 105 Nm³/t, a value like that observed in municipalities such as Feira de Santana (110 Nm³/t) and Vitória da Conquista (112 Nm³/t). This result shows that, although Salvador municipality has a larger absolute volume of waste, and, consequently, recoverable energy, the energy efficiency per ton of waste is comparable to that of other municipalities. By contrast, smaller municipalities such as Juazeiro and Barreiras exhibit comparable yields but a reduced absolute contribution due to their smaller volumes of collected waste.

Notable differences in waste collection coverage are also observed. The ten municipalities with the highest waste generation account for 42% of the state's population but only 41.7% of the total waste collected and treated, revealing significant energy potential dispersed across smaller municipalities whose collection infrastructure is limited. Expanding and improving this system in lower–population-density municipalities could substantially increase statewide energy recovery. In this context, these ten municipalities concentrate 41% of the biogas potential and 40% of the hydrogen potential, while the rest of the state, responsible for 59% of the waste holds a potential that, if properly harnessed, may exceed the gains achieved exclusively in major urban centers, reinforcing the need for integrated regional strategies.

3.5.4.2.1 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR MEIO DA INCINERAÇÃO

O cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir dos rejeitos foi baseado na tecnologia de incineração com grelha móvel, também denominada incineração por queima em massa (*mass burning*), amplamente utilizada no tratamento de RSU. Esse sistema é projetado para processar grandes volumes de resíduos com mínimo ou nenhum pré-tratamento. As estimativas foram realizadas com base na massa total de rejeitos e em valores obtidos em referências técnicas, adotando a metodologia de cálculo descrita por [13]. O modelo matemático correspondente encontra-se detalhado no *Apêndice* deste atlas.

3.5.4.2.2 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE POR MEIO DA GASEIFICAÇÃO

O sistema de gaseificação utiliza rejeitos convertidos em combustível derivado de resíduos urbanos (CDRU), obtido por meio de pré-processamento para atender aos requisitos do processo. Os cálculos de geração de eletricidade consideraram a massa de rejeitos, o poder calorífico inferior (PCI), a eficiência de conversão e o volume de *syngas*, com base em dados da indústria brasileira e na metodologia de [13], detalhada no *Apêndice* deste atlas.

3.5.4.2.3 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO

A gaseificação a vapor foi adotada para a conversão de resíduos sólidos urbanos em gás de síntese (*syngas*), devido à sua maior eficiência na produção de hidrogênio e à menor geração de subprodutos, em comparação à gaseificação a ar. O processo abrange as etapas de pré-tratamento, gaseificação, condicionamento do *syngas*, reação *water-gas shift* (WGS) e purificação por PSA (*Pressure Swing Adsorption*). O modelo matemático correspondente encontra-se detalhado no *Apêndice* deste atlas.

3.6 RESULTADOS E REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS POTENCIAIS

A seguir, são apresentados os resultados do potencial técnico energético associado à valorização de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários, bem como à aplicação de tecnologias *Waste-to-Energy*. A análise abrange estimativas de geração de biogás, purificação para produção de biometano, potencial de geração de energia elétrica e produção de hidrogênio, considerando os cenários real e ideal para os municípios avaliados.

Nesse contexto, a *Tabela 3.4* apresenta os potenciais técnicos energéticos provenientes do tratamento dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, com base na distribuição dos valores estimados para os dois cenários analisados. Para cada município, são exibidos, no cenário real, os seguintes indicadores: volume de biogás captado, quantidade de biometano gerado a partir da purificação do biogás, potencial de geração de energia elétrica e produção estimada de hidrogênio a partir do biometano.

A *Tabela 3.5* apresenta os mesmos indicadores, referentes aos potenciais técnicos energéticos provenientes do tratamento dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, para os dez municípios com maior potencial disponível no Estado da Bahia, considerando o cenário ideal.

De acordo com os dados obtidos, a avaliação do potencial energético derivado da valorização dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários no Estado da Bahia evidencia padrões relevantes relacionados à distribuição populacional, ao volume de resíduos coletados e ao aproveitamento energético. No cenário real (*Tabela 3.4*), observa-se que Salvador, principal centro urbano do Estado, concentra, aproximadamente, 2,57 milhões de habitantes, o que corresponde a 17% da população estadual, sendo responsável por 21% do total de resíduos coletados (752 mil t anuais, de um total estadual de 3,6 milhões de t). Essa representatividade se reflete diretamente na contribuição da capital para o potencial energético estadual, que atinge cerca de 20% para biogás, biometano e hidrogênio, além de 22% para geração de energia elétrica.

A análise da eficiência de conversão indica que a razão entre biogás produzido e resíduos coletados em Salvador é de, aproximadamente, 105 Nm³/t, valor semelhante ao registrado em municípios como Feira de Santana (110 Nm³/t) e Vitória da Conquista (112 Nm³/t). Tal resultado demonstra que, embora Salvador apresente maior volume absoluto de resíduos e, consequentemente, de energia recuperável, a eficiência energética por tonelada de resíduo é comparável à de outros municípios. Em contrapartida, cidades de menor porte, como Juazeiro e Barreiras, apresentam rendimentos equivalentes, mas impacto absoluto reduzido em função do menor volume de resíduos coletados.

Destacam-se ainda diferenças na cobertura da coleta de resíduos. Os dez municípios com maior geração representam 42% da população estadual, mas respondem por apenas 41,7% do total de resíduos coletados e tratados, revelando um potencial energético significativo disperso em municípios de menor porte, cuja infraestrutura de coleta é limitada. A ampliação e qualificação desse sistema nos municípios de menor densidade populacional poderia elevar substancialmente o aproveitamento energético estadual. Nesse contexto, observa-se que esses dez municípios concentram 41% do potencial de biogás e 40% do potencial de hidrogênio, enquanto o restante do Estado, responsável por 59% dos resíduos, detém um potencial que, se adequadamente explorado, pode superar os ganhos obtidos exclusivamente nos grandes centros urbanos, reforçando a necessidade de estratégias regionais integradas.

Tabela 3.4 Potenciais técnicos energéticos provenientes do tratamento dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários nos dez municípios com maior potencial disponível no Estado da Bahia – Cenário real.
Table 3.4 *Technical energy potentials from the treatment of municipal solid waste in sanitary landfills in the ten municipalities with the highest potential in the State of Bahia - Real cenário.*

CENÁRIO REAL / *REAL SCENARIO*						
Município *Municipality*	**Habitantes** *Inhabitants*	**RSU coletado e tratado** *MSW collected and treated*	**Volume de biogás produzido** *Volume of biogas produced*	**Quantidade de biometano gerado** *Quantity of biomethane generated*	**Potencial de geração de eletricidade** *Electricity generation potential*	**Produção de hidrogênio a partir do biometano** *Hydrogen production from biomethane*
		(t/ano) *(t/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*	**(MWh/ano)** *(MWh/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*
Salvador	2.568.928	750.896,58	79.482.540,74	30.402.071,83	141.450,71	8.347.582,67
Feira de Santana	657.948	192.317,92	21.188.405,49	8.104.565,10	37.707,84	2.225.293,31
Vitória da Conquista	394.024	115.173,05	12.915.405,22	4.940.142,50	22.984,84	1.356.428,87
Camaçari	319.394	93.358,73	9.882.038,97	3.779.879,91	17.586,52	1.037.852,29
Juazeiro	254.481	74.384,69	8.253.486,76	3.156.958,69	14.688,28	866.815,06
Lauro de Freitas	217.960	63.709,62	6.829.655,50	2.612.343,23	12.154,36	717.278,45
Itabuna	196.676	57.488,31	5.780.907,05	2.211.196,95	10.287,96	607.134,59
Porto Seguro	181.007	55.252,80	5.638.304,08	2.156.651,31	10.034,18	592.157,84
Jequié	168.733	52.908,27	5.630.954,21	2.153.839,99	10.021,10	591.385,92
Barreiras	170.667	49.885,89	5.576.673,62	2.133.077,66	9.924,50	585.685,15
Total 10+	**5.129.818**	**1.505.376**	**161.178.372**	**61.650.727**	**286.840**	**16.927.614**
Total estadual / ***State total***	**14.850.513**	**3.591.013**	**390.137.397**	**149.227.554**	**641.868**	**41.255.135**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Tabela 3.5 Potenciais técnicos energéticos provenientes do tratamento dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários nos dez municípios com maior potencial disponível no Estado da Bahia – Cenário ideal
Table 3.5 *Technical energy potentials from the treatment of municipal solid waste in sanitary landfills in the ten municipalities with the highest potential in the State of Bahia – Ideal scenario.*

CENÁRIO IDEAL / *IDEAL SCENARIO*						
Município *Municipality*	**Habitantes** *Inhabitants*	**RSU coletado e tratado** *MSW collected and treated*	**Volume de biogás produzido** *Volume of biogas produced*	**Quantidade de biometano gerado** *Quantity of biomethane generated*	**Potencial de geração de eletricidade** *Electricity generation potential*	**Produção de hidrogênio a partir do biometano** *Hydrogen production from biomethane*
		(t/ano) *(t/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*	**(MWh/ano)** *(MWh/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*
Salvador	2.568.928	871.314,11	92.524.486,96	40.539.079,34	164.660,74	11.130.929,43
Feira de Santana	657.948	223.158,99	24.665.119,27	10.806.882,16	43.895,16	2.967.276,13
Vitória da Conquista	394.024	133.642,78	15.034.638,19	6.587.341,47	26.756,32	1.808.704,94
Camaçari	319.394	108.330,21	11.503.539,99	5.040.210,82	20.472,22	1.383.904,91
Juazeiro	254.481	86.313,39	9.607.765,69	4.209.588,06	17.098,41	1.155.838,47
Lauro de Freitas	217.960	73.926,41	7.950.304,13	3.483.380,67	14.148,72	956.441,66
Itabuna	196.676	66.707,43	6.729.471,08	2.948.479,60	11.976,07	809.572,36
Porto Seguro	181.007	64.113,42	6.563.469,01	2.875.746,73	11.680,64	789.601,90
Jequié	168.733	61.392,91	6.554.913,12	2.871.998,02	11.665,42	788.572,60
Barreiras	170.667	57.885,84	6.491.725,87	2.844.312,88	11.552,97	780.971,02
Total 10+	**5.129.818**	**1.746.786**	**187.625.433**	**82.207.020**	**333.907**	**22.571.813**
Total estadual / ***State total***	**14.850.513**	**4.166.886**	**454.153.354**	**198.984.717**	**751.881**	**54.635.795**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 3.1 / *Map 3.1*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DOS RSU EM ATERROS SANITÁRIOS

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM MSW IN SANITARY LANDFILLS - REAL SCENARIO

CENÁRIO REAL

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

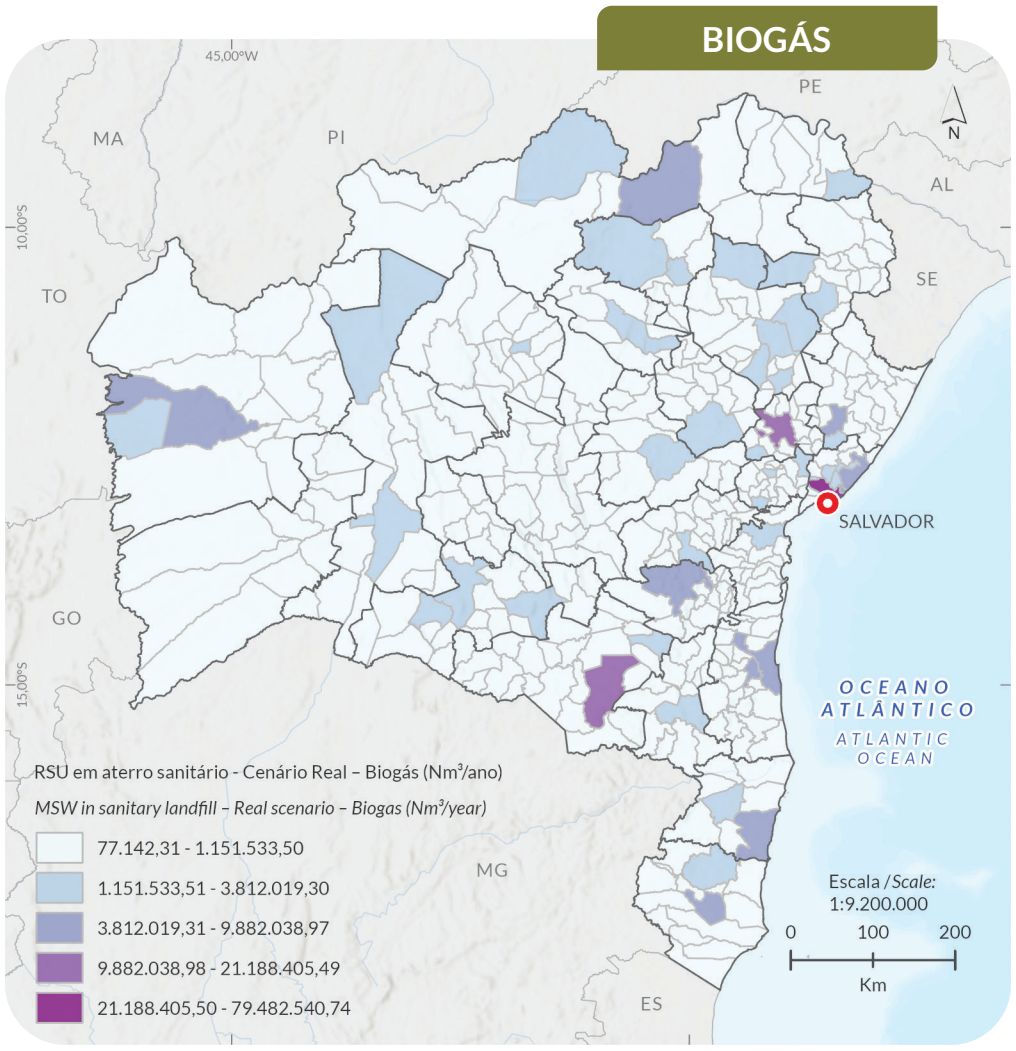
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

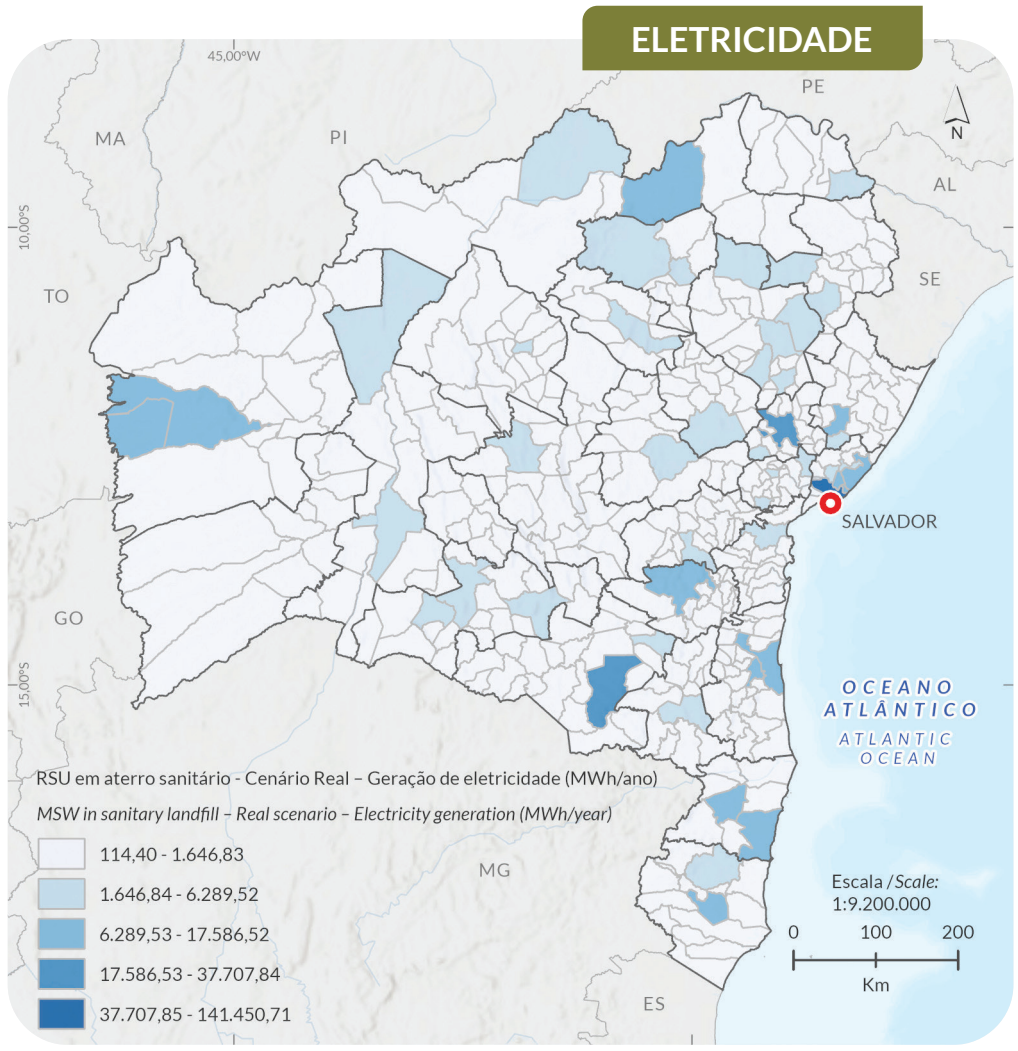
BIOGAS

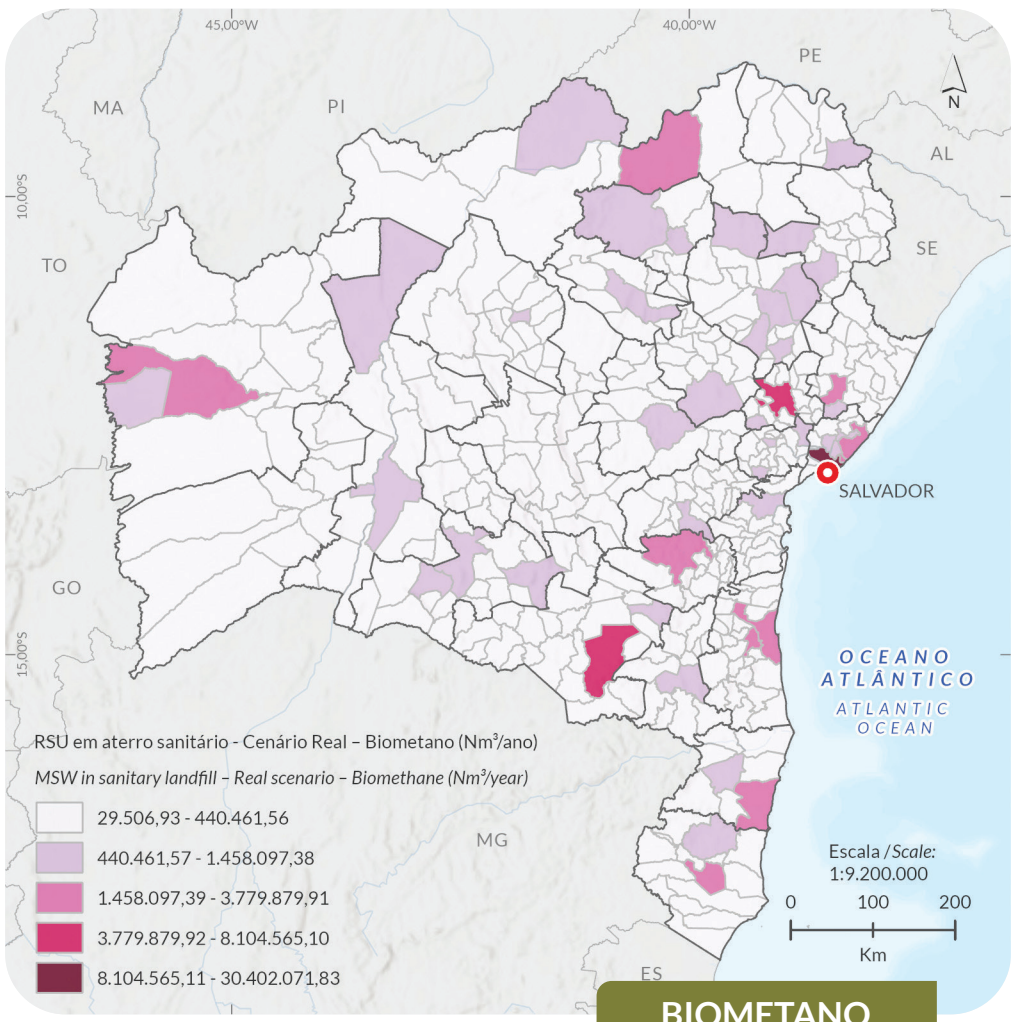
BIOGÁS



ELECTRICITY

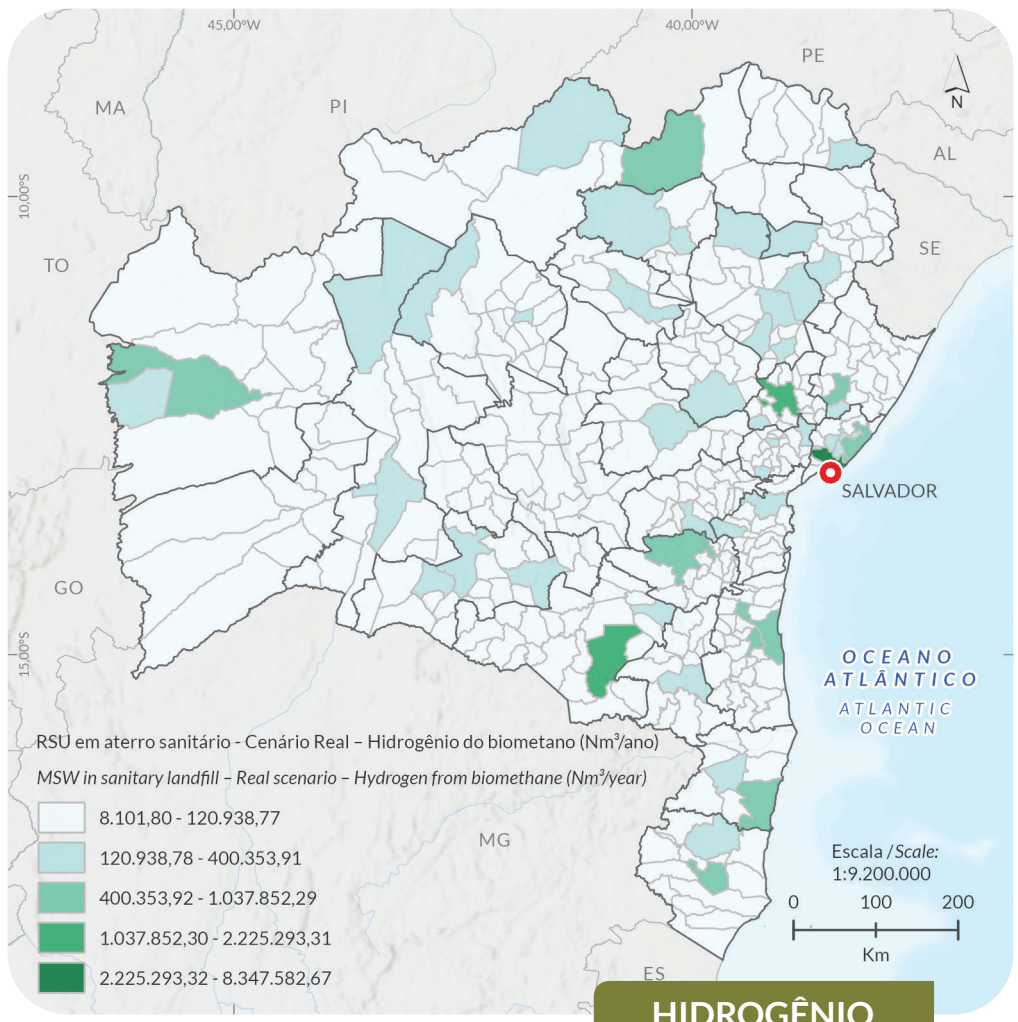
ELETRICIDADE





BIOMETANO

BIOMETHANE



HIDROGÊNIO

HYDROGEN

Mapa 3.2 / *Map 3.2*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DOS RSU EM ATERROS SANITÁRIOS

CENÁRIO IDEAL

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM MSW IN SANITARY LANDFILLS - IDEAL SCENARIO

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

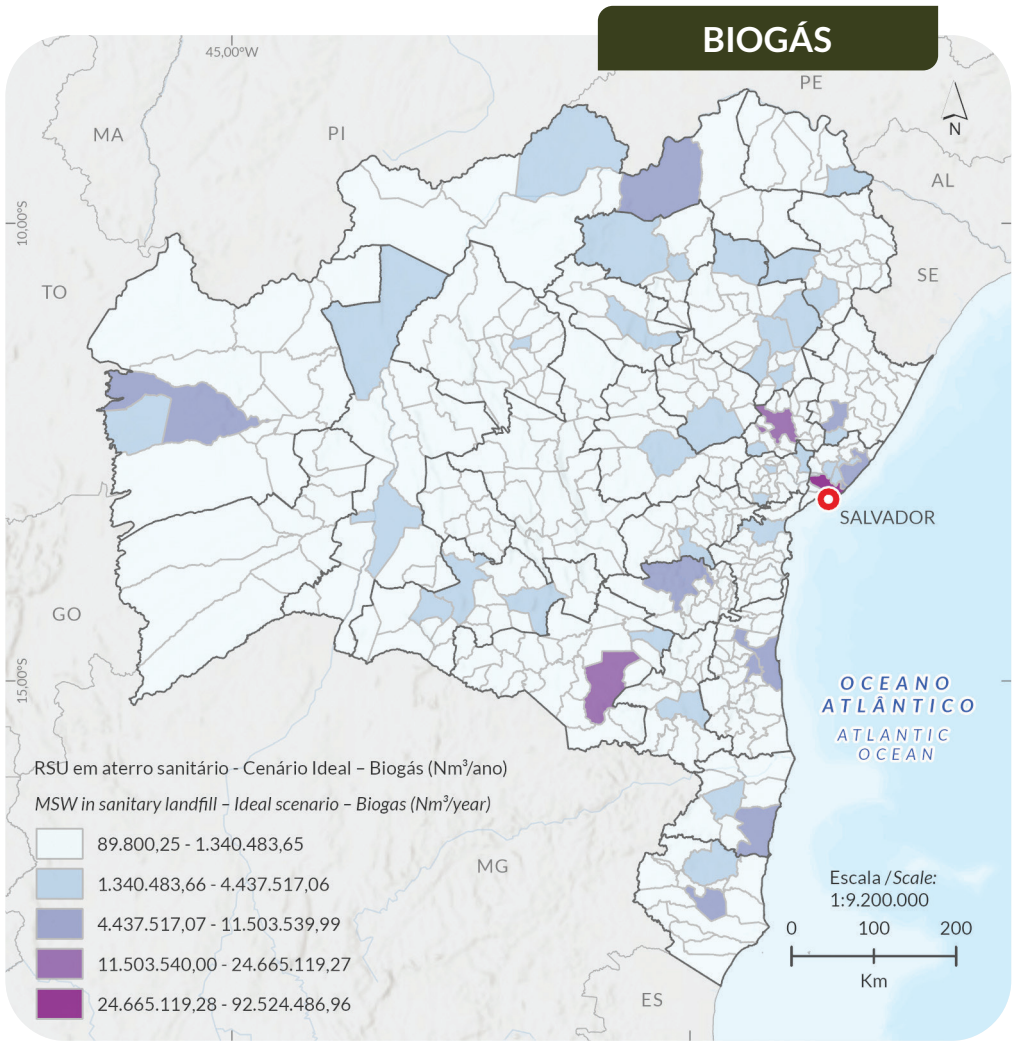
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

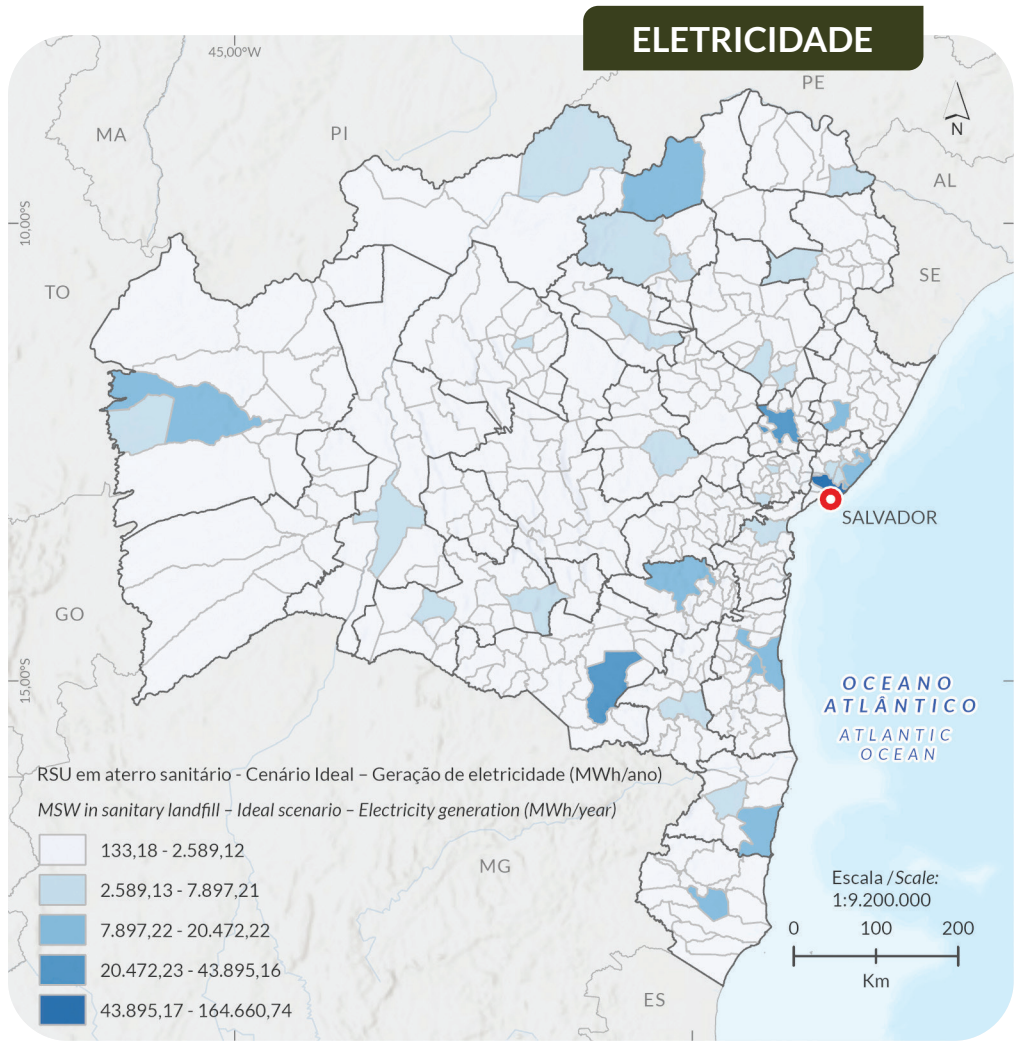
BIOGAS

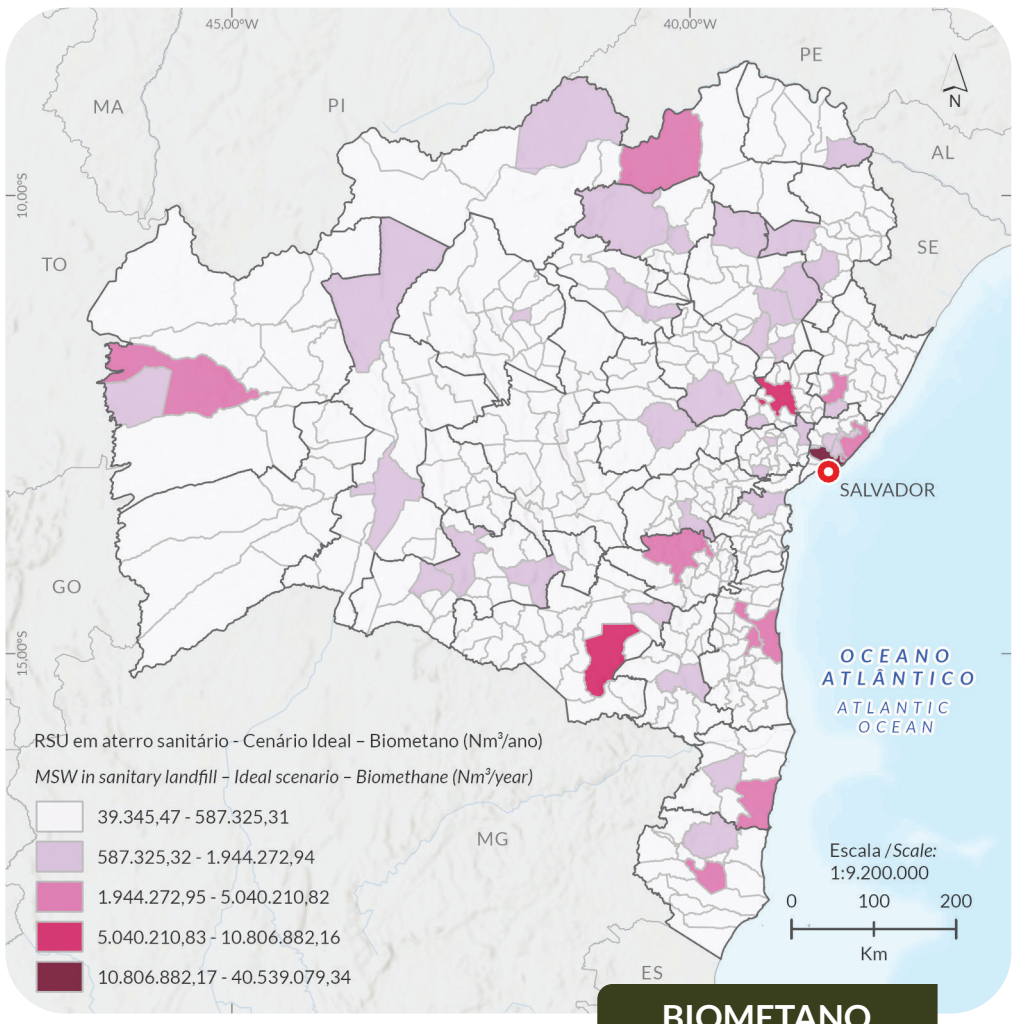
BIOGÁS



ELECTRICITY

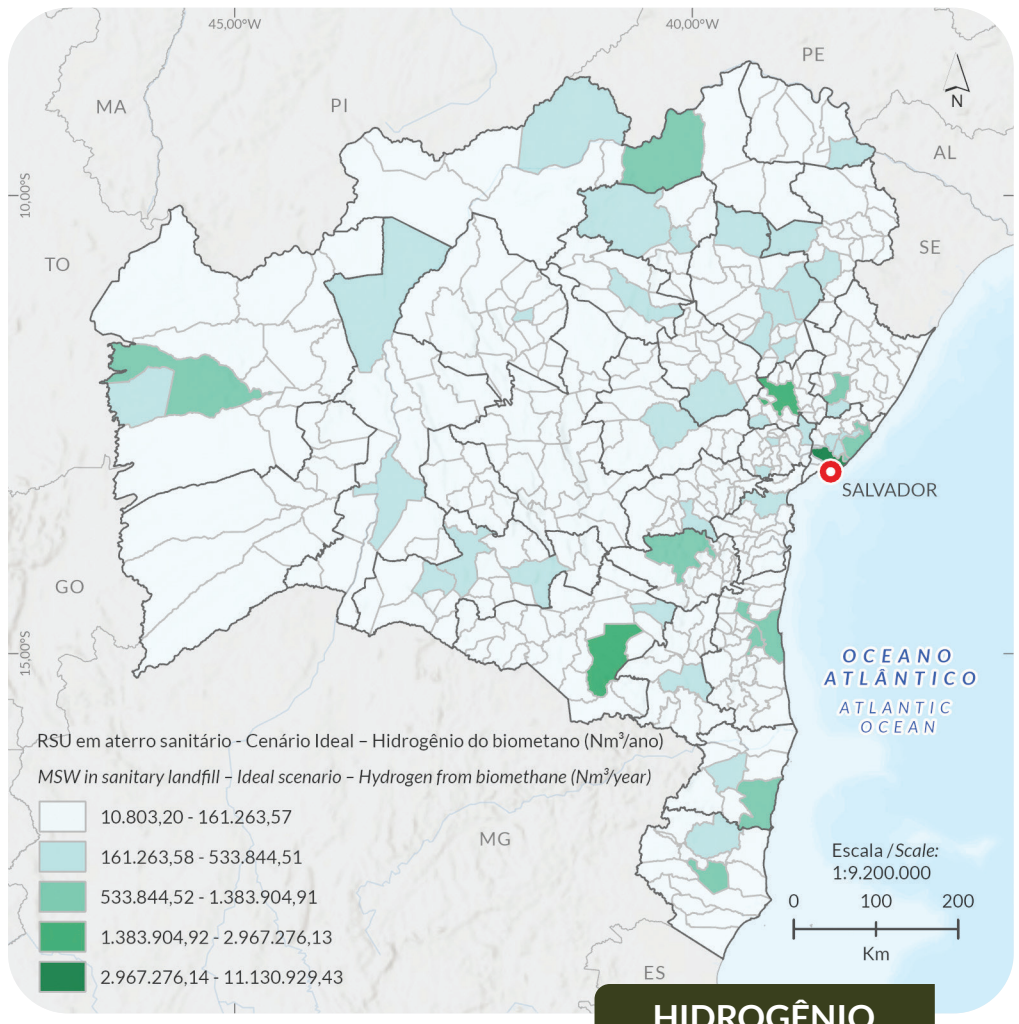
ELETRICIDADE





BIOMETANO

BIOMETHANE



HIDROGÊNIO

HYDROGEN

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA BAHIA

In the ideal scenario (Table 3.5), which assumes universal collection coverage and environmentally sound final disposal of municipal solid waste (MSW), Salvador municipality maintains its leading position across all evaluated energy categories. The municipality shows the highest estimated potentials for biogas (92.52 million Nm³/year, 20.37% of the statewide total), biomethane (40.53 million Nm³/year, 20.37%), electricity (164,660 MWh/year, 21.9%), and hydrogen (11.13 million Nm³/year, 20.37%).

The comparison between the real and ideal scenarios shows substantial gains for the State of Bahia: a 16.4% increase in biogas potential (from 390 to 454 million Nm³/year), 33.3% in biomethane (from 149 to 199 million Nm³/year), 32.4% in hydrogen (from 41 to 55 million Nm³/year), and 17.1% in electricity generation (from 642,000 to 752,000 MWh/year). Similar proportional increases are observed in Salvador, though with a larger absolute impact, as the state capital contributes approximately 13 million Nm³ of biogas and 3 million Nm³ of biomethane when moving to the ideal scenario.

The results show that universal collection delivers uniform benefits to both major urban centers and smaller municipalities. They also underscore Salvador's strategic role as a hub for deploying large-scale energy-recovery facilities, given its favorable population concentration and waste volumes. In parallel, the analysis suggests that smaller municipalities could participate in intermunicipal consortia, optimizing logistics costs and enabling the adoption of energy conversion technologies. Thus, although the ideal scenario increases the absolute volume of recoverable energy, the relative distribution of potential among municipalities remains similar to that observed in the real scenario, reinforcing Salvador's centrality and the need for coordinated public policies that combine investments in centralized infrastructure with regional integration strategies to maximize statewide energy recovery.

Beyond energy recovery, the waste valorization assessment also encompassed the recovery of dry recyclable materials (Table 3.6), such as paper, cardboard, and plastics, which plays an important role in reducing the volume of waste sent to sanitary landfills and serves as a complementary measure within the circular economy framework. In the real scenario, recovery is estimated at 4,836 t per year across the ten municipalities with the highest energy potential, equivalent to approximately 13 t per day. At the statewide scale, recovery totals 11,535 t per year (approximately 31 t per day), highlighting low rates of source segregation, the absence or insufficiency of recycling programs, and limited public participation in source-separated collection and reverse-logistics initiatives.

In the ideal scenario, which assumes 100% collection coverage and environmentally sound final disposal, the recycling of dry materials could reach 124,095 t per year statewide, representing a substantial increase over the current scenario. Specifically, in the ten municipalities with the highest energy potential, recovery could reach 143 t per day (approximately 52,022 t per year). This increase indicates that integrated actions in environmental education, incentives for sorting, and expansion of source-separated collection infrastructure could not only raise the recycling rate but also complement energy recovery by reducing the volume of waste sent to sanitary landfills and improving the energy and environmental balance of waste management.

Based on the valorization of OFMSW, recovered organic material, it was possible to estimate the available potential. Table 3.7 presents the technical energy potentials from OFMSW energy recovery, based on the distribution of estimated values for the two scenarios analyzed. For each municipality, the following indicators are reported for the real scenario: volume of biogas; amount of biomethane produced via biogas upgrading; electricity-generation potential; and estimated hydrogen production from biomethane.

Table 3.8 presents the same indicators regarding the technical energy potential from energy recovery of OFMSW in the ten municipalities with the greatest available potential in the State of Bahia, considering the ideal scenario.

No cenário ideal (*Tabela 3.5*), que considera a universalização da coleta e a destinação ambientalmente adequada dos RSU, Salvador mantém sua posição de liderança em todas as categorias energéticas avaliadas. O município apresenta os maiores potenciais estimados para biogás (92,52 milhões Nm³/ano, 20,37% do total estadual), biometano (40,53 milhões Nm³/ano, 20,37%), energia elétrica (164.660 MWh/ano, 21,9%) e hidrogênio (11,13 milhões Nm³/ano, 20,37%).

A comparação entre os cenários real e ideal evidencia ganhos expressivos para o Estado: aumento de 16,4% no potencial de biogás (de 390 para 454 milhões Nm³/ano), 33,3% no biometano (de 149 para 199 milhões Nm³/ano), 32,4% no hidrogênio (de 41 para 55 milhões Nm³/ano) e 17,1% na geração elétrica (de 642 para 752 mil MWh/ano). Esses incrementos são igualmente observados em Salvador, com variação proporcional similar, porém com impacto absoluto mais significativo, uma vez que a capital adiciona cerca de 13 milhões Nm³ de biogás e 3 milhões Nm³ de biometano ao migrar para o cenário ideal.

Os resultados demonstram que a universalização da coleta proporciona benefícios homogêneos para grandes centros e cidades de menor porte. Contudo, reforçam o papel estratégico de Salvador como polo para a implementação de plantas de valorização energética em larga escala, dadas as condições favoráveis de concentração populacional e volume de resíduos. Paralelamente, a análise sugere que municípios menores poderiam integrar modelos consorciados, otimizando custos logísticos e viabilizando a adoção de tecnologias de conversão energética. Assim, embora o cenário ideal amplie o volume absoluto de energia recuperável, a distribuição relativa do potencial entre os municípios permanece semelhante à observada no cenário real, reforçando a centralidade de Salvador e a necessidade de políticas públicas articuladas que combinem investimentos em infraestrutura centralizada e estratégias regionais de integração para maximizar o aproveitamento energético no Estado.

Além da recuperação energética, a valorização de resíduos abrangeu também a recuperação de materiais recicláveis secos (*Tabela 3.6*), como papel, papelão e plásticos, que desempenha papel relevante na redução do volume de resíduos destinados a aterros sanitários, atuando de forma complementar no contexto da economia circular. No cenário real, estima-se a recuperação de 4.836 t por ano nos dez municípios com maior potencial energético, o que equivale a aproximadamente 13 t por dia. Em escala estadual, a recuperação totaliza 11.535 t anuais (aproximadamente, 31 t diárias), evidenciando o baixo índice de segregação na fonte, a inexistência ou insuficiência de programas de reciclagem e a limitada adesão da população às iniciativas de coleta seletiva e logística reversa.

No cenário ideal, que pressupõe 100% de coleta e destinação adequada, a reciclagem de materiais secos poderia alcançar 124.095 t por ano no Estado, representando um aumento expressivo em relação ao cenário atual. Especificamente nos dez municípios com maior potencial energético, a recuperação poderia chegar a 143 t por dia, correspondendo a, aproximadamente, 52.022 t anuais. Esse incremento demonstra que ações integradas de educação ambiental, incentivo à triagem e ampliação da infraestrutura de coleta seletiva poderiam não apenas elevar a taxa de reciclagem, mas também complementar a recuperação energética, ao reduzir o volume de resíduos destinados a aterros sanitários e otimizar o balanço energético e ambiental da gestão de resíduos.

Com base na valorização da Forsu, material orgânico recuperado, foi possível estimar o potencial disponível. A *Tabela 3.7* apresenta os potenciais técnicos energéticos provenientes da valorização energética da Forsu, com base na distribuição dos valores estimados para os dois cenários analisados. Para cada município, são exibidos, no cenário real, os seguintes indicadores: volume de biogás, quantidade de biometano gerado a partir da purificação do biogás, potencial de geração elétrica e produção estimada de hidrogênio a partir do biometano.

A *Tabela 3.8* apresenta os mesmos indicadores referentes aos potenciais técnicos energéticos provenientes da valorização energética da Forsu nos dez municípios com maior potencial disponível no Estado da Bahia, considerando o cenário ideal.

Tabela 3.6 Quantidade de resíduos secos recuperados por meio da reciclagem – Cenários reais e ideais
Table 3.6 *Recovered dry waste through Recycling — Real and Ideal scenarios*

Município *Municipality*	Habitantes *Inhabitants*	Cenário real / *Real scenario*	Cenário ideal / *Ideal scenario*
		Resíduo seco recuperado *Dry waste recovered*	Resíduo seco recuperado *Dry waste recovered*
		(t/ano) / *(t/year)*	(t/ano) / *(t/year)*
Salvador	2.568.928	2.411,95	25.948,89
Feira de Santana	657.948	617,74	6.645,97
Vitória da Conquista	394.024	369,95	3.980,06
Camaçari	319.394	299,88	3.226,22
Juazeiro	254.481	238,93	2.570,53
Lauro de Freitas	217.960	204,64	2.201,63
Itabuna	196.676	184,66	1.986,64
Porto Seguro	181.007	177,48	1.909,38
Jequié	168.733	169,95	1.828,36
Barreiras	170.667	160,24	1.723,92
Total 10+	**5.129.818**	**4.836**	**52.022**
Total estadual / *State total*	**14.850.513**	**11.535**	**124.095**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Tabela 3.7 Potenciais técnicos da valorização energética da fração orgânica dos RSU nos dez municípios com maior potencial disponível no Estado da Bahia – Cenário real.
Table 3.7 *Technical energy potentials from the valorization of the organic fraction of municipal solid waste in the ten municipalities with the highest available potential in the State of Bahia – Real scenario.*

CENÁRIO REAL / *REAL SCENARIO*						
Município *Municipality*	**Habitantes** *Inhabitants*	**Forsu coletada e tratada** *OFMSW collected and treated*	**Volume de biogás produzido** *Volume of biogas produced*	**Quantidade de biometano gerado** *Quantity of biomethane generated*	**Potencial de geração de eletricidade** *Electricity generation potential*	**Produção de hidrogênio a partir do biometano** *Hydrogen production from biomethane*
		(t/ano) *(t/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*	**(MWh/ano)** *(MWh/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*
Salvador	2.568.928	175.965,39	17.860.487,39	7.514.800,07	14.711,04	17.307.894,03
Feira de Santana	657.948	41.300,56	4.192.006,90	1.763.786,90	8.206,31	4.062.308,58
Vitória da Conquista	394.024	24.733,58	2.510.458,77	1.056.275,53	4.914,50	2.432.786,60
Camaçari	319.394	20.048,93	2.034.966,06	856.211,97	3.983,67	1.972.005,37
Juazeiro	254.481	15.974,22	1.621.383,62	682.197,16	2.645,02	1.571.218,93
Lauro de Freitas	217.960	13.681,74	1.388.696,10	584.293,89	2.265,43	1.345.730,63
Itabuna	196.676	12.345,70	1.253.088,62	527.237,04	2.044,21	1.214.318,76
Ilhéus	189.028	11.865,62	1.204.360,65	506.734,74	1.964,72	1.167.098,41
Porto Seguro	181.007	11.362,13	1.153.256,17	485.232,54	1.881,35	1.117.575,08
Barreiras	170.667	10.713,07	1.087.376,57	457.513,69	1.773,88	1.053.733,76
Total 10+	**5.150.113**	**337.991**	**34.306.081**	**14.434.284**	**44.390**	**33.244.670**
Total estadual / ***State total***	**14.850.513**	**814.240**	**82.645.362**	**34.779.941**	**123.248**	**80.104.265**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Tabela 3.8 Potenciais técnicos da valorização energética da fração orgânica dos RSU nos dez municípios com maior potencial disponível no Estado da Bahia – Cenário ideal.
Table 3.8 *Technical Energy Potentials from the valorization of the organic fraction of MSW in the ten municipalities with the highest available potential in the State of Bahia – Ideal scenario.*

CENÁRIO IDEAL / *IDEAL SCENARIO*						
Município *Municipality*	**Habitantes** *Inhabitants*	**Forsu coletada e tratada** *OFMSW collected and treated*	**Volume de biogás produzido** *Volume of biogas produced*	**Quantidade de biometano gerado** *Quantity of biomethane generated*	**Potencial de geração de eletricidade** *Electricity generation potential*	**Produção de hidrogênio a partir do biometano** *Hydrogen production from biomethane*
		(t/ano) *(t/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*	**(MWh/ano)** *(MWh/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*
Salvador	2.568.928	447.834,56	45.455.207,45	19.125.278,53	88.983,55	44.048.849,09
Feira de Santana	657.948	105.110,54	10.668.720,24	4.488.864,04	20.885,19	10.338.636,08
Vitória da Conquista	394.024	62.947,34	6.389.155,11	2.688.237,01	12.507,47	6.191.478,27
Camaçari	319.394	51.024,82	5.179.019,06	2.179.072,27	10.138,50	5.018.783,14
Juazeiro	254.481	40.654,64	4.126.445,55	1.736.201,96	8.077,97	3.998.775,66
Lauro de Freitas	217.960	34.820,22	3.534.252,35	1.487.036,67	6.918,69	3.424.904,58
Itabuna	196.676	31.419,99	3.189.129,26	1.341.826,14	6.243,07	3.090.459,41
Ilhéus	189.028	30.198,19	3.065.115,86	1.289.647,50	6.000,30	2.970.282,91
Porto Seguro	181.007	28.916,79	2.935.054,21	1.234.924,06	5.745,69	2.844.245,29
Barreiras	170.667	27.264,92	2.767.389,64	1.164.379,19	5.417,47	2.681.768,17
Total 10+	**5.150.113**	**860.192**	**87.309.489**	**36.735.467**	**170.918**	**84.608.183**
Total estadual / ***State total***	**14.850.513**	**2.069.422**	**210.046.373**	**88.385.183**	**375.589**	**203.566.478**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 3.3 / *Map 3.3*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA FORSU

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM ANAEROBIC DIGESTION OF OFMSW - REAL SCENARIO

CENÁRIO REAL

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

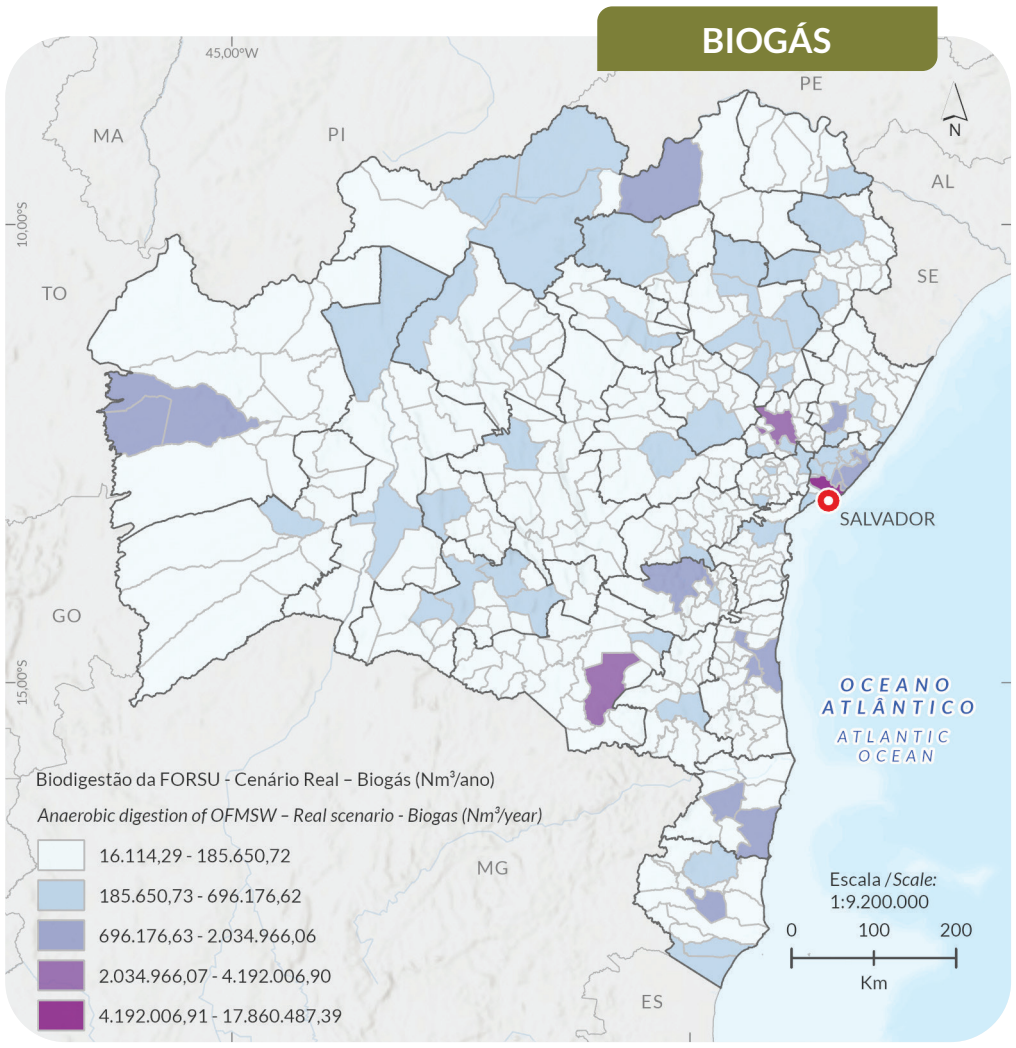
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source*:
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital*: (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

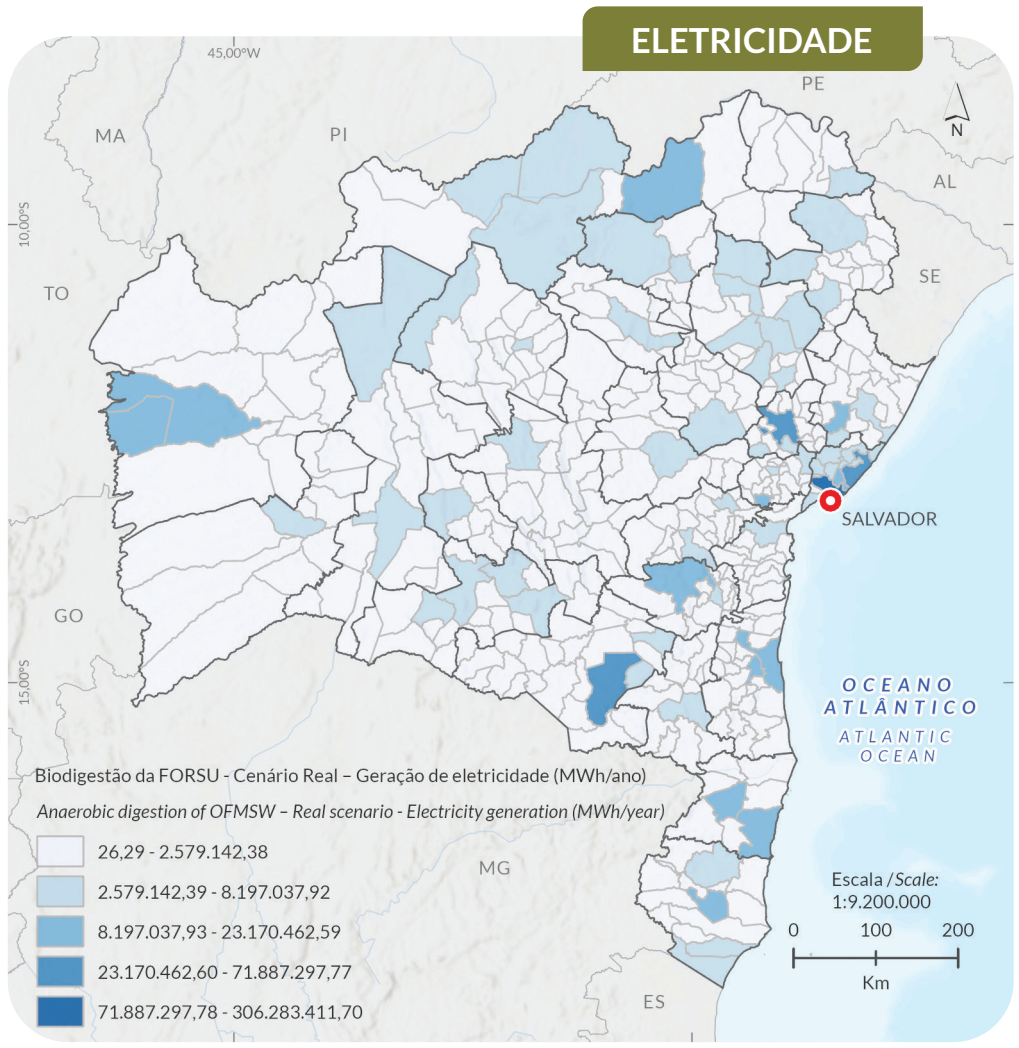
BIOGÁS

BIOGAS



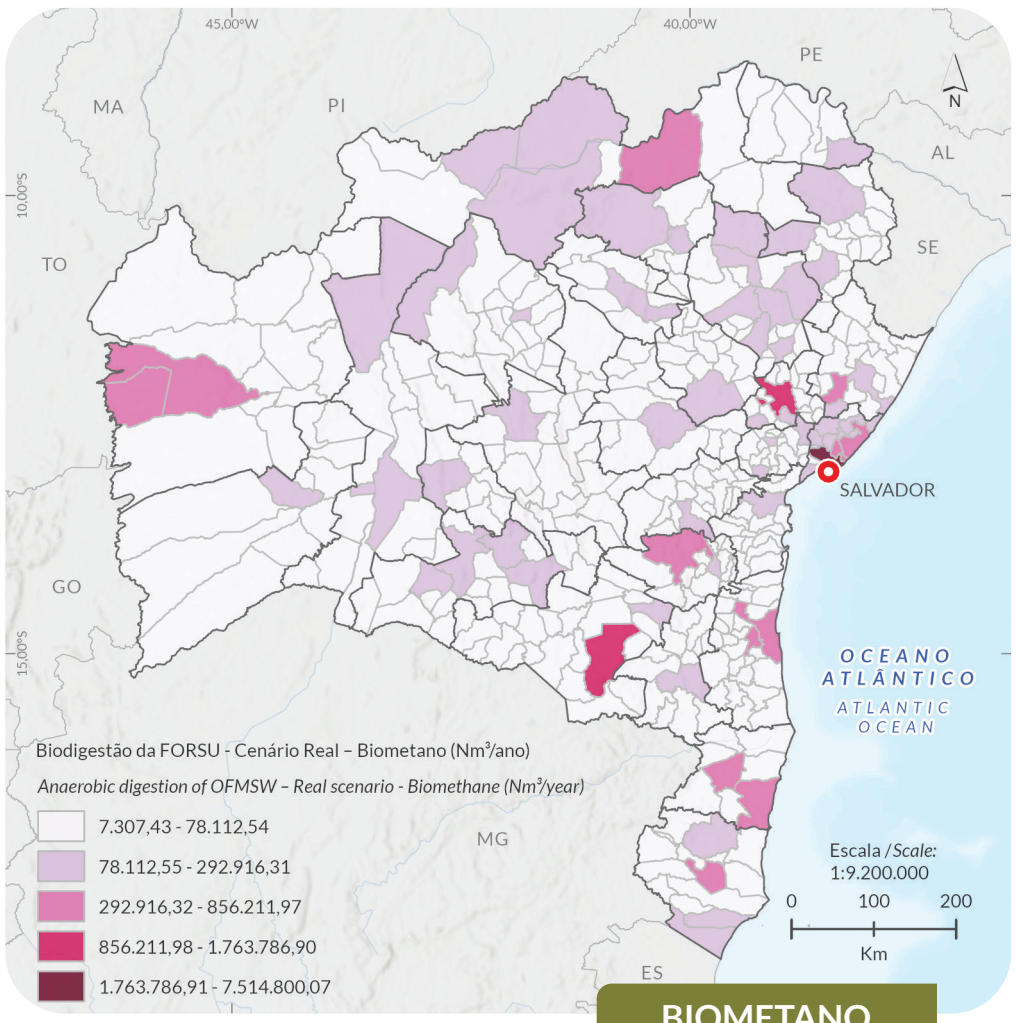
ELETRICIDADE

ELECTRICITY



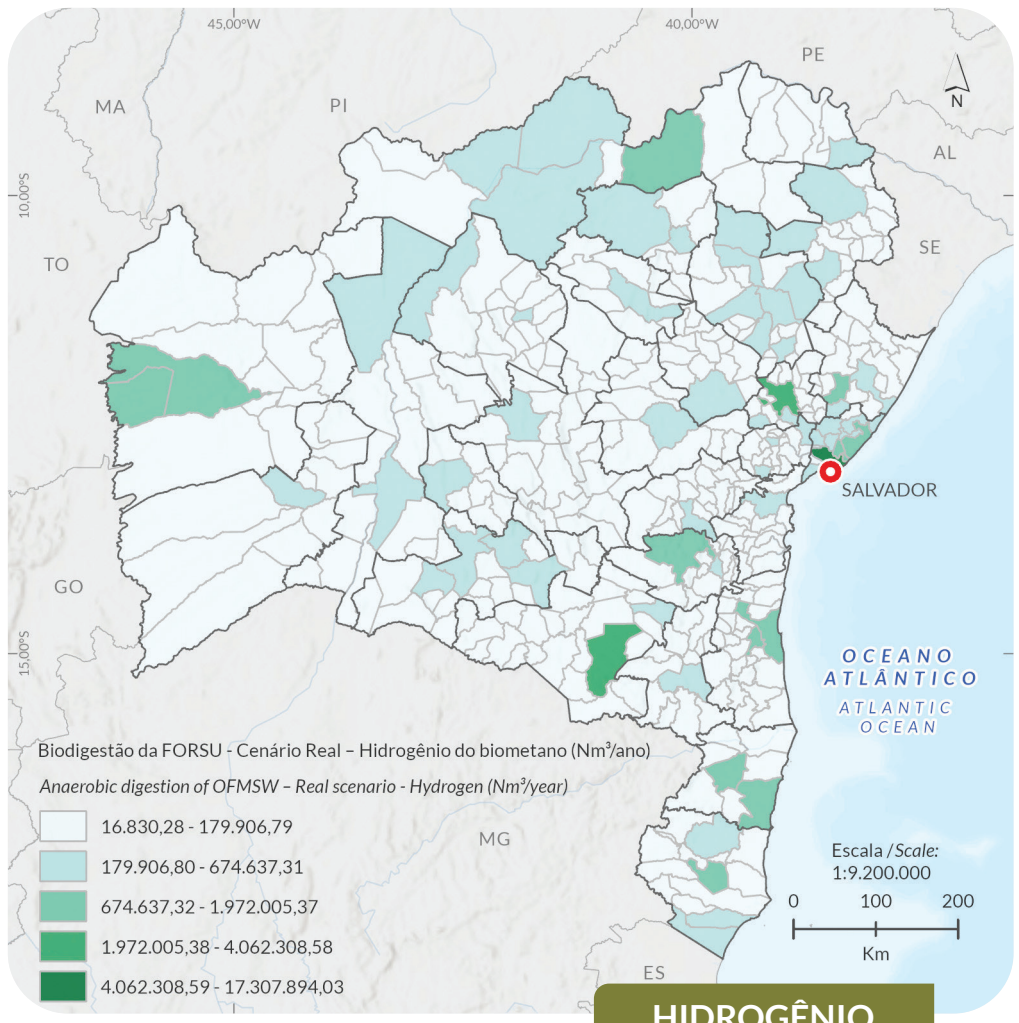
BIOMETANO

BIOMETHANE



HIDROGÊNIO

HYDROGEN



Mapa 3.4 / *Map 3.4*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA FORSU

CENÁRIO IDEAL

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM ANAEROBIC DIGESTION OF OFMSW - IDEAL SCENARIO

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

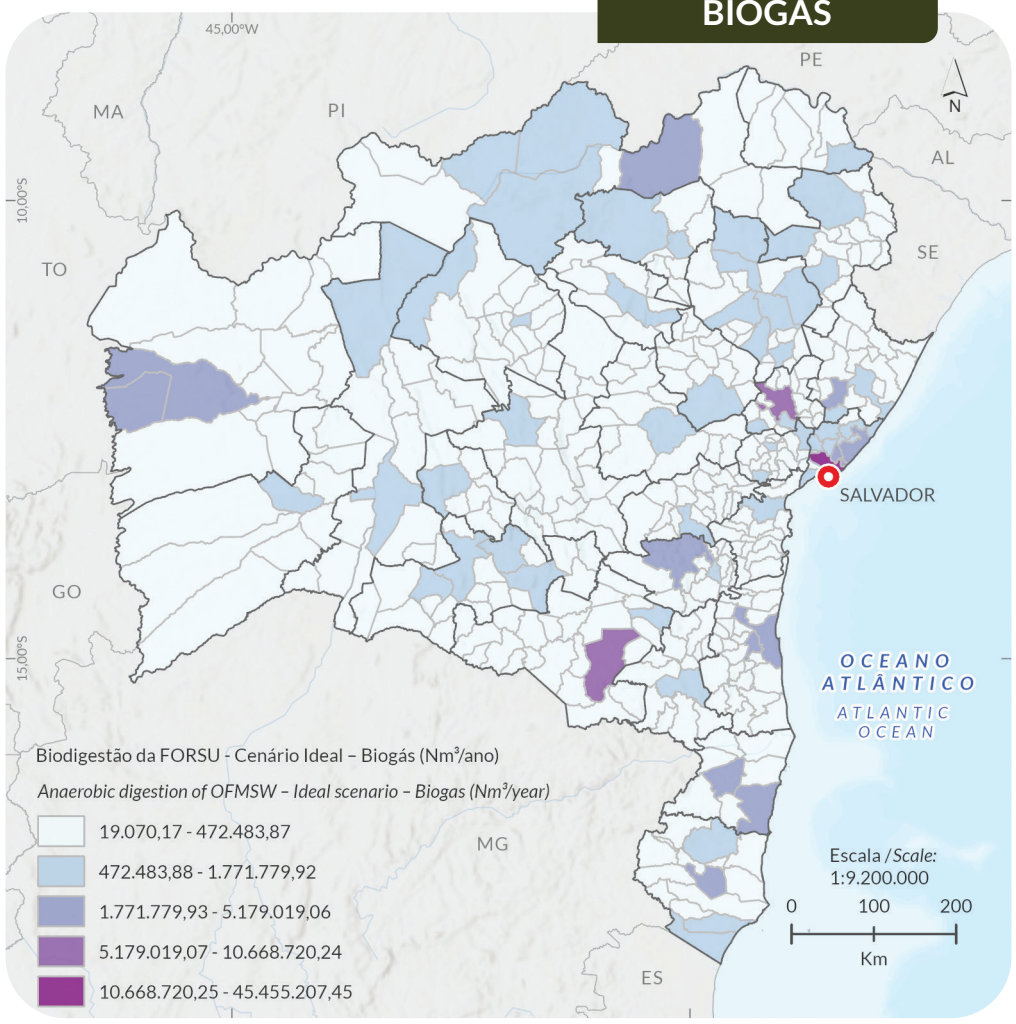
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

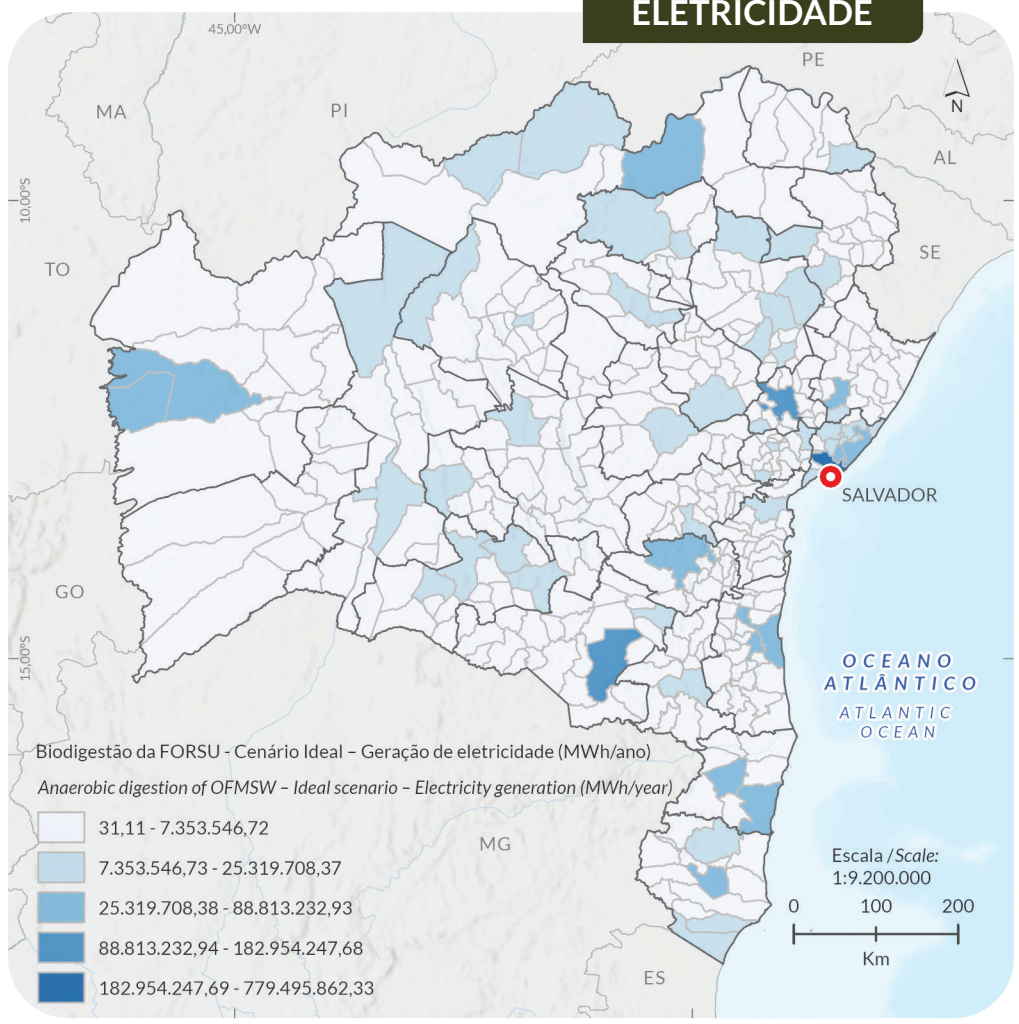
BIOGAS

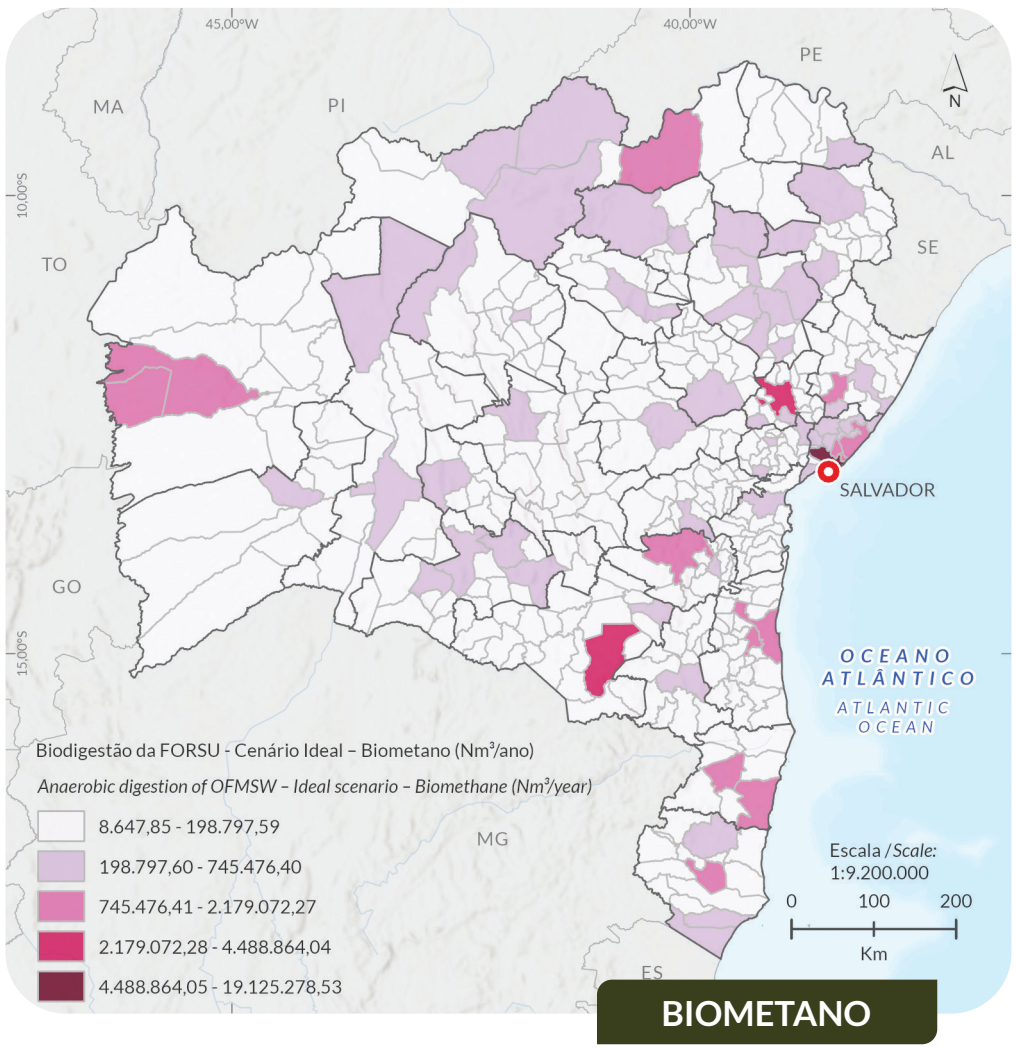
BIOGÁS



ELECTRICITY

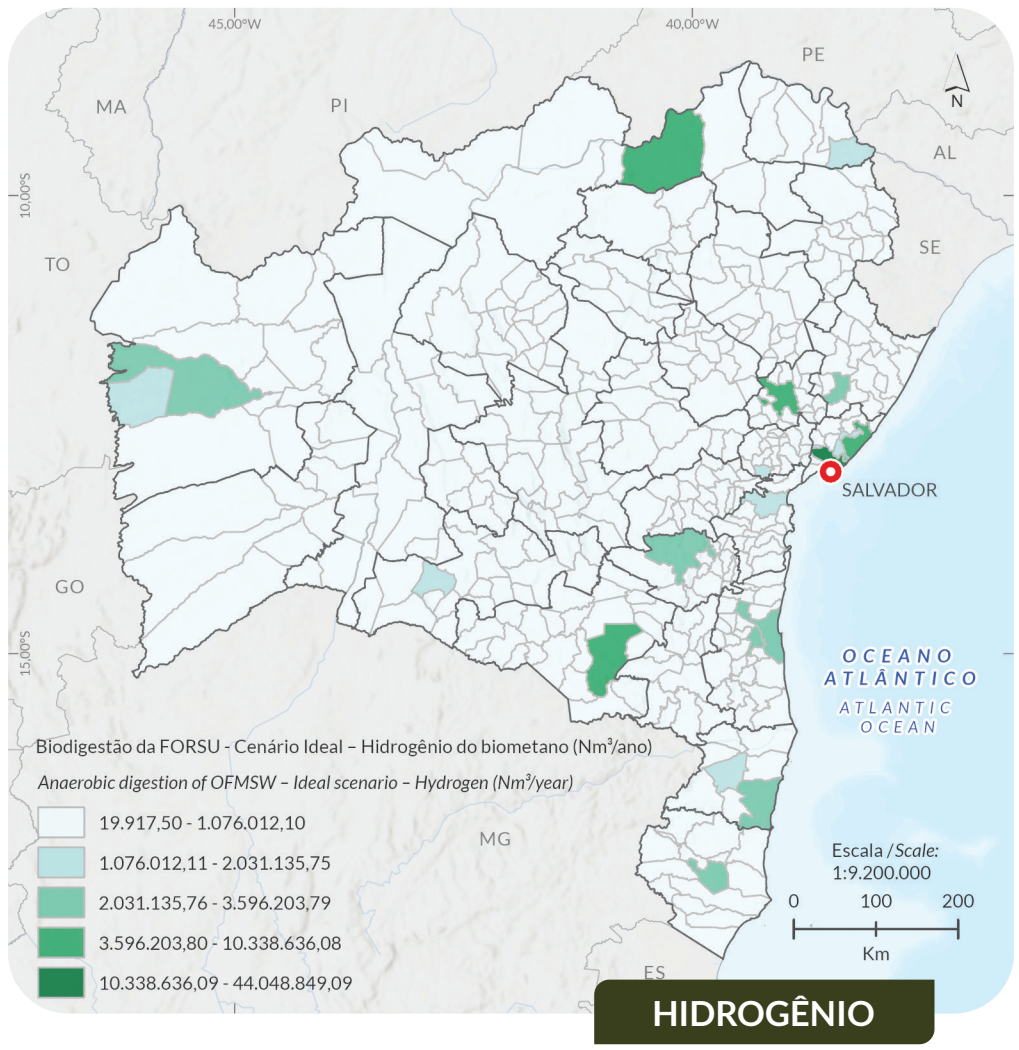
ELETRICIDADE





BIOMETHANE

BIOMETANO



HYDROGEN

HIDROGÊNIO

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA BAHIA

The analysis of the ten most populous municipalities in the State of Bahia indicates that this group comprises approximately 34% of the state's population (5.13 million inhabitants) and accounts for 41.5% of the OFMSW collected and treated in the real scenario, corresponding to 337.9 thousand t per year. The capital, Salvador, alone concentrates 52% of this volume, reflecting both its large population and its more established infrastructure for source separated collection and processing of the organic fraction.

The comparison between the real and ideal scenarios reveals a substantial potential to expand electricity generation from the energy recovery of OFMSW. In the real scenario, the ten largest municipalities have an estimated potential of 566,272 GWh/year, whereas in the ideal scenario this value reaches approximately 1.5 million GWh/year, an increase of more than 164%. This increase is directly associated with higher collection and treatment rates for the organic fraction, resulting in greater biogas production, subsequent upgrading to biomethane, and, consequently, greater availability for conversion to electricity.

In the municipal breakdown, Salvador establishes itself as the principal generator, increasing from 306,283 GWh/year in the real scenario to 779,495 GWh/year in the ideal scenario an increase of more than 154%. This performance underscores the importance of large urban areas, were high generation of organic waste and greater installed processing capacity favor energy recovery. Intermediate-size municipalities, such as Feira de Santana, Vitória da Conquista, and Camaçari, also show substantial increases, ranging from 150% to 180%, demonstrating that, even outside the State capital, there is significant potential to expand electricity generation from organic waste.

In smaller municipalities, such as Itabuna, Ilhéus, Porto Seguro, Jequié, and Barreiras, biomethane and hydrogen production is proportionally lower, constrained by the smaller volume of treated OFMSW. In the real scenario, biomethane production rarely exceeds 600 thousand Nm^3/year and hydrogen production 1.3 million Nm^3/year. In the ideal scenario, however, these values more than double, indicating that even in smaller-scale contexts, expanding the collection and treatment of the organic fraction can yield significant increases in the supply of renewable fuels.

Overall, the transition from the real to the ideal scenario demonstrates that universalizing and optimizing the treatment of OFMSW can more than double the statewide energy-recovery potential, with proportional gains across all evaluated pathways biogas, biomethane, electricity, and hydrogen. These results reinforce the need for integrated public policies encompassing major urban centers as well as intermediate and smaller municipalities, in order to maximize the energy and environmental benefits of OFMSW management.

The valorization of the OFMSW, coupled with its diversion from environmentally unsound disposal pathways, delivers multiple benefits. Environmentally, it helps mitigate greenhouse-gas emissions, especially methane, and reduces impacts such as leachate generation and the contamination of soils and aquifers. On the energy front, it diversifies the energy mix, reduces dependence on fossil fuels, and supports the production of renewable energy carriers. From a socioeconomic perspective, it stimulates local value chains, creates skilled jobs, and strengthens the circular economy, transforming an environmental liability into a strategic asset for sustainable development.

Regarding the valorization of residual waste through thermochemical technologies, such as incineration and gasification, these processes allow the conversion of the energy content present in waste into useful forms, such as heat, electricity, and gaseous or liquid fuels. The application of these technological routes represents a strategic alternative to complement biological treatment, enabling greater energy diversification and contributing to the reduction of the volume of waste destined for final disposal. Furthermore, these advanced solutions contribute to the achievement of decarbonization goals and the promotion of more sustainable and integrated waste management.

Based on energy recovery from residual waste, the available technical energy potential in the state was estimated. Table 3.9 presents the energy potential resulting from the valorization of rejects, considering the distribution of estimated potential across the two scenarios analyzed. For each municipality, the following indicators are reported for the real scenario: electricity-generation potential and estimated hydrogen production via gasification.

Table 3.10, in turn, presents the same indicators for the ten municipalities with the highest identified technical potential in Bahia, considering the ideal scenario.

A análise dos dez municípios com maior população no Estado da Bahia indica que esse conjunto reúne, aproximadamente, 34% da população estadual (5,13 milhões de habitantes) e responde por 41,5% da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (Forsu) coletada e tratada no cenário real, correspondendo a 337,9 mil t anuais. A capital, Salvador, concentra, isoladamente, 52% desse volume, reflexo tanto de seu elevado contingente populacional quanto da infraestrutura mais consolidada para a coleta seletiva e o processamento da fração orgânica.

A comparação entre os cenários real e ideal evidencia um expressivo potencial de ampliação da geração de eletricidade a partir do aproveitamento energético da Forsu. No cenário real, os dez maiores municípios apresentam potencial estimado de 566.272 GWh/ano, enquanto no cenário ideal esse valor alcança aproximadamente 1,5 milhão de GWh/ano, representando acréscimo superior a 164%. Esse aumento está diretamente associado à expansão das taxas de coleta e tratamento da fração orgânica, resultando em maior produção de biogás, subsequente purificação em biometano e, por conseguinte, maior disponibilidade para conversão em energia elétrica.

No recorte municipal, Salvador consolida-se como o principal polo gerador, evoluindo de 306.283 GWh/ano no cenário real para 779.495 GWh/ano no cenário ideal com incremento superior a 154%. Tal desempenho reforça a importância das grandes áreas urbanas, onde a elevada geração de resíduos orgânicos e a maior capacidade instalada de processamento favorecem a valorização energética. Municípios de porte intermediário, como Feira de Santana, Vitória da Conquista e Camaçari, também apresentam aumentos expressivos, variando entre 150% e 180%, o que demonstra que, mesmo fora da capital, há potencial relevante para a expansão da geração de energia elétrica a partir de resíduos orgânicos.

Nos municípios de menor porte, como Itabuna, Ilhéus, Porto Seguro, Jequié e Barreiras, a produção de biometano e hidrogênio é proporcionalmente menor, limitada pelo menor volume de Forsu tratado. No cenário real, a produção de biometano raramente supera 600 mil Nm^3/ano e a de hidrogênio, 1,3 milhão Nm^3/ano. Contudo, no cenário ideal, esses valores mais que dobram, evidenciando que, mesmo em contextos de menor escala, a ampliação da coleta e do tratamento da fração orgânica pode gerar aumentos significativos na oferta de combustíveis renováveis.

De forma global, a transição do cenário real para o ideal demonstra que a universalização e otimização do tratamento da Forsu pode mais que duplicar o potencial de recuperação energética no Estado, com ganhos proporcionais em todas as rotas avaliadas: biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio. Esses resultados reforçam a necessidade de políticas públicas integradas, abrangendo tanto os grandes centros urbanos quanto os municípios intermediários e de menor porte, de modo a maximizar os benefícios energéticos e ambientais da gestão da Forsu.

A valorização da Forsu, associada ao seu desvio de destinos ambientalmente inadequados, apresenta múltiplos benefícios. No âmbito ambiental, contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, especialmente metano, e reduz impactos como lixiviação e contaminação de solos e aquíferos. No campo energético, promove a diversificação da matriz, reduz a dependência de combustíveis fósseis e favorece a produção de vetores energéticos renováveis. Sob a perspectiva socioeconômica, fomenta cadeias produtivas locais, gera empregos qualificados e fortalece a economia circular, transformando um passivo ambiental em ativo estratégico para o desenvolvimento sustentável.

No que se refere à valorização dos rejeitos por meio de tecnologias termoquímicas, como a incineração e a gaseificação, esses processos permitem a conversão do conteúdo energético presente nos resíduos em formas úteis, como calor, eletricidade e combustíveis gasosos ou líquidos. A aplicação dessas rotas tecnológicas representa uma alternativa estratégica para complementar o tratamento biológico, viabilizando maior diversificação energética e contribuindo para a redução do volume de resíduos destinados à disposição final. Além disso, essas soluções avançadas colaboram com o cumprimento de metas de descarbonização e com a promoção de uma gestão mais sustentável e integrada dos resíduos.

Com base na valorização dos rejeitos, foi possível estimar o potencial técnico energético disponível no estado. A *Tabela 3.9* apresenta os potenciais energéticos resultantes da valorização dos rejeitos, considerando a distribuição dos potenciais estimados nos dois cenários analisados. Para cada município, são apresentados, no cenário real, os seguintes indicadores: potencial de geração de energia elétrica e produção estimada de hidrogênio via gaseificação.

A *Tabela 3.10*, por sua vez, reúne os mesmos indicadores para os dez municípios com maior potencial técnico identificado na Bahia, considerando o cenário ideal.

Figura 3.13 Fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos reciclada.
Figure 3.13 *Recycled organic fraction of municipal solid waste.*



Foto / *Photo*: rookielion / stock.adobe.com

Tabela 3.9 Potenciais técnicos da valorização energética dos rejeitos nos dez municípios com maior potencial disponível no Estado da Bahia – Cenário real.
Table 3.9 *Technical energy potentials from the valorization of the residual waste in the ten municipalities with the highest available potential in the State of Bahia –Real scenario*

CENÁRIO REAL / *REAL CENARIO*					
Município *Municipality*	**Habitantes** *Inhabitants*	**Tecnologia termoquímica usada** *Thermochemical technology used*	**RSU coletado e tratado** *MSW collected and treated*	**Potencial de geração de eletricidade** *Electricity generation potential*	**Resíduo seco recuperado** *Dry waste recovered*
			(t/ano) *(t/year)*	**(MWh/ano)** *(MWh/year)*	**(t/ano)** *(t/year)*
Salvador	2.568.928	Incineração	508.642,09	339.095,00	2.411,95
Feira de Santana	657.948	Gaseificação de Leito Fluidizado	137.232,46	69.115,63	705,73
Vitória da Conquista	394.024	Gaseificação de Leito Fluidizado	80.200,30	40.392,00	422,64
Camaçari	319.394	Gaseificação de Leito Fluidizado	64.983,47	32.728,21	342,59
Juazeiro	254.481	Gaseificação de Leito Fluidizado	52.400,21	26.390,79	272,96
Lauro de Freitas	217.960	Gaseificação de Leito Fluidizado	45.391,07	22.860,72	233,79
Itabuna	196.676	Gaseificação de Leito Fluidizado	39.283,96	19.784,94	210,96
Porto Seguro	181.007	Gaseificação de Leito Fluidizado	38.371,66	19.325,47	194,15
Ilhéus	189.028	Gaseificação de Leito Fluidizado	37.756,35	19.015,57	202,76
Jequié	168.733	Gaseificação de Leito Fluidizado	35.505,20	17.881,80	180,99
Total 10+	**5.148.179**		**1.039.767**	**606.590**	**5.178**
Total estadual / *State total*	**14.850.513**		**2.463.898**	**1.474.558**	**11.377**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Tabela 3.10 Potenciais técnicos da valorização energética dos rejeitos nos dez municípios com maior potencial disponível no Estado da Bahia – Cenário ideal.
Table 3.10 *Technical energy potentials from the valorization of the residual waste in the ten municipalities with the highest available potential in the State of Bahia – Ideal scenario.*

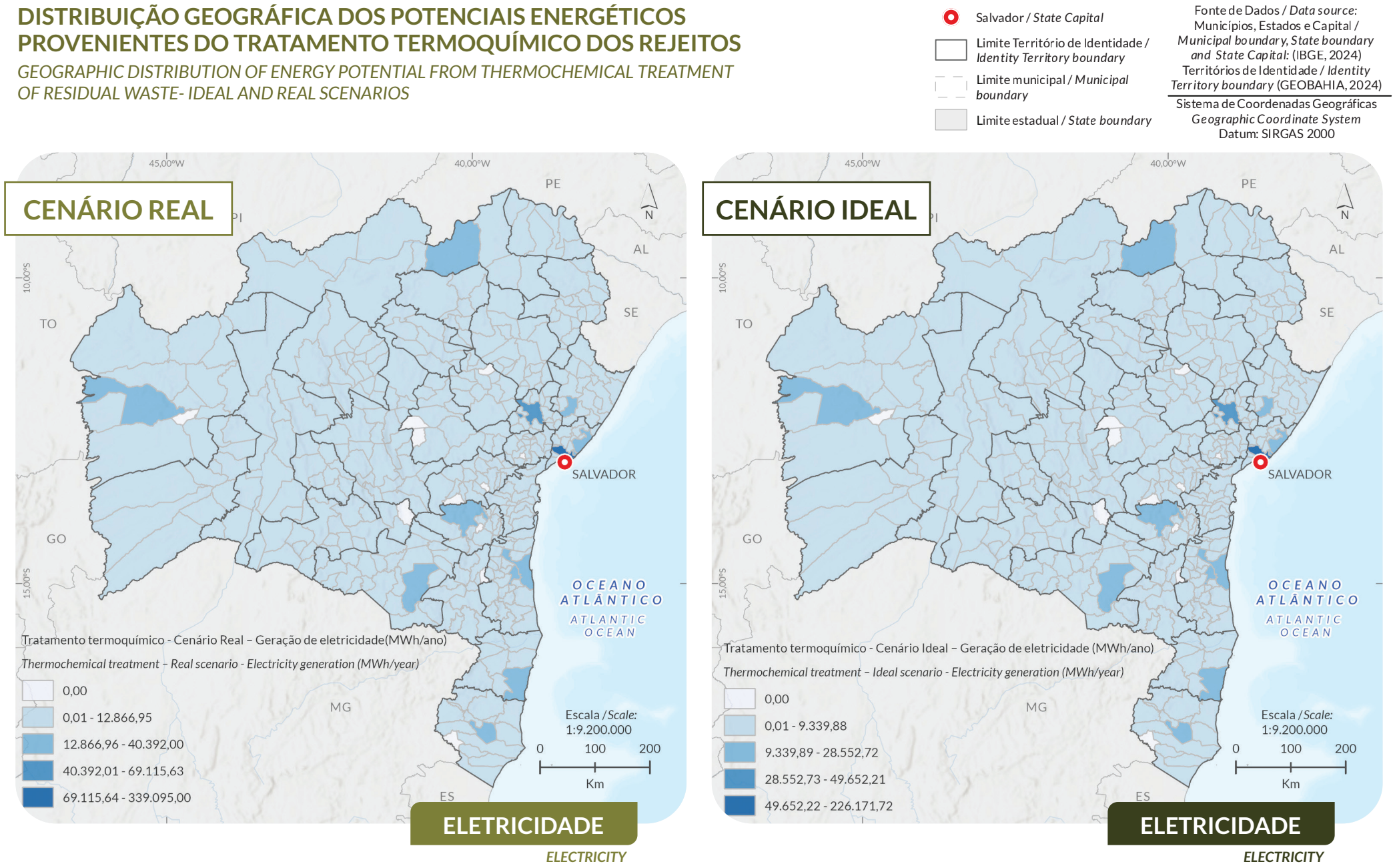
CENÁRIO IDEAL / *IDEAL SCENARIO*					
Município *Municipality*	**Habitantes** *Inhabitants*	**Tecnologia termoquímica usada** *Thermochemical technology used*	**RSU coletado e tratado** *MSW collected and treated*	**Potencial de geração de eletricidade** *Electricity generation potential*	**Resíduo seco recuperado** *Dry waste recovered*
			(t/ano) *(t/year)*	**(MWh/ano)** *(MWh/year)*	**(t/ano)** *(t/year)*
Salvador	2.568.928	Incineração	339.257,30	226.171,72	25.948,89
Feira de Santana	657.948	Gaseificação de Leito Fluidizado	98.586,90	49.652,21	7.592,61
Vitória da Conquista	394.024	Gaseificação de Leito Fluidizado	56.692,82	28.552,72	4.546,97
Camaçari	319.394	Gaseificação de Leito Fluidizado	45.923,55	23.128,89	3.685,76
Juazeiro	254.481	Gaseificação de Leito Fluidizado	37.328,42	18.800,05	2.936,67
Lauro de Freitas	217.960	Gaseificação de Leito Fluidizado	32.575,98	16.406,54	2.515,22
Itabuna	196.676	Gaseificação de Leito Fluidizado	27.413,09	13.806,30	2.269,61
Porto Seguro	181.007	Gaseificação de Leito Fluidizado	27.853,28	14.028,00	2.088,79
Ilhéus	189.028	Gaseificação de Leito Fluidizado	26.347,10	13.269,43	2.181,35
Jequié	168.733	Gaseificação de Leito Fluidizado	25.651,55	12.919,12	1.947,15
Total 10+	**5.148.179**		**717.630**	**416.735**	**55.713**
Total estadual / *State total*	**14.850.513**		**1.695.205**	**1.010.970**	**122.399**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 3.5 / *Map 3.5*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DOS REJEITOS

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM THERMOCHEMICAL TREATMENT OF RESIDUAL WASTE- IDEAL AND REAL SCENARIOS



The assessment of the ten municipalities analyzed reveals significant differences in the thermochemical energy recovery from MSW, in both absolute and relative terms. Salvador, with 2.56 million inhabitants, stands out as the principal processing hub, treating 508.6 thousand t/year of MSW, approximately half of the total considered. The State capital employs incineration as the predominant technology, achieving an electricity potential of 339,095 MWh/year, a value exceeding the sum of the other municipalities. However, recovery of dry recyclables is limited, at only 2,411.95 t/year, indicating a predominance of energy conversion over materials separation and recycling.

Feira de Santana, the second-most populous municipality in the group, processes 137.2 thousand t/year via fluidized-bed gasification, yielding 69,115 MWh/year of electricity. Although its absolute output is lower than Salvador's, its proportional indicators outperform those of other similarly sized cities, standing out for higher relative efficiency in energy recovery from waste.

The municipalities of Vitória da Conquista and Camaçari exhibit similar performance, treating 80.2 thousand and 64.9 thousand t/year, respectively, with electricity generation of 40,392 and 32,728 MWh/year. Recovery of dry recyclables is likewise consistent with their population sizes, reaching about 400 t/year in Vitória da Conquista and 340 t/year in Camaçari.

The smaller municipalities, Juazeiro, Lauro de Freitas, Itabuna, Porto Seguro, Ilhéus, and Jequié, treat between 35,500 and 52,400 t/year of MSW, all via gasification. Their electricity potentials range from 17,881 to 26,390 MWh/year, with recovery of dry recyclables proportional to population size, albeit limited, fluctuating between 180 and 270 t/year. These municipalities exhibit relatively homogeneous energy performance, reflecting similar efficiency patterns within the same population bracket.

A avaliação dos dez municípios analisados revela diferenças significativas na valorização termoquímica dos resíduos sólidos urbanos RSU, tanto em termos absolutos quanto proporcionais. Salvador, com 2,56 milhões de habitantes, destaca-se como o principal polo de processamento, tratando 508,6 mil t anuais de RSU – aproximadamente, metade do total considerado. A capital adota a incineração como tecnologia predominante, alcançando um potencial elétrico de 339.095 MWh/ano, valor superior à soma dos demais municípios. No entanto, observa-se uma recuperação limitada de resíduos secos, com apenas 2.411,95 t anuais, o que evidencia a predominância da conversão energética em detrimento da separação e reciclagem de materiais.

Feira de Santana, 2º município mais populoso do grupo, processa 137,2 mil t/ano por meio da gaseificação em leito fluidizado, resultando em 69.115 MWh/ano de eletricidade. Embora o desempenho absoluto seja inferior ao de Salvador, seus indicadores proporcionais superam os de outras cidades de porte semelhante, destacando-se pela maior eficiência relativa no aproveitamento energético dos resíduos.

Vitória da Conquista e Camaçari apresentam desempenhos próximos, tratando, respectivamente, 80,2 mil e 64,9 mil t/ano, com geração de 40.392 e 32.728 MWh/ano de eletricidade. A recuperação de materiais secos também se mantém em patamares compatíveis com suas populações, alcançando cerca de 400 t/ano, em Vitória da Conquista, e 340 em Camaçari.

Os municípios de menor porte – Juazeiro, Lauro de Freitas, Itabuna, Porto Seguro, Ilhéus e Jequié – tratam entre 35.500 e 52.400 t anuais de RSU, todos por meio de gaseificação. Seus potenciais elétricos variam de 17.881 a 26.390 MWh/ano, com recuperação de materiais secos proporcional ao porte populacional, ainda que limitada, oscilando entre 180 e 270 t anuais. Esses municípios apresentam desempenho energético relativamente homogêneo, refletindo padrões semelhantes de eficiência dentro da mesma faixa populacional.

No cenário ideal, observa-se um avanço expressivo em todos os indicadores analisados. Salvador mantém sua posição de liderança, tratando 339,2 mil t anuais de RSU por incineração, com um potencial de geração de 226.171 MWh/ano e recuperação de 25.948 t de materiais secos, desempenho significativamente superior ao verificado no cenário real, o que evidencia uma maior integração entre valorização energética e reciclagem.

Feira de Santana, com 657.900 habitantes, apresenta crescimento marcante, processando 98.500 t anuais, gerando 49.652 MWh/ano e recuperando 7.592 t de materiais recicláveis, consolidando-se como polo regional de valorização integrada. Vitória da Conquista segue a mesma tendência, com 56.600 t tratadas, geração de 28.552 MWh/ano e recuperação de 4.546 t, destacando-se pela elevada eficiência proporcional frente ao seu porte populacional.

Os municípios intermediários – Camaçari, Juazeiro e Lauro de Freitas – demonstram evolução consistente, com volumes tratados entre 32.500 e 45.900 t anuais e potenciais elétricos variando entre 16.406 e 23.128 MWh/ano, acompanhados de crescimento na recuperação de materiais secos.

Itabuna, Porto Seguro e Ilhéus mantêm padrões de desempenho semelhantes, com tratamento entre 26 mil e 28 mil t anuais, geração entre 13 mil e 14 mil MWh/ano e recuperação de cerca de 2 mil t de material seco por ano. Jequié, o menor município do grupo, processa 25.600 toneladas, gera 12.919 MWh/ano e recupera 1.947 t, apresentando desempenho proporcional compatível com cidades de porte semelhante.

Em ambos os cenários, a gaseificação em leito fluidizado permanece como a tecnologia predominante em nove dos dez municípios analisados. Salvador segue como exceção, mantendo a incineração como método principal. A capital continua concentrando cerca de metade do RSU tratado e do potencial elétrico do grupo, reforçando sua centralidade na matriz estadual de valorização energética. No entanto, municípios de médio porte, como Feira de Santana e Vitória da Conquista, demonstram alta competitividade proporcional, sugerindo que a descentralização da infraestrutura pode ampliar a eficiência do sistema como um todo.

Em escala estadual, os dez municípios analisados representam, aproximadamente, 42% do total de RSU tratado e 41% do potencial elétrico projetado, reafirmando sua relevância para o planejamento integrado da gestão de resíduos sólidos. A baixa recuperação de recicláveis observada, especialmente no cenário real, reforça a necessidade de políticas complementares de segregação e triagem, integradas aos sistemas termoquímicos, a fim de maximizar a eficiência global e o valor agregado da cadeia de gestão de resíduos.

Os potenciais energéticos projetados estão intrinsecamente ligados às propriedades térmicas e à composição gravimétrica dos resíduos, bem como ao teor de umidade e às eficiências associadas à recuperação de materiais. Esses fatores definem o poder calorífico e a viabilidade técnica do aproveitamento energético, influenciando diretamente o desempenho das tecnologias aplicadas. Dessa forma, a recuperação de energia por meio de rotas termoquímicas deve ser acompanhada de processos eficazes de triagem e reciclagem, garantindo a qualidade da fração destinada ao processamento térmico e promovendo, simultaneamente, a valorização de materiais com maior valor econômico e ambiental.

No contexto do potencial de produção de hidrogênio a partir da gaseificação dos RSU, essa tecnologia viabiliza a conversão dos resíduos em gás de síntese que, após etapas de purificação e separação, resulta em hidrogênio de elevada pureza. A análise considera os cenários real e ideal para os municípios avaliados, destacando o potencial energético associado a essa rota avançada de valorização de resíduos.

Nesse escopo, a *Tabela 3.11* apresenta os potenciais estimados de produção de hidrogênio para os cenários analisados, permitindo a comparação entre os resultados e a identificação das diferenças decorrentes das condições operacionais e tecnológicas adotadas em cada caso. Essa análise contribui para a compreensão do impacto dessas variáveis sobre o aproveitamento do hidrogênio e suas implicações na valorização energética dos RSU.

Tabela 3.11 Potencial estimado de produção de hidrogênio a partir da gaseificação nos cenários real e ideal.
Tabela 3.11 *Estimated hydrogen production potential from gasification — Real and Ideal scenarios.*

Município *Municipality*	Habitantes *Inhabitants*	Cenário real *Real scenario*	Cenário ideal *Ideal scenario*
		Produção de hidrogênio a partir da gaseificação *Hydrogen production from gasification*	Produção de hidrogênio a partir da gaseificação *Hydrogen production from gasification*
		(Nm^3/ano) / *(Nm^3/year)*	(Nm^3/ano) / *(Nm^3/year)*
Feira de Santana	657.948	77.869.727,78	55.941.101,14
Vitória da Conquista	394.024	45.508.007,44	32.169.169,01
Camaçari	319.394	36.873.531,06	26.058.371,56
Juazeiro	254.481	29.733.419,59	21.181.244,91
Lauro de Freitas	217.960	25.756.228,49	18.484.568,26
Itabuna	196.676	22.290.871,35	15.554.991,77
Porto Seguro	181.007	21.773.209,13	15.804.770,87
Ilhéus	189.028	21.424.062,06	14.950.115,85
Jequié	168.733	20.146.692,48	14.555.440,75
Alagoinhas	160.662	18.989.358,08	13.630.029,38
Total 10+	**2.739.913**	**320.365.108**	**228.329.804**
Total estadual / *State total*	**14.850.513**	**1.279.647.411**	**884.449.105**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

In the ideal scenario, substantial improvements are observed across all analyzed indicators. Salvador maintains its leading position, treating 339.2 thousand t/year of MSW via incineration, with an electricity generation potential of 226,171 MWh/year and recovery of 25,948 t of dry recyclables, performance that is significantly superior to the real scenario, indicating greater integration between energy recovery and recycling.

Feira de Santana municipality, with 657,900 inhabitants, shows significant growth, processing 98,500 tons annually, generating 49,652 MWh/year, and recovering 7,592 tons of recyclable materials, consolidating its role as a regional hub for integrated recovery and recycling. The municipality of Vitória da Conquista follows the same trend, with 56,600 tons treated, generating 28,552 MWh/year and recovering 4,546 tons, standing out for its high proportional efficiency relative to its population size.

The intermediate municipalities, Camaçari, Juazeiro and Lauro de Freitas, show consistent progress, with treated volumes ranging from 32,500 to 45,900 t/year and electricity generation potentials between 16,406 and 23,128 MWh/year, accompanied by growth in the recovery of dry recyclables.

The municipalities of Itabuna, Porto Seguro, and Ilhéus maintain similar performance standards, treating between 26,000 and 28,000 tons per year, generating between 13,000 and 14,000 MWh/year, and recovering about 2,000 tons of dry material per year. Jequié, the smallest municipality in the group, processes 25,600 tons, generates 12,919 MWh/year, and recovers 1,947 tons, exhibiting proportional performance comparable to similarly sized cities.

In both scenarios, fluidized-bed gasification remains the predominant technology in nine of the ten municipalities analyzed. Salvador is the exception, maintaining incineration as the primary method. The State capital continues to account for about half of the MSW treated and about half of the group's electricity potential, reinforcing its centrality in the statewide energy recovery mix. However, mid-sized municipalities such as Feira de Santana and Vitória da Conquista exhibit strong proportional performance, suggesting that decentralizing infrastructure could improve the overall efficiency of the system.

At the statewide level, the ten municipalities analyzed account for approximately 42% of the MSW treated and 41% of the projected electricity potential, reaffirming their relevance to integrated solid-waste management planning. The low recovery of recyclables observed, particularly in the real scenario, underscores the need for complementary source segregation and sorting policies integrated with thermochemical systems, in order to maximize overall efficiency and value added across the waste management chain.

The projected energy potentials are intrinsically linked to the thermal properties and gravimetric composition of the waste, as well as to moisture content and the efficiencies associated with materials recovery. These factors determine the heating value and the technical feasibility of energy recovery, directly influencing the performance of the applied technologies. Accordingly, energy recovery via thermochemical pathways should be accompanied by effective sorting and recycling processes, ensuring the quality of the fraction destined for thermal processing while simultaneously valorizing materials with higher economic and environmental value.

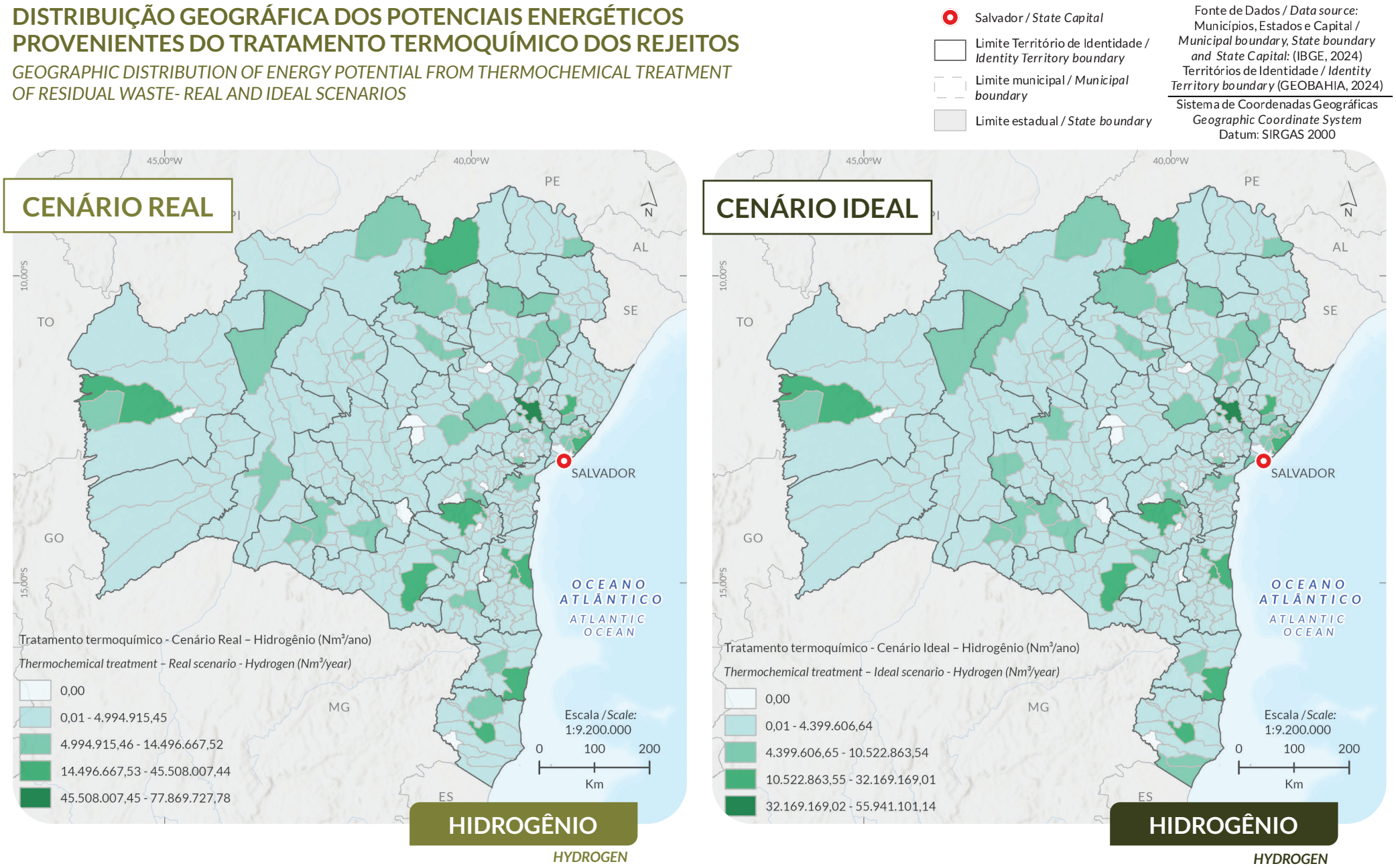
In the context of hydrogen production potential from the gasification of municipal solid waste (MSW), this technology enables the conversion of waste into synthesis gas (syngas) which, after purification and separation steps, yields high purity hydrogen. The analysis considers real and ideal scenarios for the municipalities assessed, highlighting the energy potential associated with this advanced waste valorization pathway.

Within this scope, Table 3.11 presents the estimated hydrogen production potentials for the scenarios analyzed, enabling comparison of the results and identification of differences arising from the operational and technological conditions adopted in each case. This analysis contributes to understanding the impact of these variables on hydrogen production and its implications for the energy valorization of MSW.

Mapa 3.6 / *Map 3.6*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DOS REJEITOS

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM THERMOCHEMICAL TREATMENT OF RESIDUAL WASTE- REAL AND IDEAL SCENARIOS



The analysis of hydrogen production potential from gasification in the real and ideal scenarios reveals significant differences in both absolute and relative terms (Table 3.11). The ten municipalities assessed comprise approximately 2.73 million inhabitants 18% of the state's population, yet account for 25%–27% of the state's projected hydrogen production. This result highlights the strategic role of this group in the energy recovery from MSW and its contribution to balancing the state's energy mix.

In the real scenario, the group's combined production reaches 320.3 million Nm³/year, whereas in the ideal scenario it decreases to 228.3 million Nm³/year. This reduction is not due to reduced technological efficiency, but rather to the prioritization of sorting and the allocation of recyclable materials in the ideal scenario, which lowers the volume of waste sent to gasification without compromising the quality of the fraction destined for energy recovery. This approach enables greater integration between energy recovery and materials recovery, reinforcing alignment with circular economy principles.

Among the municipalities, Feira de Santana exhibits the highest hydrogen production volume in both scenarios, followed by Vitória da Conquista and Camaçari, which maintain intermediate performance. Cities such as Juazeiro, Lauro de Freitas, Itabuna, and Porto Seguro show homogeneous results consistent with their population size, whereas Ilhéus and Jequié, although presenting lower volumes, maintain good relative efficiency.

A análise do potencial de produção de hidrogênio a partir da gaseificação nos cenários real e ideal evidencia diferenças relevantes, tanto em valores absolutos quanto proporcionais (*Tabela 3.11*). Os dez municípios avaliados concentram aproximadamente 2,73 milhões de habitantes, o que representa 18% da população estadual, mas respondem por 25% a 27% da produção de hidrogênio projetada para o estado. Esse resultado destaca o papel estratégico desse grupo na valorização energética dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e sua contribuição para o equilíbrio da matriz energética estadual.

No cenário real, a produção combinada do grupo alcança 320,3 milhões Nm³/ano, enquanto no cenário ideal esse valor se reduz para 228,3 milhões Nm³/ano. Essa diminuição não decorre de menor eficiência tecnológica, mas sim da priorização da triagem e da destinação de materiais recicláveis no cenário ideal, o que reduz o volume de resíduos encaminhado à gaseificação, sem comprometer a qualidade da fração destinada ao aproveitamento energético. Essa abordagem permite uma maior integração entre valorização energética e valorização material, reforçando o alinhamento com os princípios da economia circular.

Entre os municípios, Feira de Santana apresenta o maior volume de hidrogênio produzido em ambos os cenários, seguida por Vitória da Conquista e Camaçari, que mantêm desempenho intermediário. Cidades como Juazeiro, Lauro de Freitas, Itabuna e Porto Seguro apresentam resultados homogêneos e coerentes com seu porte populacional, enquanto Ilhéus e Jequié, embora apresentem menores volumes, mantêm boa eficiência proporcional.

Em escala estadual, a produção total projetada de hidrogênio cai de 1,28 bilhão para 884 milhões Nm³/ano entre os cenários real e ideal, mantendo os dez municípios com aproximadamente 25% de participação. Isso reforça sua importância para estratégias de descarbonização e transição energética no Estado.

Conforme observado nos mapas temáticos, a seguir, apresentam-se dados comparativos sobre o desempenho do aproveitamento energético e da recuperação de resíduos no estado da Bahia, considerando os cenários real e ideal. A análise evidencia o potencial de aprimoramento associado à ampliação das etapas de coleta e triagem, bem como à adoção e otimização de tecnologias de tratamento dos RSU avaliadas. A *Tabela 3.12* compara os dois cenários em relação ao potencial energético da valorização dos RSU em aterro sanitário. A *Tabela 3.13* refere-se ao potencial energético da valorização da fração orgânica de RSU e a *Tabela 3.14* ao potencial energético da valorização dos RSU através de tecnologias térmicas *Waste-to-Energy*.

Tabela 3.12 Comparação dos cenários real e ideal do potencial energético dos RSU valorizados em aterros sanitários no Estado da Bahia.
Table 3.12 *Comparison of the real and ideal scenarios of the energy potential from MSW recovered in sanitary landfills in the State of Bahia.*

Indicador *Indicator*	Cenário real *Real scenario*	Cenário ideal *Ideal scenario*	Variação *Variation* (%)
RSU coletado e tratado (t/ano) *MSW collected and treated (tons/year)*	3.591.013	4.166.886	+16,0
Recuperação de resíduos Secos (t/ano) *Dry waste recovery (tons/year)*	11.535	124.095	>100
Biogás (Nm^3/ano) *Biogas (Nm^3/year)*	390.137.397	454.153.354	+16,4
Biometano (Nm^3/ano) *Biomethane (Nm^3/year)*	149.227.554	198.984.717	+33,3
Eletricidade (MWh/ano) *Electricity (MWh/year)*	641.868	751.881	+17,1
Hidrogênio (Nm^3/ano) *Hydrogen (Nm^3/year)*	41.255.135	54.635.795	+32,4
Demanda de gás natural da Bahia (m^3/dia) *Natural gas demand in Bahia (m^3/day)*	6.890.000	6.890.000	
% da demanda de gás natural suprida *% of natural gas demand met*	5,93%	7,91%	

Fonte: Elaborada pelos autores com base nos resultados dos potenciais obtidos no estudo e em [22].
Source: Prepared by the authors based on the potential results obtained in the study and in [22].

Figura 3.14 Recuperação de resíduos secos.
Figure 3.14 *Dry waste recovery.*



Foto / *Photo:* PeskyMonkey / stock.adobe.com

Tabela 3.13 Comparação dos cenários real e ideal do potencial energético da valorização da fração orgânica de RSU.
Table 3.13 *Comparison of the real and ideal scenarios for the Energy Recovery Potential from organic fraction of MSW.*

Indicador *Indicator*	Cenário real *Real scenario*	Cenário ideal *Ideal scenario*	Variação *Variation* (%)
Forsu coletado e tratado (t/ano) *OFMSW collected and treated (tons/year)*	814.240	2.069.422	>100
Biogás (Nm^3/ano) *Biogas (Nm^3/year)*	82.645.362	210.046.373	>100
Biometano (Nm^3/ano) *Biomethane (Nm^3/year)*	34.779.941	88.385.183	>100
Eletricidade (MWh/ano) *Electricity (MWh/year)*	1.254.052.279	3.286.593.301	>100
Hidrogênio (Nm^3/ano) *Hydrogen (Nm^3/year)*	80.104.265	203.566.478	>100
Demanda de gás natural da Bahia (m^3/dia) *Natural gas demand in Bahia (m^3/day)*	6.890.000	6.890.000	
% da demanda de gás natural suprida *% of natural gas demand met*	1,38%	3,51%	

Fonte: Elaborada pelos autores com base nos resultados dos potenciais obtidos no estudo e em [22].
Source: Prepared by the authors based on the potential results obtained in the study and in [22].

At the statewide level, projected total hydrogen production decreases from 1.28 billion to 884 million Nm^3/year between the real and ideal scenarios, while the ten municipalities maintain approximately a 25% share. This underscores their importance to the state's decarbonization and energy transition strategies.

As shown in the thematic maps below, comparative data are presented on the performance of energy recovery and materials recovery in the State of Bahia, considering the real and ideal scenarios. The analysis highlights the improvement potential associated with expanding collection and sorting stages, as well as with the adoption and optimization of the MSW treatment technologies. Table 3.12 compares the two scenarios in terms of the energy potential from MSW energy recovery in sanitary landfills. Table 3.13 presents the energy potential from the valorization of OFMSW, and Table 3.14 presents the energy potential from the valorization of MSW via thermal Waste-to-Energy technologies.

Energy recovery from MSW in sanitary landfills shows a moderate difference between the real and ideal scenarios. In the ideal scenario, the total volume of waste collected and treated would increase by approximately 16%, an appreciable gain though not as pronounced as for other indicators. The most salient finding in this context is the substantial increase in the recovery of dry recyclables, revealing that the chief weakness of the current scenario lies in shortcomings of sorting and recycling systems.

Gains in the production of biogas, biomethane, electricity, and hydrogen range from 16% to 33%, indicating a considerable opportunity for energy optimization, though still constrained by the total volume of waste processed. The share of the State of Bahia's natural gas demand that could be supplied increases from 5.93% to 7.91%, a modest rise that nonetheless contributes to diversification of the regional energy mix.

Energy recovery focused exclusively on OFMSW shows even more significant gains in the ideal scenario, especially in the amount of material collected and treated, which would increase by more than 100%

Figura 3.15 Planta de Produção de Biogás.
Figure 3.15 *Biogas Production Plant.*



Foto / *Photo:* Vlad Kapusta / stock.adobe.com

Tabela 3.14 Comparação dos cenários real e ideal do potencial energético da valorização dos RSU por meio de tecnologias térmicas *Waste-to-Energy*.
Table 3.14 *Comparison of Real and Ideal Scenarios for the Energy Recovery Potential from MSW through Thermal Waste-to-Energy Technologies.*

Indicador *Indicator*	Cenário real *Real scenario*	Cenário ideal *Ideal scenario*	Variação *Variation* (%)
RSU coletado e tratado (t/ano) *MSW collected and treated (tons/year)*	2.463.398	1.695.205	-31,2
Recuperação de resíduos Secos (t/ano) *Dry waste recovery (tons/year)*	11.377	122.399	>100
Eletricidade (MWh/ano) *Electricity (MWh/year)*	1.474.558	1.010.970	-31,44
Hidrogênio (Nm^3/ano) *Hydrogen (Nm^3/year)*	1.279.647.411	884.449.105	-30,88
Demanda de energia elétrica residencial da Bahia (TWh/ano) *Residential electricity demand in Bahia (TWh/year)*	14,2	14,2	
% da demanda de eletricidade suprida *% of electricity demand met*	10,38%	9,74%	

Nota: [a]o consumo anual de energia elétrica do setor residencial baiano foi estimado a partir de dados da Neoenergia Coelba e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Em 2025, o Estado registrava, aproximadamente, 6,77 milhões de unidades consumidoras residenciais, com consumo médio mensal na Região Nordeste em torno de 175 kWh por unidade. */ Note: The annual electricity consumption in Bahia's residential sector was estimated based on data from Neoenergia Coelba and the Energy Research Company (EPE). In 2025, the state recorded approximately 6.77 million residential consumer units, with average monthly consumption in the Northeast region of around 175 kWh per unit.*
Fonte: Elaborada pelos autores com base em [21,22]. */ Source: Prepared by the authors based on* [21,22].

relative to the current situation. This increase reflects the underutilization of the energy and environmental potential of the organic fraction, the main component of MSW in Brazil. Increases in biogas, biomethane, hydrogen, and electricity production demonstrate this segment's ability to expand renewable energy generation and reduce greenhouse-gas emissions associated with anaerobic decomposition in landfills. The share of Bahia's natural-gas demand that could be supplied by OFMSW-derived biomethane would rise from 1.38% to 3.51%, indicating a complementary, though not dominant, contribution to the energy mix.

On the other hand, energy recovery via thermal technologies, targeted at residual waste not recoverable by biological or recycling pathways, exhibits the opposite pattern in the ideal and real scenarios. In the real scenario, residual waste still constitute a significant share of the waste treated; in the ideal scenario, there is a pronounced reduction of nearly 31.2%, translating into smaller volumes sent to incineration or gasification. This reduction directly affects electricity and hydrogen production. Even so, recovery of dry recyclables increases substantially, reflecting a context in which prior sorting minimizes the flow of residual waste to thermal treatment. Consistent with the lower volume of residual waste treated, the contribution of this pathway to meeting residential electricity demand also declines from 10.38% to 9.74%.

A valorização dos RSU em aterros sanitários, apresenta uma diferença moderada entre os cenários real e ideal. Observa-se que o volume total de resíduos coletados e tratados aumentaria aproximadamente 16% no cenário ideal, evidenciando um ganho expressivo, embora não tão acentuado quanto em outros indicadores. O aspecto mais relevante, neste contexto, é o incremento expressivo na recuperação de resíduos secos, revelando que a maior fragilidade do cenário atual está nas falhas dos sistemas de triagem e reciclagem.

Os ganhos na produção de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio variam entre 16% e 33%, sinalizando uma possibilidade de otimização energética considerável, embora ainda limitada pelo volume total de resíduos processados. A proporção de suprimento da demanda de gás natural do estado da Bahia passaria de 5,93% para 7,91%, um aumento que, embora modesto, contribui para a diversificação da matriz energética regional.

A valorização voltada exclusivamente para a Forsu apresenta ganhos ainda mais significativos no cenário ideal, sobretudo na quantidade de material coletado e tratado, que aumentaria mais de 100% em relação à situação atual. Esse aumento reflete a subutilização do potencial energético e ambiental da fração orgânica, principal componente dos RSU no Brasil. Os incrementos na produção de biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade demonstra a capacidade desse segmento em ampliar a geração de energia renovável e reduzir as emissões de gases de efeito estufa associadas à decomposição anaeróbia em aterros. A participação da Forsu no suprimento da demanda de gás natural da Bahia aumentaria de 1,38% para 3,51%, revelando potencial complementar à matriz energética, embora sem caráter dominante.

Por outro lado, a valorização energética por meio de tecnologias térmicas, direcionada aos rejeitos não aproveitáveis pelas rotas biológicas ou de reciclagem, apresenta uma lógica inversa nos cenários ideal e real. Enquanto, no cenário real, os rejeitos ainda representam uma parcela significativa dos resíduos tratados, no cenário ideal há uma redução expressiva, de quase 31,2%, o que se traduz em menores volumes destinados à incineração ou gaseificação. Essa redução impacta diretamente na produção de eletricidade e hidrogênio. Apesar disso, a recuperação de resíduos secos, mesmo nesse contexto, apresenta um aumento expressivo, refletindo um cenário em que a triagem prévia minimiza o fluxo de rejeitos para o tratamento térmico. A contribuição desse modelo para a demanda de eletricidade residencial também se reduz, passando de 10,38% para 9,74%, em coerência com a diminuição do volume de rejeitos tratados.

O uso de unidades de recuperação térmicas do tipo *Waste-to-Energy* (WtE) no Brasil enfrenta diversos entraves que limitam sua expansão e integração na matriz energética nacional. Entre os principais desafios, destaca-se o elevado custo de implementação e operação, já que essas plantas exigem tecnologias avançadas de controle de emissões e investimentos iniciais superiores aos observados em fontes renováveis consolidadas, como solar e eólica. Soma-se a isso a complexidade do licenciamento ambiental e a ausência de um marco regulatório específico que enquadre a energia proveniente da valorização térmica como fonte renovável, dificultando o acesso a incentivos fiscais e tarifas diferenciadas. Outro fator crítico é a baixa segregação na origem dos RSU no país, que resulta em resíduos com alto teor de umidade e baixo poder calorífico, comprometendo a eficiência do processo de incineração e aumentando custos de pré-tratamento. Além disso, há resistência social significativa, associada à percepção negativa dessas tecnologias e aos temores de emissão de poluentes, mesmo com o emprego de sistemas de controle modernos. A competitividade econômica também é afetada pelo baixo custo de disposição em aterros sanitários e por fim, a escassez de projetos de referência e a dificuldade de certificação para créditos de carbono limitam a confiança de investidores e o acesso a mecanismos de financiamento climático.

A análise conjunta dos três tipos de valorização evidencia trajetórias complementares, mas com ênfases distintas. A valorização total dos RSU se destaca pela possibilidade de ganhos equilibrados em todos os indicadores, especialmente na reciclagem de secos e no aumento proporcional do biogás e biometano. A fração orgânica (Forsu) apresenta o maior potencial de crescimento em volume tratado e contribui significativamente para geração de energia renovável e redução de emissões. Já a valorização térmica dos rejeitos aponta para uma tendência de redução do uso dessas tecnologias no cenário ideal, alinhando-se às diretrizes da economia circular e priorização da hierarquia de gestão de resíduos.

Conforme indicado nos mapas que apresentam os valores totais de eletricidade e hidrogênio obtidos a partir da valorização de resíduos no Estado da Bahia, utilizando tecnologias *Waste-to-Energy*, que englobam a biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (Forsu) e o tratamento térmico dos rejeitos, a *Tabela 3.15* apresenta, de forma detalhada, os resultados do potencial de geração de eletricidade por município, enquanto a *Tabela 3.16* reúne os valores correspondentes ao potencial de produção de hidrogênio.

The use of Waste-to-Energy (WtE) thermal recovery units in Brazil faces several obstacles that limit their expansion and integration into the national energy mix. Among the main challenges is the high implementation and operating costs, as these plants require advanced emission control technologies and higher initial investments than those observed in established renewable sources such as solar and wind. Added to this is the complexity of environmental licensing and the lack of a specific regulatory framework that classifies energy from thermal recovery as a renewable source, hindering access to tax incentives and differentiated tariffs. Another critical factor is the country's poor source segregation of MSW, which results in waste with high moisture content and low heating value, compromising the efficiency of the incineration process and increasing pretreatment costs. Furthermore, there is significant social resistance, associated with the negative perception of these technologies and fears of pollutant emissions, even with the use of modern control systems. Economic competitiveness is also affected by the low cost of landfill disposal; finally, the scarcity of benchmark projects and the difficulty of certifying carbon credits limit investor confidence and access to climate finance mechanisms.

A joint analysis of the three valorization pathways reveals complementary trajectories with distinct emphases. Comprehensive MSW valorization stands out for its potential to deliver balanced gains across all indicators, particularly higher recovery of dry recyclables and proportional increases in biogas and biomethane production. The OFMSW exhibits the greatest potential for growth in treated volume and contributes significantly to renewable energy generation and emissions reduction. By contrast, thermal recovery from residual waste points to a reduced role for these technologies in the ideal scenario, aligning with circular economy principles and the prioritization embedded in the waste-management hierarchy.

As indicated in the maps showing the total electricity and hydrogen potentials from waste valorization in the State of Bahia, using Waste-to-Energy (WtE) technologies that encompass anaerobic digestion of OFMSW and thermal treatment of residual waste, Table 3.15 provides a detailed breakdown of electricity-generation potential by municipality, while Table 3.16 compiles the corresponding hydrogen-production potential.

Tabela 3.15 Comparação dos cenários real e ideal nos dez municípios com maior potencial total de eletricidade disponível por meio das tecnologias *Waste-to-Energy*.
Table 3.15 *Comparison of real and ideal scenarios in the ten municipalities with the highest total available electricity potential through Waste-to-Energy Technologies.*

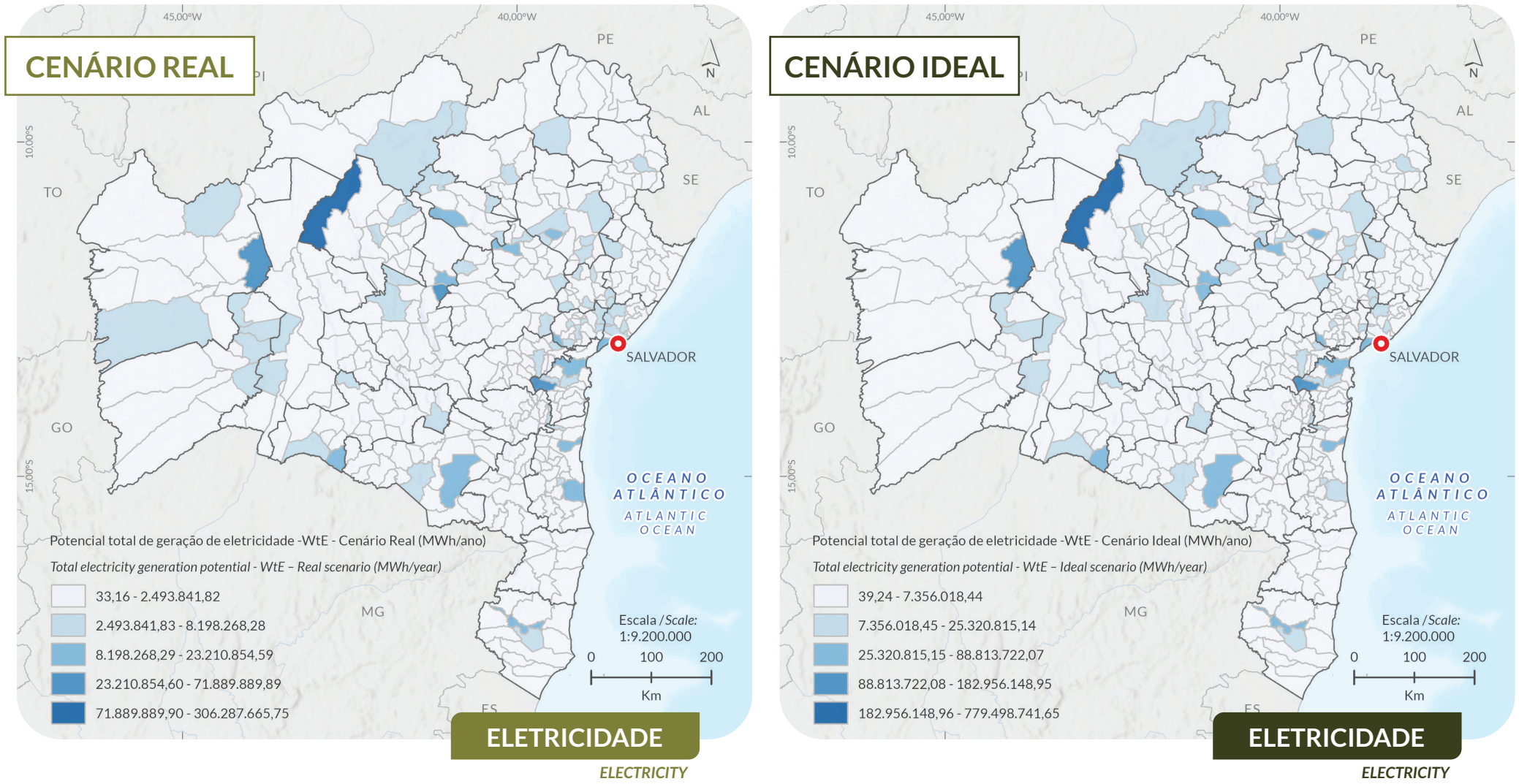
Município *Municipality*	Habitantes *Inhabitants*	Cenário real *Real scenario*		Cenário ideal *Ideal scenario*	
		Total de resíduo tratado *Total waste treated*	Potencial total de geração de eletricidade *Total electricity generation potential*	Total de resíduo tratado *Total waste treated*	Potencial total de geração de eletricidade *Total electricity generation potential*
		(t/ano) / *(t/year)*	(MWh/ano) / *(MWh/year)*	(t/ano) / *(t/year)*	(MWh/ano) / *(MWh/year)*
Salvador	2.568.928	684.607,48	353.806,04	787.091,86	315.155,26
Feira de Santana	657.948	178.533,02	77.321,93	203.697,44	70.537,40
Vitória da Conquista	394.024	104.933,88	45.306,50	119.640,16	41.060,19
Camaçari	319.394	85.032,40	36.711,88	96.948,37	33.267,39
Juazeiro	254.481	68.374,43	29.035,82	77.983,06	26.878,02
Lauro de Freitas	217.960	59.072,81	25.126,15	67.396,20	23.325,22
Itabuna	196.676	51.629,66	21.829,15	58.833,08	20.049,37
Ilhéus	189.028	49.733,79	21.206,82	56.770,07	19.773,69
Porto Seguro	181.007	49.621,97	20.980,29	56.545,28	19.269,73
Barreiras	170.667	46.096,86	19.635,58	52.607,50	18.275,20
Total 10+	**5.150.113**	**1.377.636**	**650.960**	**1.577.513**	**587.591**
Total estadual / *State total*	**14.850.513**	**3.278.137**	**1.597.806**	**3.764.628**	**1.386.559**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 3.7 / *Map 3.7*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS TOTAIS PROVENIENTES DAS TECNOLOGIAS *WASTE-TO-ENERGY*

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF TOTAL ENERGY POTENTIAL FROM WASTE-TO-ENERGY TECHNOLOGIES - REAL AND IDEAL SCENARIOS



The comparison between the real and ideal scenarios shows that expanding waste collection and treatment can yield substantial gains in electricity generation in Bahia. In the real scenario, the ten largest municipalities process 42% of the state's waste yet account for 45% of electricity generation potential, underscoring the role of large cities with more robust infrastructure. In the ideal scenario, these municipalities increase the volume treated by 14.9% but more than double their energy potential, driven by the adoption of advanced Waste-to-Energy technologies such as anaerobic digestion and thermal treatment of residual waste.

The State capital, Salvador, leads the generation potential, more than doubling its output and accounting for roughly one quarter of total energy in the ideal scenario. Mid-sized cities, such as Feira de Santana, Vitória da Conquista, and Camaçari, also register increases exceeding 100%, demonstrating that infrastructure investments directly translate into improved energy performance. Statewide, the transition to the ideal scenario yields a 14.8% increase in processed volume and a greater than 100% increase in electricity generation, underscoring that maximizing utilization of the organic fraction is pivotal to expanding energy recovery.

Regarding the total available hydrogen potential from Waste-to-Energy technologies, OFMSW anaerobic digestion, and thermal treatment of residual waste, Table 3.16 shows the data obtained by municipality.

A comparação entre os cenários real e ideal demonstra que ampliar a coleta e o tratamento de resíduos pode gerar ganhos expressivos na produção de eletricidade na Bahia. No cenário real, os dez maiores municípios tratam 42% do total de resíduos do estado, mas respondem por 45% da geração elétrica, destacando o papel das grandes cidades devido à infraestrutura mais robusta. No cenário ideal, esses municípios aumentam em 14,9% o volume tratado, mas mais que dobram seu potencial energético, resultado da aplicação de tecnologias avançadas como a biodigestão anaeróbia e o tratamento térmico de rejeitos.

Salvador lidera o potencial de geração, com alta maior a 100%, representando cerca de um quarto da energia total no cenário ideal. Cidades intermediárias, como Feira de Santana, Vitória da Conquista e Camaçari, também têm crescimento acima de 100%, mostrando que investimentos em infraestrutura impactam diretamente o desempenho energético. No Estado, a transição para o cenário ideal implica aumento de 14,8% no volume processado e de mais do 100% na geração de energia elétrica, evidenciando que o aproveitamento máximo da fração orgânica é determinante para expandir a recuperação energética.

Em relação ao potencial total disponível de hidrogênio a partir das tecnologias *Waste-to-Energy*, biodigestão anaeróbia da Forsu e o tratamento térmico dos rejeitos, a *Tabela 3.16* exibe os dados obtidos por município.

A análise comparativa entre os cenários real e ideal revela diferenças significativas na produção total de hidrogênio obtida pela soma das rotas de reforma a vapor do biometano e da gaseificação. Nos dez maiores municípios, observa-se que, embora o volume total de resíduos tratados aumente 14% (de 736.580 para 840.108 t/ano) no cenário ideal, a produção total de hidrogênio apresenta redução de 19,5% (de 337,28 milhões para 271,38 milhões de Nm^3/ano). Essa queda indica uma reconfiguração na destinação dos resíduos para as rotas tecnológicas, possivelmente com maior ênfase na recuperação de materiais e no aproveitamento energético direto, em detrimento da conversão para hidrogênio.

Em escala estadual, o cenário ideal contrasta fortemente com o comportamento observado nos dez maiores municípios. Enquanto nesses municípios há redução, no total do Estado a produção de hidrogênio diminui 20% (de 1,36 bilhão para 1,08 bilhão de Nm^3/ano). Esse resultado sugere que o crescimento da produção estadual está sendo impulsionado principalmente por municípios de menor porte, que, no cenário ideal, passam a ter maior participação no tratamento de resíduos e na adoção das rotas de produção de hidrogênio via reforma a vapor do biometano e gaseificação. Essa redistribuição da produção evidencia que o cenário ideal não apenas amplia a cobertura tecnológica, mas também promove descentralização da geração de hidrogênio, potencializando a utilização de recursos disponíveis em regiões pouco exploradas.

Figura 3.16 Classificação e processamento de diversos tipos de resíduo misto.
Figure 3.16 *Sorting and processing diverse types of mixed waste.*



Foto / *Photo:* Albert Kazakh / stock.adobe.com

A comparative analysis of the real and ideal scenarios reveals significant differences in total hydrogen output from the combined routes of steam reforming of biomethane and gasification. Across the ten largest municipalities, although the total volume of waste treated increases by 14% (from 736,580 to 840,108 t/year) in the ideal scenario, total hydrogen production decreases by 19.5% (from 337.28 million to 271.38 million Nm³/year). This decline indicates a reconfiguration of waste allocation among technological pathways, likely with greater emphasis on materials recovery and direct energy recovery, to the detriment of conversion to hydrogen.

At the state level, the ideal scenario contrasts sharply with the pattern observed in the ten largest municipalities. While those municipalities experience a decline, statewide hydrogen production decreases by 20% (from 1.36 to 1.08 billion Nm³/year). This outcome suggests that growth is driven primarily by smaller municipalities which, in the ideal scenario, assume a larger role in waste treatment and in adopting hydrogen production routes via steam reforming of biomethane and gasification. This redistribution indicates that the ideal scenario not only broadens technological coverage but also promotes the decentralization of hydrogen generation, leveraging underutilized resources in less-explored regions.

Tabela 3.16 Comparação dos cenários real e ideal nos dez municípios com maior potencial total de hidrogênio disponível por meio das tecnologias *Waste-to-Energy*.
Table 3.16 *Comparison of real and ideal scenarios in the ten municipalities with the highest total available hydrogen potential through Waste-to-Energy Technologies.*

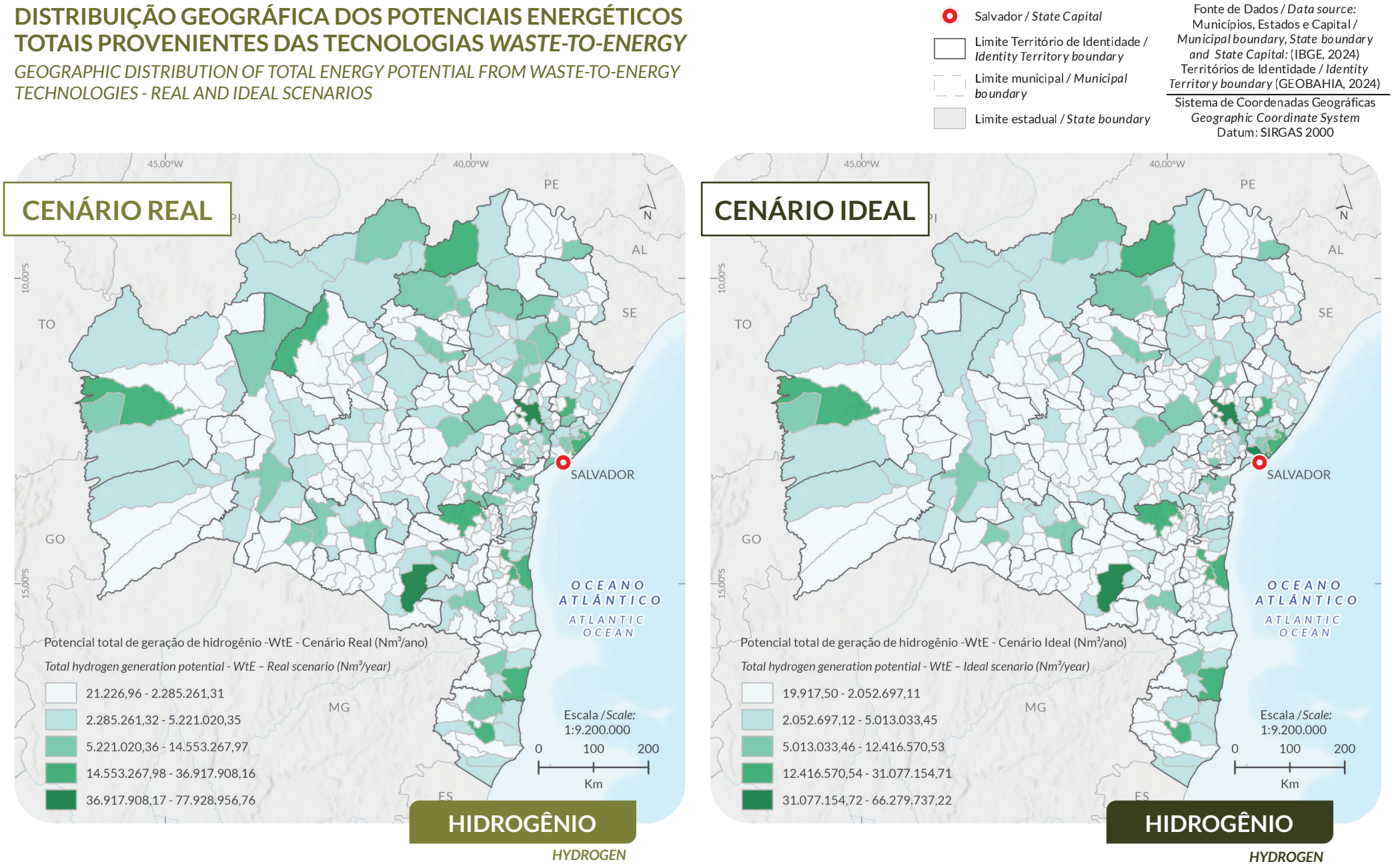
Município *Municipality*	Habitantes *Inhabitants*	Cenário real *Real scenario*		Cenário ideal *Ideal scenario*	
		Total de resíduo tratado *Total waste treated*	Produção de hidrogênio total *Total hydrogen production*	Total de resíduo tratado *Total waste treated*	Produção de hidrogênio total *Total hydrogen production*
		(t/ano) / *(t/year)*	(Nm³/ano) / *(Nm³/year)*	(t/ano) / *(t/year)*	(Nm³/ano) / *(Nm³/year)*
Feira de Santana	657.948	178.533,02	81.932.036,37	203.697,44	66.279.737,22
Vitória da Conquista	394.024	104.933,89	47.940.794,04	119.640,16	38.360.647,28
Camaçari	319.394	85.032,40	38.845.536,43	96.948,37	31.077.154,71
Juazeiro	254.481	68.374,43	31.304.638,52	77.983,06	25.180.020,57
Lauro de Freitas	217.960	59.072,81	27.101.959,12	67.396,20	21.909.472,84
Itabuna	196.676	51.629,66	23.505.190,12	58.833,08	18.645.451,19
Porto Seguro	181.007	49.733,79	22.890.784,21	56.770,07	18.649.016,16
Ilhéus	189.028	49.621,97	22.591.160,48	56.545,28	17.920.398,76
Jequié	168.733	46.096,87	21.188.485,32	52.607,50	17.206.819,09
Alagoinhas	160.662	43.550,63	19.981.318,88	49.687,23	16.154.584,44
Total 10+	**3.237.199**	**736.579**	**337.281.903**	**840.108**	**271.383.302**
Total estadual / State total	**14.850.513**	**3.278.138**	**1.359.751.676**	**3.764.628**	**1.088.015.583**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 3.8 / *Map 3.8*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS TOTAIS PROVENIENTES DAS TECNOLOGIAS *WASTE-TO-ENERGY*

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF TOTAL ENERGY POTENTIAL FROM WASTE-TO-ENERGY TECHNOLOGIES - REAL AND IDEAL SCENARIOS



From the perspective of MSW treatment with an energy recovery focus, the comparison between the evaluated methods, sanitary landfills and Waste-to-Energy, technologies (Figure 3.18), reveal significant differences in waste profiles and in the energy valorization of waste and energy carriers.

In the real scenario, sanitary landfills exhibit higher volumes of biogas and biomethane than Waste-to-Energy technologies, as they leverage the biologically mediated decomposition of the organic fraction. By contrast, electricity output, and especially hydrogen, is substantially lower than with WtE, owing to the higher conversion efficiency of WtE in converting biogas from OFMSW and residual waste via processes such as incineration with energy recovery and gasification, which enable the production of high value energy carriers. With respect to the recovery of dry recyclables, similar values are observed for both routes, indicating that the upstream sorting stage is not significantly influenced by the subsequent treatment method.

In the ideal scenario, the expansion of source-separated collection and increased utilization of the organic fraction result in a larger total volume of waste treated and greater recovery of recyclables across both technological routes. In sanitary landfills, this operational optimization favors higher biogas and biomethane production, underscoring the relevance of biologically based pathways for energy recovery. For Waste-to-Energy technologies, although the feedstock available for incineration or gasification is reduced since part of the OFMSW is diverted to anaerobic digestion, electricity and, especially, hydrogen generation remain substantially higher than in landfills, demonstrating the high efficiency and robust energy performance of these processes. The

Do ponto de vista do tratamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) com enfoque na valorização energética, a comparação entre os métodos avaliados, aterros sanitários e tecnologias *Waste-to-Energy* (*Figura 3.18*) evidencia diferenças significativas no perfil e na valorização dos resíduos em energia e vetores energéticos.

No cenário real, observa-se que os aterros sanitários apresentam volumes superiores de biogás e biometano em comparação às tecnologias *Waste-to-Energy* (WtE), resultado do aproveitamento da fração orgânica conduzida em condições controladas por rotas biológicas. Em contrapartida, a produção de eletricidade e, sobretudo, de hidrogênio é expressivamente inferior à obtida pelo WtE, devido à maior eficiência dessas tecnologias na conversão do biogás oriundo da Forsu e dos rejeitos por meio de processos como a incineração com recuperação energética e a gaseificação, que possibilitam a geração de vetores energéticos de elevado valor agregado. Quanto à recuperação de resíduos secos, verificam-se valores semelhantes entre as duas rotas, indicando que a etapa de triagem prévia não sofre influência significativa do método de tratamento subsequente.

No cenário ideal, a ampliação da coleta seletiva e o aumento do aproveitamento da fração orgânica resultam em maior volume total de resíduos tratados e em ampliação da recuperação de materiais recicláveis em ambas as rotas tecnológicas. Nos aterros sanitários, essa otimização operacional favorece o aumento da produção de biogás e biometano, reforçando a relevância das rotas biológicas na valorização energética. No caso das tecnologias *Waste-to-Energy*, ainda que a disponibilidade de matéria-prima para incineração ou gaseificação seja reduzida, com parte da fração orgânica destinada à biodigestão anaeróbia, a geração de eletricidade e hidrogênio permanece substancialmente superior à observada nos aterros sanitários, evidenciando a elevada eficiência e robustez energética desses processos. A comparação entre cenários evidencia que, enquanto o aterro sanitário otimizado no cenário ideal se beneficia da maior disponibilidade de matéria orgânica de alta biodegradabilidade, o WtE mantém vantagens energéticas significativas, mesmo com menor volume de resíduos processados em alguns casos. Em termos estratégicos, a integração das duas rotas em um sistema híbrido poderia maximizar simultaneamente a recuperação de materiais e a produção de energia, alinhando-se aos princípios da economia circular e às metas de descarbonização.

A análise dos cenários de valorização energética dos RSU, especialmente no que tange à produção de hidrogênio e biometano, evidencia alinhamento com as diretrizes contemporâneas de economia circular e transição energética no Brasil. A *Política Nacional de Resíduos Sólidos* (*Lei nº 12.305/2010*) estabelece a hierarquia na gestão de resíduos, priorizando a não geração, a redução, a reutilização e a reciclagem, e apenas em etapas posteriores o aproveitamento energético e a disposição final ambientalmente adequada. Os dados obtidos para os cenários ideais demonstram um avanço nessa direção, com expressivo aumento da recuperação de resíduos secos e da fração orgânica, reduzindo significativamente os volumes destinados às tecnologias térmicas (apenas para o tratamento



Foto / *Photo:* Felix Mizioznikov / stock.adobe.com

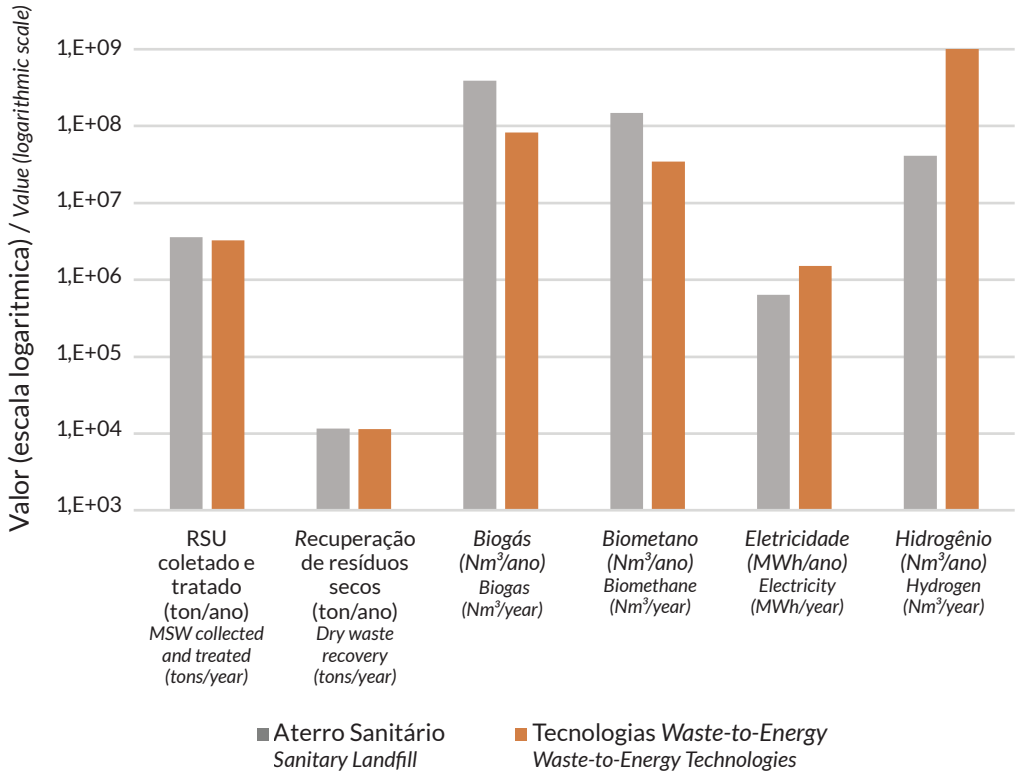
Figura 3.17 Aterro sanitário.
Figure 3.17 *Sanitary landfill.*

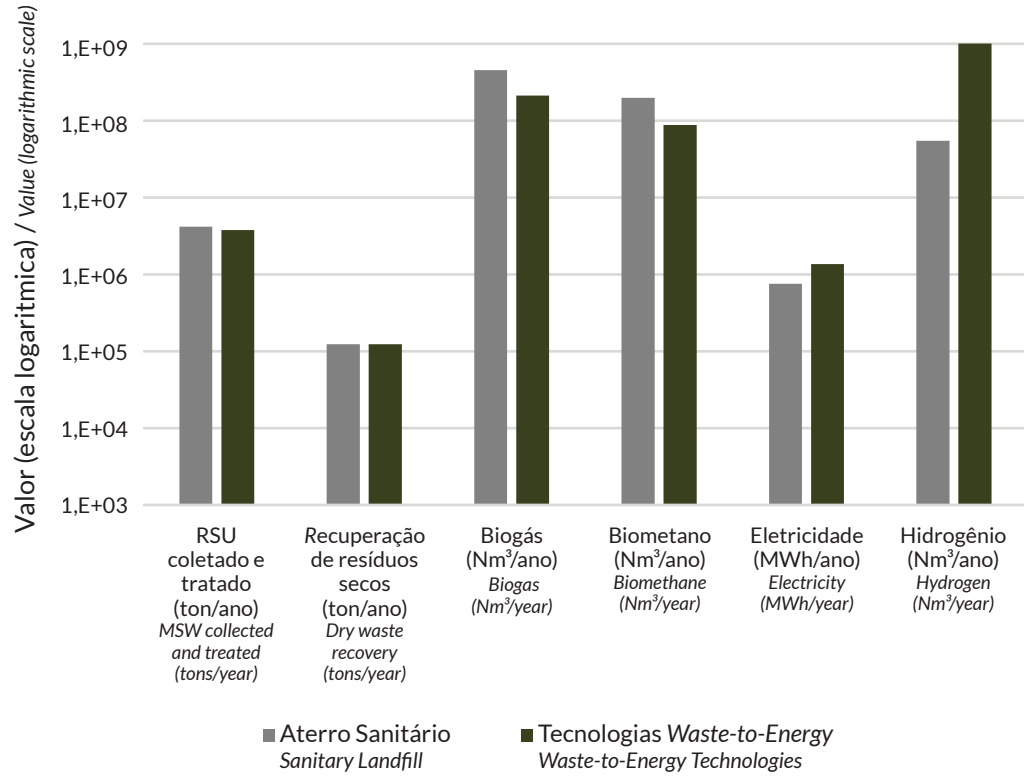
de rejeitos). Além disso, a recente *Política Nacional do Hidrogênio (PNH2)*, instituída pela *Resolução CNPE nº 6/2022* [23], e o marco regulatório do biometano reforçam incentivos à produção e ao uso desses vetores energéticos renováveis. O incremento observado na geração de hidrogênio e biometano a partir dos resíduos orgânicos e rejeitos evidencia o potencial do setor de resíduos em contribuir para a descarbonização da matriz energética, atendendo às metas de redução de emissões do *Acordo de Paris* e às estratégias do *Plano Nacional de Energia 2050* [24]. Dessa forma, os resultados projetados dialogam diretamente com os instrumentos de política pública vigentes, consolidando o papel dos resíduos como recurso estratégico na transição para uma economia de baixo carbono.

comparison between scenarios shows that while optimized landfilling in the ideal case benefits from the greater availability of highly biodegradable organic matter, WtE retains significant energy advantages, even with a smaller volume of waste processed in some cases. From a strategic perspective, integrating both routes into a hybrid system could simultaneously maximize material recovery and energy generation, aligning circular economy principles and decarbonization goals.

The analysis of MSW energy valorization scenarios, particularly with respect to hydrogen and biomethane production, shows alignment with contemporary circular economy and energy-transition policies in Brazil. The National Solid Waste Policy (Law Nº. 12305/2010) establishes a waste-management hierarchy that prioritizes prevention, reduction, reuse, and recycling, with energy recovery and environmentally sound final disposal only at later stages. The results for the ideal scenarios demonstrate progress in this direction, with a marked increase in the recovery of dry recyclables and the organic fraction, significantly reducing the volumes routed to thermal technologies (reserved solely for the treatment of residual waste). In addition, the National Hydrogen Policy (PNH2), established in accordance with Resolution Nº. 6/2022 of the National Energy Policy Council (CNPE) [23], and the biomethane regulatory framework strengthen incentives for the production and use of these renewable energy carriers. The observed increase in hydrogen and biomethane generation from organic waste and residual waste underscores the waste sector's potential to contribute to decarbonizing the national energy mix, consistent with the emissions-reduction targets of the Paris Agreement and the strategies set out in the National Energy Plan 2050 [24]. Accordingly, the projected results are directly aligned with current public policy instruments, consolidating the role of waste as a strategic resource in the transition to a low carbon economy.

Figura 3.18 Comparação dos cenários real e ideal quanto aos potenciais totais de aproveitamento obtidos pelos métodos de tratamento analisados.
Figura 3.18 *Comparison of real and ideal scenarios with respect to the total energy recovery potentials achieved by the analyzed treatment methods.*





Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

3.7 FINAL CONSIDERATIONS

The analysis of energy potential from MSW valorization in Bahia underscores the strategic relevance of energy recovery as an essential pillar of integrated waste management. Multiple technological pathways were evaluated: incineration with energy recovery; gasification of refuse-derived fuel (RDF) produced from municipal solid waste; and anaerobic digestion applied both to the organic fraction of MSW (OFMSW) and to sanitary landfills. Together, these pathways provide a comprehensive view of how waste can be converted into biogas, electricity, biomethane, and hydrogen.

In the real scenario, the results show that incineration with energy recovery, despite delivering significant electricity output, remains constrained by operational limitations and by the volume of waste actually collected and treated. In the ideal scenario, higher collection efficiency and improved source separation of recyclables reduce the MSW directed to energy conversion, while sustaining a high level of electricity production and creating room for integration with complementary technologies.

Anaerobic digestion proved to be a versatile pathway, applied in two distinct contexts: sanitary landfills, where the decomposition of organic matter generates biogas that is captured for electricity production or upgraded to biomethane; and dedicated treatment of the OFMSW, which offers greater operational control and the potential to maximize biogas yields. Biogas from both fronts is utilized as a fuel for electricity generation and can also be upgraded to biomethane. In turn, biomethane can substitute for or complement natural gas in industrial and vehicular applications and serves as a feedstock for renewable hydrogen production. This biochemical route complements the thermochemical pathway to hydrogen via gasification of refuse-derived fuel (RDF), which converts non-recyclable waste into synthesis gas from which hydrogen is extracted.

Comparing the real and ideal scenarios for each pathway, the ideal case shows that optimized source separation and improved operational efficiency yield higher feedstock purity, reduced contaminants, and increased energy conversion efficiency. For anaerobic digestion, the ideal scenario enables greater capture and utilization of biogas; for gasification, the quality of refuse-derived fuel (RDF) improves, enhancing hydrogen production. These gains directly increase the contribution of these technologies to meeting statewide energy demand, with positive impacts on greenhouse-gas emissions reduction. Among the advantages of MSW energy recovery are:

The advantages of energy recovery from MSW include:
- *Reduced landfill disposal volumes, extending landfill service life;*
- *Generation of electricity and renewable fuels, diversifying the energy mix;*
- *Production of hydrogen from MSW streams, strengthening the energy transition;*
- *Abatement of fugitive methane emissions from organic waste, mitigating climate impacts.*
- *Stimulation of local value chains and technological innovation.*

However, there are barriers to be overcome:
- *High upfront capital requirements and the need for bankable financing structures;*
- *Need for adequate infrastructure for source-separated collection, sorting, and pretreatment;*
- *Logistical and regulatory hurdles for biomethane commercialization and grid/pipeline injection;*
- *Technological complexity and upgrading costs in hydrogen production (e.g., gas clean-up, purification, compression);*
- *Social and institutional resistance to certain thermal technologies.*

In summary, MSW energy recovery in Bahia is not only technically feasible but also strategic for environmental sustainability and regional energy security. Integrating thermochemical and biochemical pathways, underpinned by consistent public policies and economic incentives, can convert environmental liabilities into energy assets, advancing a robust circular economy aligned with decarbonization goals.

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos potenciais energéticos provenientes da valorização dos RSU na Bahia evidencia a relevância estratégica do aproveitamento energético como componente essencial da gestão integrada de resíduos. Foram avaliados diferentes processos tecnológicos: incineração com recuperação de energia, gaseificação do combustível derivado de resíduos urbanos (CDRU) e digestão anaeróbia aplicada tanto à fração orgânica dos RSU (Forsu) quanto aos aterros sanitários, permitindo uma visão abrangente de como os resíduos podem ser transformados em biogás, eletricidade, biometano e hidrogênio.

No cenário real, os resultados demonstram que a recuperação energética por incineração, embora apresente geração significativa de eletricidade, ainda se encontra limitada por fatores operacionais e pelo volume efetivamente coletado e tratado. Já no cenário ideal, a ampliação da eficiência de coleta e o incremento na segregação de recicláveis permitem reduzir o volume de RSU destinados à conversão energética, mantendo, contudo, um patamar elevado de produção de eletricidade e abrindo espaço para integração com outras tecnologias.

A digestão anaeróbia mostrou-se uma rota versátil, aplicada em dois contextos distintos: aterros sanitários, onde a decomposição da matéria orgânica gera biogás captado para a produção de eletricidade ou purificação em biometano; tratamento dedicado da Forsu, que apresenta maior controle operacional e potencial de maximização da produção de biogás. O biogás produzido em ambas as frentes é aproveitado como combustível na geração elétrica e também pode ser submetido a *upgrading* para obtenção de biometano. Este, por sua vez, não apenas substitui ou complementa a distribuição de gás natural em aplicações industriais e veiculares, como também constitui matéria-prima para a produção de hidrogênio renovável. Essa rota bioquímica complementa a via termoquímica de produção de hidrogênio, viabilizada pela gaseificação de CDRU, que converte resíduos não recicláveis em gás de síntese, do qual o hidrogênio é extraído.

Comparando os cenários real e ideal para cada rota, observa-se que, no ideal, a otimização da segregação de resíduos e o aumento da eficiência operacional resultam em maior pureza das correntes de alimentação, redução de contaminantes e aumento do rendimento energético. No caso da digestão anaeróbia, o cenário ideal permite maior captação e aproveitamento do biogás, enquanto, na gaseificação, a qualidade do CDRU melhora, potencializando a produção de hidrogênio. Tais ganhos refletem diretamente na participação dessas tecnologias no atendimento à demanda energética estadual, com impactos positivos na redução das emissões de gases de efeito estufa.

Entre as vantagens da valorização energética dos RSU, destacam-se:
- Redução do volume de resíduos destinados a aterros, prolongando sua vida útil;
- Geração de energia elétrica e combustíveis renováveis, contribuindo para a diversificação da matriz energética;
- Produção de hidrogênio a partir de fontes residuais, fortalecendo a transição energética;
- Redução das emissões de metano não controlado, mitigando impactos climáticos;
- Estímulo a cadeias produtivas locais e à inovação tecnológica.

Entretanto, existem barreiras a serem superadas:
- Necessidade de altos investimentos iniciais e modelos de financiamento viáveis;
- Exigência de infraestrutura adequada para coleta seletiva, segregação e pré-tratamento;
- Desafios logísticos e regulatórios para comercialização e injeção de biometano na rede;
- Complexidade tecnológica e custos de purificação na produção de hidrogênio;
- Resistência social e institucional em relação a determinadas tecnologias térmicas.

Em síntese, os resultados obtidos demonstram que a valorização energética dos RSU na Bahia é não apenas tecnicamente viável, mas também estratégica para a sustentabilidade ambiental e a segurança energética regional. A combinação de tecnologias térmicas e bioquímicas, aliada a políticas públicas consistentes e incentivos econômicos, pode transformar passivos ambientais em ativos energéticos, promovendo uma economia circular robusta e alinhada às metas de descarbonização.

Figura 3.19 Planta de incineração de resíduos sólidos urbanos com sistemas de controle de poluição.
Figure 3.19 *Municipal solid waste incineration plant with pollution control systems.*



Foto / *Photo*: songwut / stock.adobe.com

Figura 3.20 Infográfico das principais rotas de tratamento e dos resultados obtidos para os resíduos sólidos urbanos no Estado da Bahia.
Figure 3.20 *Infographic of the main treatment routes and the results obtained for municipal solid waste in the State of Bahia.*

Tecnologias avaliadas / *Technologies evaluated*

Incineração com recuperação de energia
Incineration with energy recovery

Gaseificação do CDRU
RDF gasification

Digestão anaeróbia (Forsu e aterros sanitários)
Anaerobic digestion (Forsu and sanitary landfills)

Produtos energéticos gerados / *Energy products generated*

Biogás
Biogas

Eletricidade
Electricity

Biometano
Biomethane

Hidrogênio
Hydrogen

Cenário real / *Real scenario*

- Incineração gera eletricidade significativa / *Incineration generates significant electricity*
- Limitada por operação e volume tratado / *Limited by operation and volume treated*

Cenário ideal / *Ideal scenario*

- Maior eficiência de coleta e segregação / *Greater collection and segregation efficiency*
- Redução do volume para conversão energética / *Volume reduction for energy conversion*
- Integração tecnológica ampliada / *Expanded technological integration*

Digestão anaeróbia / *Anaerobic digestion*

- Em aterros sanitários: biogás para eletricidade e biometano / *In sanitary landfills: biogas for electricity and biomethane*
- Em Forsu: maior controle e produção de biogás / *In Forsu: greater control and biogas production*

Biogás e biometano / *Biogas and biomethane*

- Biogás gera eletricidade e pode ser purificado em biometano / *Biogas generates electricity and can be purified into biomethane*
- Biometano substitui ou complementa o gás natural e gera hidrogênio renovável / *Biomethane replaces or complements natural gas and generates renewable hydrogen*

Gaseificação do CDRU / *RDF Gasification*

- Produz gás de síntese para a recuperação de hidrogênio / *Produces synthesis gas for hydrogen recovery*
- Complementa a via bioquímica / *Complements the biochemical pathway*

Comparação Cenário Ideal vs Real / *Ideal vs. Real Scenario Comparison*

- Maior pureza e rendimento energético / *Greater purity and energy yield*
- Melhor captação e aproveitamento do biogás / *Better capture and use of biogas*
- CDRU de melhor qualidade para gaseificação / *Better-quality RDF for gasification*

Vantagens da valorização energética / *Advantages of energy recovery*

- Redução de resíduos dispostos em aterros e em locais inadequados / *Reduction of waste disposed of in landfills and inappropriate locations*
- Geração de energia e combustíveis renováveis / *Generation of renewable energy and fuels*
- *Produção de hidrogênio / Hydrogen production*
- Redução de emissões de metano / *Reduction of methane emissions*
- Estímulo à economia local e inovação / *Stimulates the local economy and innovation*

Barreiras e desafios / *Barriers and challenges*

- Altos investimentos e financiamento / *High investment and financing*
- Infraestrutura para coleta e pré-tratamento / *Infrastructure for collection and pretreatment*
- Logística e regulamentação para biometano / *Logistics and regulation for biomethane*
- Complexidade e custos da purificação de hidrogênio / *Complexity and costs of hydrogen purification*
- Resistência social e institucional a tecnologias térmicas / *Social and institutional resistance to thermal technologies*

Conclusão / *Conclusion*

- Técnica e estrategicamente viável / *Technically and strategically feasible*
- Estratégia para sustentabilidade e segurança energética regional / *Strategy for regional energy sustainability and security*
- Combinação de tecnologias e políticas públicas essenciais / *Combination of technologies and essential public policies*
- Potencial para economia circular e descarbonização / *Potential for circular economy and decarbonization*

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados dos potenciais obtidos no estudo. / *Source: Prepared by the authors based on the potential results obtained in the study.*

Atlas Bioenergia Bahia

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO ESGOTO SANITÁRIO NA BAHIA

ENERGY RECOVERY FROM SANITARY SEWAGE IN BAHIA

Este capítulo apresenta um resumo do panorama do esgoto sanitário no Brasil, bem como na Bahia. Traz também a metodologia utilizada para estimar o potencial energético do esgoto sanitário no Estado, considerando sua conversão em biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade. São apresentados os resultados para cada vetor energético, acompanhados da respectiva análise dos resultados e discussão sobre as possibilidades e desafios associados ao aproveitamento energético desse resíduo.

4.1. O ESGOTO SANITÁRIO COMO VETOR ENERGÉTICO NA TRANSIÇÃO SUSTENTÁVEL

O esgoto sanitário, composto predominantemente por águas residuárias domésticas, é historicamente tratado como um passivo ambiental. No entanto, com os avanços tecnológicos e o fortalecimento da agenda de sustentabilidade, ele vem sendo cada vez mais reconhecido como uma fonte estratégica de bioenergia. Os efluentes sanitários podem ser convertidos em biogás por meio de processos de digestão anaeróbia, permitindo a produção de eletricidade e biocombustíveis como o biometano e o hidrogênio, conforme demonstrado na *Figura 4.1*.

A valorização energética do esgoto sanitário contribui duplamente para o desenvolvimento sustentável: promove a universalização do saneamento com menor impacto ambiental e insere uma fonte renovável e distribuída na matriz energética. Além disso, o aproveitamento do biogás gerado em estações de tratamento de esgoto (ETEs) reduz as emissões de gases de efeito estufa, especialmente o metano, um poluente climático de alto potencial.

Neste atlas, o esgoto sanitário é abordado como um recurso energético relevante no contexto da bioeconomia e da descarbonização dos sistemas urbanos. São apresentados dados regionais sobre coleta e tratamento de esgoto, estimativas de produção de biogás e biometano, e o potencial de geração de eletricidade e hidrogênio renovável.

4.2 CENÁRIO BRASILEIRO DO ESGOTAMENTO SANITÁRIO: DESAFIOS ESTRUTURAIS E OPORTUNIDADES ENERGÉTICAS

De acordo com a *NBR 9648/1986* [1], o esgoto sanitário é constituído por efluentes domésticos, industriais e águas de infiltração. Em outras palavras, trata-se do conjunto formado pelas águas provenientes do uso pessoal e das atividades domésticas, pelos resíduos líquidos gerados em processos industriais e por parte da água de precipitação que se infiltra e é coletada pela rede de esgotamento sanitário.

As características do esgoto variam conforme as condições geográficas e socioeconômicas da região. Fatores como o tipo de atividade predominante, o grau de urbanização, a densidade populacional e até as condições climáticas influenciam diretamente tanto a composição do efluente quanto o volume de esgoto produzido.

O Ministério das Cidades (MCID) é o órgão responsável pela fiscalização do saneamento básico no Brasil, utilizando como principal fonte de informações o *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)* [2]. Os dados mais recentes, referentes ao ano de 2022, foram analisados em conjunto com as informações do *Censo Demográfico de 2022* [3]. Do total de 203,1 milhões de habitantes, apenas 112,8 milhões (56%) possuem acesso à rede de esgotamento sanitário, evidenciando grandes desigualdades regionais. A Região Sudeste apresenta o melhor índice de cobertura, atendendo 80,9% da população, enquanto a Região Norte possui o pior cenário, com

This chapter presents an overview of sanitary sewage in Brazil and in the State of Bahia. It also details the methodology used to estimate the energy potential from sanitary sewage in the State of Bahia, considering its conversion into biogas, biomethane, hydrogen, and electricity. The results for each energy carrier are presented, accompanied by the corresponding analysis and a discussion of the opportunities and challenges associated with energy recovery from this waste.

4.1 SANITARY SEWAGE AS AN ENERGY SOURCE IN THE SUSTAINABLE TRANSITION

Sanitary sewage, composed predominantly of domestic wastewater, has historically been treated as an environmental liability. However, with technological advances and the strengthening of the sustainability agenda, sewage has been increasingly recognized as a strategic source of bioenergy. Sanitary effluents can be converted into biogas through anaerobic digestion processes, enabling the production of electricity and biofuels such as biomethane and hydrogen, as shown in Figure 4.1.

Energy recovery from sanitary sewage contributes in two ways to sustainable development: it promotes universal access to sanitation with a lower environmental impact and introduces a renewable, distributed source into the energy mix. In addition, the use of biogas generated at Wastewater Treatment Plants (WWTPs) reduces greenhouse gas emissions, especially methane, a climate pollutant with high global warming potential.

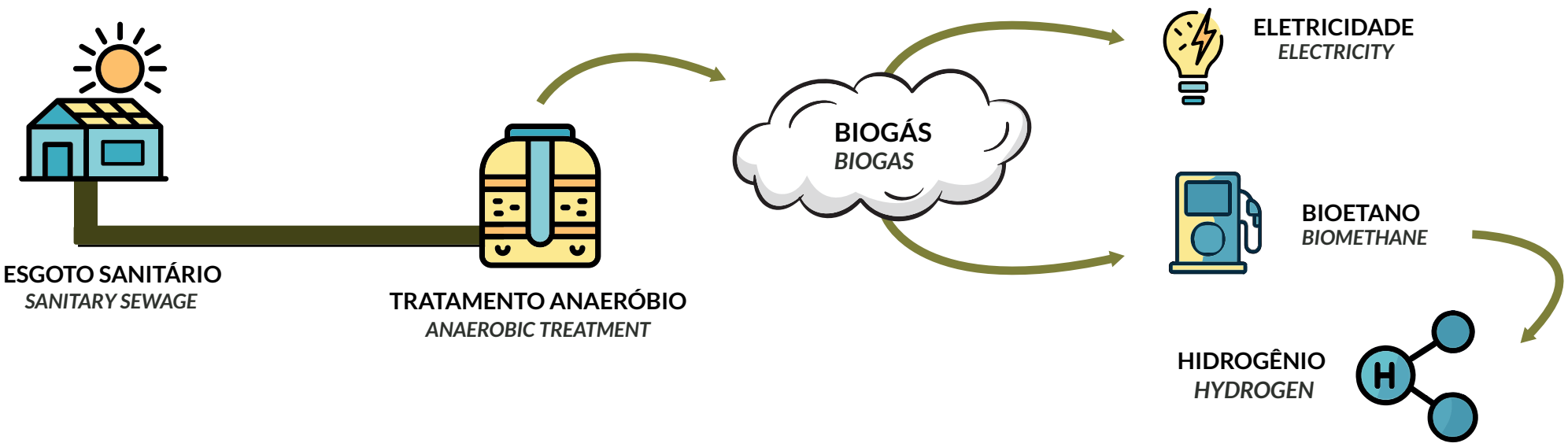
In this atlas, sanitary sewage is addressed as a relevant energy resource in the context of the bioeconomy and the decarbonization of urban systems. Regional data on sewage collection and treatment are presented, along with estimates of biogas and biomethane production and the potential for generating electricity and renewable hydrogen.

4.2 BRAZIL'S SANITARY SEWAGE SCENARIO: STRUCTURAL CHALLENGES AND ENERGY OPPORTUNITIES

According to NBR 9648/1986 [1], sanitary sewage consists of domestic and industrial effluents, as well as infiltration water. In other words, it comprises the waters from personal and household uses, the liquid wastes generated by industrial processes, and a portion of stormwater that infiltrates and is collected by the sanitary sewer system.

The characteristics of sewage vary according to the region's geographic and socioeconomic conditions. Factors such as the predominant type of activity, degree of urbanization, population density, and even climatic conditions directly influence both the composition of the effluent and the volume of sewage produced.

Figura 4.1 Tratamento anaeróbio do esgoto sanitário com produção de eletricidade e biocombustíveis.
Figure 4.1 *Anaerobic treatment of sanitary sewage with generation of electricity and biofuels.*



Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO ESGOTO SANITÁRIO NA BAHIA

The Ministry of Cities (MCID) is the agency responsible for overseeing basic sanitation in Brazil, using the National Sanitation Information System (SINISA) as its main source of information [2]. The most recent data, for 2022, were analyzed in conjunction with information from the 2022 Demographic Census [3]. Of the total population of 203.1 million inhabitants, only 112.8 million (56%) have access to the sanitary sewage system, highlighting significant regional inequalities. The Southeast region shows the highest coverage, serving 80.9% of the population, while the North region has the lowest, at just 14.7%. In the Northeast, the situation is also concerning, with coverage limited to 31.4%, as illustrated in Figure 4.2 [4]. Furthermore, only 52.2% of the sewage collected in the country receives adequate treatment, underscoring the sector's challenges [4].

In the context of energy recovery, it is important to consider the energy consumption associated with the sanitary sewage system. According to the most recent data, the sector's annual consumption is estimated at 1.62 TWh, with the Southeast region accounting for approximately 65% of that total, as shown in Figure 4.3. The Northeast region, in turn, represents for about 12% of national consumption, equivalent to 0.2 TWh per year [4].

In Brazil, the delays and difficulties in expanding the coverage of sanitary sewerage services can be attributed to several factors, with the absence, for many years, of a specific legal framework being one of the main obstacles. This scenario began to change only in 2007, with the enactment of Law no. 11,445/2007 [5], which established clear guidelines for basic sanitation, regulated the provision of services, and opened the way for the pursuit of universalization of the sector. Prior to this law, the topic was addressed only indirectly in legislation such as Law no. 8,080/1990 [6], which created the Unified Health System (SUS) and dealt with in the context of sanitary surveillance; Law no. 9,433/1997 [7], which instituted the National Water Resources Policy and established guidelines for the rational use of water; and Law no. 6,938/1981 [8], which established the National Environmental Policy and set forth guidance for environmental preservation and effluent management.

In 2020, the new Basic Sanitation Legal Framework was enacted through Law no. 14,026/2020 [9], assigning the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA) the responsibility of establishing reference standards for the sector, promoting greater regulatory uniformity nationwide. The legislation introduced significant advances, including a clear definition of service ownership, the creation of mechanisms that enable subsidies for low-income populations, and the establishment of ambitious targets: by 2033, the goal is to ensure 99% coverage with potable water and 90% coverage with sanitary sewerage services, as set forth in Article 11 of the Legal Framework.

The sanitary sewerage overview in Brazil highlights important progress but also reveals significant challenges to achieving universal coverage. Although the country has a robust regulatory framework and ambitious targets established by the new Basic Sanitation Legal Framework, regional inequalities persist, the share of collected sewage that receives treatment remains low, and there is a high demand for infrastructure investments. A combination of historical factors, financial constraints, and the absence of integrated planning has contributed to delays in expanding the system, particularly in the North and Northeast regions. However, strengthening public policies, meeting the legal targets, and adopting innovative solutions can drive improvements in the sector. In this context, sanitary sewerage should be viewed not only as an essential service for public health and environmental quality but also as a strategic opportunity for energy generation and the advancement of sustainability in the country.

apenas 14,7%. No Nordeste, a situação também é preocupante, com cobertura limitada a 31,4%, conforme ilustrado na *Figura 4.2* [4]. Além disso, apenas 52,2% do esgoto coletado no país recebe tratamento adequado, reforçando os desafios do setor [4].

No contexto do aproveitamento energético, é importante considerar o consumo de energia associado ao sistema de esgotamento sanitário. Segundo os dados mais recentes, o consumo anual do setor é estimado em 1,62 TWh, sendo a Região Sudeste responsável por, aproximadamente, 65% desse total, conforme apresentado na *Figura 4.3*. O Nordeste, por sua vez, representa cerca de 12% do consumo nacional, o que corresponde a 0,2 TWh por ano [4].

No Brasil, o atraso e as dificuldades na ampliação da cobertura dos serviços de esgotamento sanitário podem ser atribuídos a diversos fatores, sendo a ausência, por muitos anos, de um arcabouço legal específico um dos principais entraves. Esse cenário começou a mudar apenas em 2007, com a promulgação da *Lei nº 11.445/2007* [5], que estabeleceu diretrizes claras para o saneamento básico, regulamentou a prestação dos serviços e abriu caminho para a busca pela universalização do setor. Antes dessa lei, o tema era abordado apenas de forma indireta em legislações como a *Lei nº 8.080/1990* [6], que instituiu o Sistema Único de Saúde (SUS) e tratava do saneamento no contexto da vigilância sanitária; a *Lei nº 9.433/1997* [7], que criou a P*olítica Nacional de Recursos Hídricos* e estabeleceu diretrizes para o uso racional da água; e a *Lei nº 6.938/1981* [8], que instituiu a *Política Nacional do Meio Ambiente* e definiu orientações para a preservação ambiental e o manejo de efluentes.

Em 2020, foi sancionado o novo *Marco Legal do Saneamento Básico*, por meio da *Lei nº 14.026/2020* [9], que atribuiu à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) a responsabilidade de estabelecer normas de referência para o setor, promovendo maior uniformidade regulatória em todo o País. A legislação trouxe avanços significativos, como a definição clara das titularidades, a criação de mecanismos que viabilizam subsídios para populações de baixa renda e a estipulação de metas desafiadoras: até 2033, o objetivo é garantir 99% de cobertura com água potável e 90% de atendimento com serviços de esgotamento sanitário, conforme disposto no artigo 11 do Marco Legal.

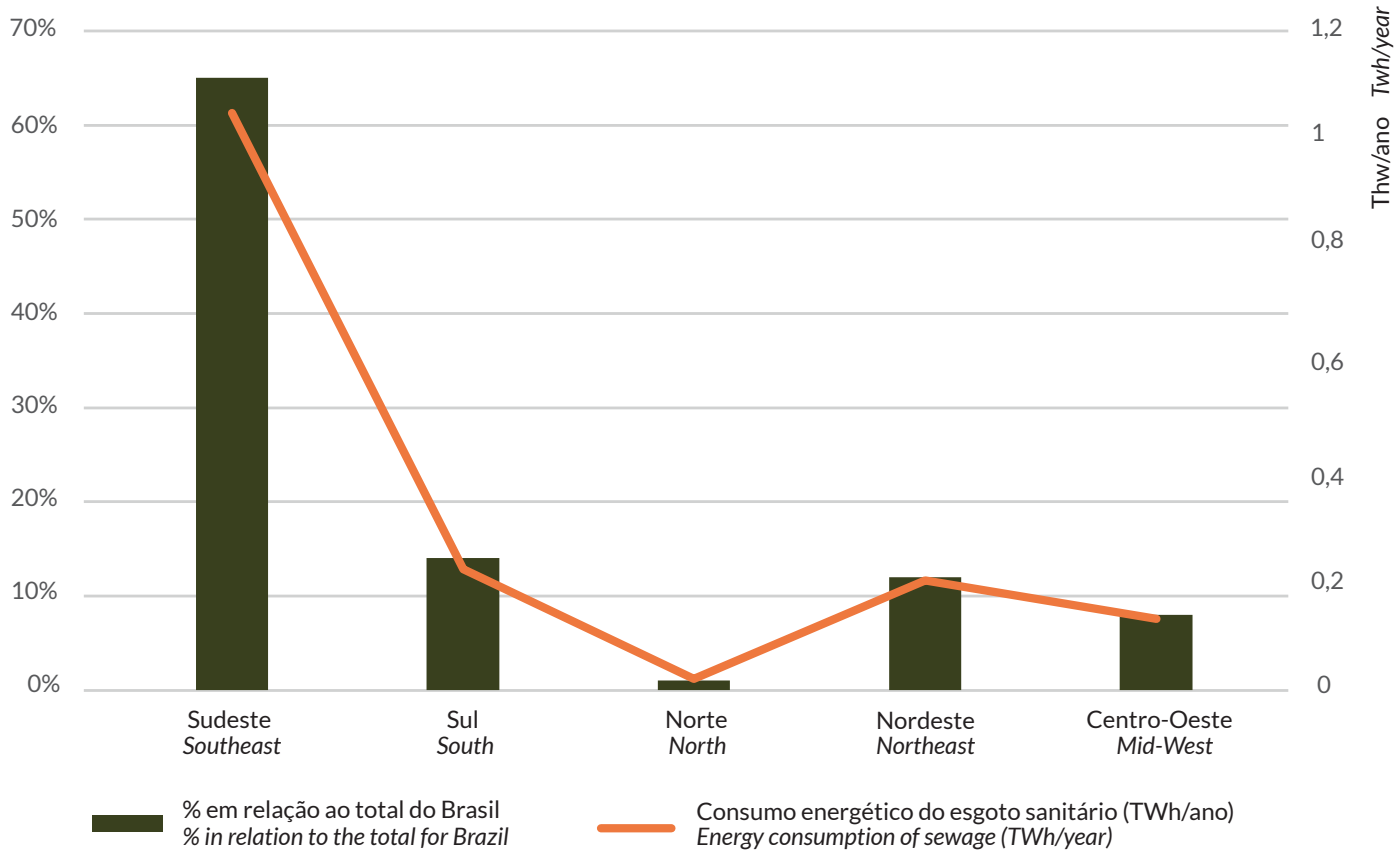
O panorama do esgotamento sanitário no Brasil evidencia avanços importantes, mas também revela desafios significativos para alcançar a universalização do serviço. Embora o país disponha de um marco regulatório robusto e metas ambiciosas estabelecidas pelo novo *Marco Legal do Saneamento Básico*, ainda

Figura 4.2 População total atendida com rede de esgoto no Brasil.
Figure 4.2 *Total population served by the sanitary sewage system in Brazil.*



Fonte: adaptada de [4] . / *Adapted from* [4].

Figura 4.3 Consumo energético associado ao sistema de esgotamento sanitário
Figure 4.3 *Energy consumption associated with the sewage system*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [4]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [4].

persistem desigualdades regionais, baixa taxa de tratamento do esgoto coletado e elevada demanda por investimentos em infraestrutura. A combinação de fatores históricos, limitações financeiras e ausência de planejamento integrado contribuiu para o atraso na expansão do sistema, sobretudo nas regiões Norte e Nordeste. No entanto, o fortalecimento das políticas públicas, aliado ao cumprimento das metas legais e à adoção de soluções inovadoras, pode impulsionar a melhoria do setor. Nesse contexto, o esgotamento sanitário deve ser visto não apenas como um serviço essencial à saúde pública e à qualidade ambiental, mas também como uma oportunidade estratégica para a geração de energia e o avanço da sustentabilidade no País.

4.3. A INFRAESTRUTURA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO NA BAHIA: AVANÇOS, LIMITES E POTENCIAL DE APROVEITAMENTO

O esgotamento sanitário constitui uma dimensão essencial da infraestrutura urbana e rural, com implicações diretas na saúde pública, na qualidade ambiental e, mais recentemente, nas oportunidades de aproveitamento energético dos resíduos gerados. No Brasil, observa-se um avanço gradual, ainda que insuficiente, em termos de expansão da coleta e do tratamento de esgoto nas últimas décadas.

Em 2010, aproximadamente 82,7 milhões de habitantes estavam conectados a redes coletoras de esgoto, representando 46,2% da população total. Em 2022, esse número alcançou 112,8 milhões de pessoas (56,0% da população), evidenciando progresso, mas também revelando que quase metade dos brasileiros ainda permanece excluída desse serviço básico. Quanto ao tratamento, os dados indicam evolução: de 37,8% do esgoto gerado tratado em 2010 para 52,2% em 2022, demonstrando esforços crescentes para reduzir os impactos do lançamento de efluentes sem tratamento [2].

No contexto baiano, os indicadores mais recentes (ano de referência 2023) revelam uma situação desafiadora. Apenas 41,35% da população total possui acesso a rede coletora de esgoto, índice inferior à média nacional. A análise por recorte populacional mostra disparidades marcantes: enquanto 55,30% da população urbana é atendida, no meio rural esse percentual não ultrapassa 3,15%. De modo semelhante, 49,23% dos domicílios urbanos estão conectados, contrastando com apenas 0,99% dos domicílios rurais [10].

Apesar das limitações de cobertura, a Bahia apresenta desempenho positivo no que se refere ao tratamento do esgoto coletado. Do total de esgoto gerado, 50,22% foi tratado em relação à água consumida, e 83,28% em relação ao volume coletado, o que demonstra capacidade instalada e políticas voltadas à mitigação de impactos ambientais. Esse dado é particularmente relevante quando se considera a perspectiva de aproveitamento energético do esgoto por meio da digestão anaeróbia, uma vez que o tratamento adequado é condição necessária para a captura e uso eficiente do biogás [10].

Do ponto de vista econômico, observa-se que a receita operacional direta média proveniente dos serviços de esgoto na Bahia é de R$ 4,87 por m³, enquanto a despesa média, incluindo tributos, é de R$ 4,21 por m³. Esses valores evidenciam relativa sustentabilidade financeira do sistema, embora a ampliação da cobertura seja indispensável para a consolidação do equilíbrio econômico-operacional e para a viabilização de investimentos em tecnologias de reaproveitamento energético [10].

4.3 SANITARY SEWERAGE INFRASTRUCTURE IN BAHIA: PROGRESS, LIMITATIONS, AND UTILIZATION POTENTIAL

Sanitary sewerage is an essential dimension of urban and rural infrastructure, with direct implications for public health, environmental quality, and, more recently, the opportunities for energy recovery from the wastes generated. In Brazil, there has been gradual, albeit insufficient, progress in expanding sewage collection and treatment over recent decades.

In 2010, approximately 82.7 million inhabitants were connected to sanitary sewer networks, representing 46.2% of the total population. By 2022, this figure had reached 112.8 million people (56.0% of the population), showed progress but also revealed that nearly half of Brazilians still remain excluded from this basic service. As for treatment, the data indicate improvement: from 37.8% of generated sewage treated in 2010 to 52.2% in 2022, demonstrating growing efforts to reduce the impacts of discharging untreated effluents [2].

In Bahia, the most recent indicators (reference year 2023) reveal a challenging situation. Only 41.35% of the total population has access to the sanitary sewer network, a rate below the national average. A population-based breakdown shows marked disparities: while 55.30% of the urban population is served, in rural areas this share does not exceed 3.15%. Similarly, 49.23% of urban households are connected, in contrast with only 0.99% of rural households [10].

Despite coverage limitations, Bahia shows positive performance with respect to the treatment of collected sewage. Of the total sewage generated, 50.22% was treated relative to water consumption, and 83.28% relative to the volume collected, which demonstrates installed capacity and policies aimed at mitigating environmental impacts. This is particularly relevant when considering the energy recovery potential of sewage via anaerobic digestion, since proper treatment is a necessary condition for the capture and efficient use of biogas [10].

From an economic standpoint, the average direct operating revenue from sewerage services in Bahia is R$ 4.87 per m³, while the average expense, including taxes, is R$ 4.21 per m³. These figures indicate the system's relative financial sustainability, although expanding coverage is indispensable for consolidating economic-operational balance and enabling investments in energy recovery technologies [10].

The sanitary sewerage overview in Bahia reveals advances in treatment efficiency and limitations in collector network coverage, especially in rural areas. These constraints pose challenges to achieving universal coverage, but they also indicate an underexplored potential for energy recovery, particularly in urban contexts, where population concentration and higher collection rates provide favorable conditions for the production of biogas and biomethane. Incorporating this energy dimension into basic sanitation can strengthen integrated bioenergy public policies, enhancing the sector's sustainability and resilience in the state.

A noteworthy aspect concerns the energy consumption of the sanitary sewerage system. According to the Thematic Diagnosis, Water and Sewage Services [4], the national average consumption is estimated at 0.29 kWh per m³ of treated sewage, while in the Northeast this figure is slightly higher, reaching 0.32 kWh/m³. Based on this parameter and the volume of sewage treated in the State of Bahia [10], the annual consumption is estimated at approximately 0.086 TWh. This underscores the need for investments in energy efficiency and operational optimization to reduce costs while simultaneously enhancing the sustainability of the sanitation system.

Figura 4.4 Vista aérea de uma estação de tratamento de efluente.
Figure 4.4 *Aerial view of a wastewater treatment plant.*



Foto / *Photo:* Vladyslav / stock.adobe.com

4.4 ENERGY RECOVERY FROM SANITARY SEWAGE: PATHWAYS TO INTEGRATE SANITATION, RENEWABLE ENERGY, AND SUSTAINABILITY

The sanitary sewerage overview in Brazil reveals a complex scenario, marked by recent regulatory advances but also by structural deficiencies and large regional disparities. Although the country has taken important steps with the creation of specific legislation, such as Law nº. 11,445/2007 [5] and, more recently, the new Basic Sanitation Legal Framework (Law nº. 14,026/2020) [9], the challenges to universalizing the service remain significant. Currently, just over half of the population has access to the sanitary sewer network, and even fewer receive adequate treatment of effluents. This situation is compounded by regional differences, with the Southeast showing the best coverage and treatment indicators, while the North and Northeast still face significant gaps.

In addition to regional inequalities, the sector faces obstacles related to the lack of sustained investment, the need to modernize existing networks, and the low integration among sanitation, water resources, and environmental policies. The decades-long absence of a robust legal framework hindered strategic planning and resource allocation, resulting in outdated and inefficient systems in many localities. The new legal framework therefore emerges as an opportunity by setting ambitious targets, such as ensuring 99% access to potable water and 90% coverage with sanitary sewerage services by 2033, and by promoting greater legal certainty and attractiveness for private investment.

In this context, sanitary sewerage should not be understood solely as an essential service for public health and social well-being, but also as a strategic pillar for sustainable development. Expanding sewage collection and treatment contributes directly to the preservation of water resources, the mitigation of environmental impacts, and the reduction of greenhouse gas emissions. Additionally, innovative treatment technologies enable the reuse of by-products such as biogas, which can be converted into electricity, heat, biomethane, and even renewable hydrogen, positioning the sector within the circular economy and the energy transition. Against this backdrop, it becomes clear that the energy potential from sanitary sewage is an essential factor in aligning sanitation, renewable energy generation, and sustainability.

Energy recovery from sanitary sewage represents a relevant opportunity for generating renewable energy and advancing sustainability in the sanitation sector. The organic fraction present in sewage has potential for biogas production through anaerobic processes, and this

O panorama do esgotamento sanitário na Bahia revela avanços na eficiência do tratamento e limitações na cobertura da rede coletora, especialmente em áreas rurais. Esses limites impõem desafios para a universalização do serviço, mas também indicam um potencial de aproveitamento energético ainda pouco explorado, sobretudo em contextos urbanos, onde a concentração populacional e a maior taxa de coleta oferecem condições favoráveis à produção de biogás e biometano. A incorporação dessa dimensão energética ao saneamento básico pode fortalecer políticas públicas integradas de bioenergia, ampliando a sustentabilidade e a resiliência do setor no Estado.

Um aspecto de destaque refere-se ao consumo energético do sistema de esgotamento sanitário. Segundo o *Diagnóstico Temático – Serviços de Água e Esgoto* [4], o consumo médio nacional é estimado em 0,29 kWh/m³ de esgoto tratado, enquanto na Região Nordeste esse valor é ligeiramente superior, atingindo 0,32 kWh/m³. Com base nesse parâmetro e no volume de esgoto tratado no Estado da Bahia [10], estima-se um consumo anual de aproximadamente 0,086 TWh. Esse dado evidencia a necessidade de investimentos em eficiência energética e otimização operacional, de modo a reduzir custos e, simultaneamente, ampliar a sustentabilidade do sistema de saneamento.

4.4 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO ESGOTO SANITÁRIO: CAMINHOS PARA INTEGRAR SANEAMENTO, ENERGIA RENOVÁVEL E SUSTENTABILIDADE

O panorama do esgotamento sanitário no Brasil revela um cenário complexo, marcado por avanços regulatórios recentes, mas também por deficiências estruturais e grandes disparidades regionais. Embora o País tenha dado passos importantes com a criação de legislações específicas, como a *Lei nº 11.445/2007* [5] e, mais recentemente, o novo *Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020)* [9], os desafios para a universalização do serviço permanecem expressivos. Atualmente, apenas pouco mais da metade da população tem acesso à rede de esgotamento sanitário, e menos ainda conta com o tratamento adequado dos efluentes. Essa realidade é agravada pelas diferenças regionais, com o Sudeste apresentando os melhores índices de cobertura e tratamento, enquanto o Norte e o Nordeste ainda enfrentam defasagens significativas.

Além das desigualdades regionais, o setor enfrenta entraves relacionados à falta de investimentos contínuos, à necessidade de modernização das redes existentes e à baixa integração entre políticas de saneamento, recursos hídricos e meio ambiente. A ausência, por décadas, de um arcabouço legal robusto dificultou o planejamento estratégico e o direcionamento de recursos, o que resultou em sistemas defasados e ineficientes em diversas localidades. O novo *Marco Legal do Saneamento Básico* surge, portanto, como uma oportunidade ao estabelecer metas ambiciosas, como garantir 99% de acesso à água potável e 90% de cobertura com serviços de esgotamento sanitário até 2033, além de promover maior segurança jurídica e atratividade para investimentos privados.

Nesse contexto, o esgotamento sanitário não deve ser compreendido apenas como um serviço essencial para a saúde pública e o bem-estar social, mas também como um eixo estratégico para o desenvolvimento sustentável. A ampliação da coleta e do tratamento de esgoto contribui diretamente para a preservação dos recursos hídricos, a mitigação de impactos ambientais e a redução das emissões de gases de efeito estufa. Adicionalmente, tecnologias inovadoras de tratamento possibilitam o reaproveitamento de subprodutos, como o biogás, que pode ser convertido em energia elétrica, térmica, biometano e até hidrogênio verde, inserindo o setor no contexto da economia circular e da transição energética. Diante desse cenário, torna-se evidente que o potencial energético

do esgoto sanitário é um fator essencial para aliar saneamento, geração de energia renovável e sustentabilidade.

O aproveitamento energético do esgoto sanitário representa uma oportunidade relevante para a geração de energia renovável e a promoção da sustentabilidade no setor de saneamento. A fração orgânica presente no esgoto possui potencial para a produção de biogás por meio de processos anaeróbios, sendo este constituído majoritariamente por metano (CH_4). Após tratamento adequado, o biogás pode ser utilizado diretamente para geração de calor e eletricidade ou purificado para obtenção de biometano, combustível com características semelhantes ao gás natural, podendo substituí-lo em qualquer tipo de aplicação. Além disso, o biometano pode servir como matéria-prima para a produção de hidrogênio, ampliando as possibilidades de aproveitamento energético.

Diversas tecnologias podem ser aplicadas, com destaque para os biodigestores anaeróbios, amplamente utilizados nas ETEs. Sistemas complementares, como unidades de purificação e upgrading, permitem a remoção de impurezas e a adequação do biogás para uso veicular, injeção em redes de gás ou conversão em hidrogênio. A integração dessas tecnologias possibilita maior eficiência no uso energético dos resíduos, alinhando-se às tendências de transição energética e economia circular.

Os benefícios ambientais são expressivos, uma vez que a captura e utilização do metano evitam sua emissão direta à atmosfera, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, o aproveitamento energético do esgoto reduz a dependência de fontes fósseis, promove o uso eficiente dos recursos e estimula o desenvolvimento de soluções inovadoras no setor de saneamento.

Entretanto, a implementação dessa alternativa enfrenta desafios. Os custos de instalação e operação de sistemas de purificação, a necessidade de infraestrutura para distribuição do biometano ou hidrogênio, bem como questões regulatórias relacionadas à qualidade e segurança, podem limitar a adoção em larga escala. Além disso, em municípios de pequeno porte, a baixa geração de biogás exige soluções coletivas ou regionais para viabilizar economicamente os projetos.

Assim, o aproveitamento energético do esgoto sanitário se mostra tecnicamente viável e ambientalmente vantajoso. Entretanto, superar os obstáculos existentes para sua consolidação exige uma combinação de esforços: investimentos em infraestrutura, fortalecimento institucional, capacitação técnica, políticas públicas consistentes e estímulo à inovação tecnológica. Se bem conduzidas, essas ações podem transformar o cenário atual, garantindo não apenas a universalização do saneamento, mas também a geração de benefícios econômicos, sociais e ambientais duradouros. O Brasil, com seu vasto potencial energético e ambiental, tem condições de se tornar referência mundial na integração entre saneamento, reaproveitamento energético e sustentabilidade.

4.5 POTENCIAIS ENERGÉTICOS ESTIMADOS A PARTIR DE ESGOTO SANITÁRIO

4.5.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Para a estimativa do potencial energético do esgoto sanitário no Estado da Bahia, foi necessário o levantamento de dados de cobertura de esgotamento sanitário, volumes coletados e tratados, bem como parâmetros técnicos relacionados à produção de biogás e seu aproveitamento energético. Foi utilizada a metodologia adotada para a elaboração do *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [11], com adaptações de premissas e a inclusão de considerações específicas.

O cálculo baseou-se em dados primários disponibilizados pelo Senai/Cimatec e pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento (Embasa), combinadas com dados secundários de bases governamentais e de referências bibliográficas, como coeficientes de geração de biogás e fatores de conversão para biometano, eletricidade e hidrogênio. Essa abordagem permitiu quantificar não apenas o potencial de produção de biogás, mas também suas possíveis aplicações energéticas, considerando as especificidades do sistema de esgotamento sanitário baiano.

4.5.2 QUANTIFICAÇÃO DO ESGOTO SANITÁRIO

O cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir do esgoto sanitário na Bahia baseia-se na quantidade de esgoto gerado em cada município, considerando dados populacionais do [12] e a geração média de esgoto per capita fornecida pelo Senai/Cimatec e Embasa. Para municípios ou territórios sem informações específicas, foram utilizadas médias regionais ou estaduais, após análise de consistência dos dados. A estimativa foi realizada para dois cenários: (i) cenário real, que considera apenas o percentual efetivamente coletado e tratado, e (ii) cenário ideal, que assume a coleta e tratamento de 100% do esgoto gerado. O modelo matemático utilizado está descrito no *Apêndice* deste atlas.

Figura 4.5 Tratamento de esgoto sanitário.
Figure 4.5 *Sanitary sewage treatment.*



Foto / *Photo:* tong2530 / stock.adobe.com

gas consists primarily of methane (CH_4). After appropriate treatment, biogas can be used directly for heat and power generation or upgraded to biomethane, a fuel with properties similar to natural gas that can substitute it in any application. In addition, biomethane can serve as a feedstock for hydrogen production, expanding the possibilities for energy recovery.

Multiple technologies can be applied, with emphasis on anaerobic digesters, which are widely used at WWTPs. Complementary systems, such as purification and upgrading units, enable the removal of impurities and the conditioning of biogas for vehicle use, injection into gas grids, or conversion into hydrogen. Integrating these technologies allows for greater efficiency in the energy use of residues, aligning with the trends of the energy transition and the circular economy.

The environmental benefits are significant, since capturing and using methane prevents its direct emission into the atmosphere, contributing to climate change mitigation. In addition, energy recovery from sewage reduces dependence on fossil sources, promotes efficient resource use, and stimulates the development of innovative solutions in the sanitation sector.

However, implementing this alternative faces challenges. The installation and operating costs of purification systems, the need for infrastructure to distribute biomethane or hydrogen, as well as regulatory issues related to quality and safety, can limit large-scale adoption. Moreover, in small municipalities, the low biogas yield requires collective or regional solutions to make projects economically viable.

Thus, energy recovery from sanitary sewage is technically feasible and environmentally advantageous. However, overcoming the existing obstacles to its consolidation requires a combination of efforts: infrastructure investments, institutional strengthening, technical capacity building, consistent public policies, and incentives for technological innovation. If properly implemented, these actions can transform the current landscape, ensuring not only the universalization of sanitation but also the generation of lasting economic, social, and environmental benefits. Brazil, with its vast energy and environmental potential, is well positioned to become a global reference in integrating sanitation, energy recovery, and sustainability.

4.5 ESTIMATED ENERGY POTENTIALS FROM SANITARY SEWAGE

4.5.1 CALCULATION METHODOLOGY

To estimate the energy potential from sanitary sewage in the State of Bahia, we compiled data on sanitary sewerage coverage, volumes collected and treated, and technical parameters related to biogas production and energy recovery. The methodology adopted for the preparation of the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo [11] was applied, with adjusted assumptions and the inclusion of Bahia-specific considerations.

The calculation was based on primary data provided by Senai/Cimatec and the Water and Sanitation Company of Bahia (Embasa), combined with secondary data from government databases and bibliographic sources, such as biogas generation coefficients and conversion factors for biomethane, electricity, and hydrogen. This approach enabled the quantification not only of biogas production potential but also of its energy applications, considering the specific characteristics of Bahia's sewage system.

4.5.2 QUANTIFICATION OF SANITARY SEWAGE

The calculation of the potential for electricity generation from sanitary sewage in Bahia is based on the amount of sewage generated in each municipality, using population data from [12] and the average per capita sewage generation provided by Senai/Cimatec and Embasa. For municipalities or territories without specific information, regional or state averages were applied after data consistency checks. The estimate was performed for two scenarios: (i) an actual scenario, which considers only the share effectively collected and treated, and (ii) an ideal scenario, which assumes 100% collection and treatment of the sewage generated. The mathematical model used is described in the Appendices of this atlas.

4.5.3. METHODOLOGY FOR ESTIMATING BIOGAS POTENTIAL FROM ANAEROBIC DIGESTION

The quantification of methane (CH_4) generated from the anaerobic treatment of sanitary sewage was carried out according to the methodology described in [13], which was also used in the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo [11]. The factors considered in the calculations were obtained from Senai/Cimatec and Embasa; for municipalities or territories without specific information, regional or state averages were applied after data consistency checks. The potential for methane generation considered the production factor provided in [14] and a Chemical Oxygen Demand (COD) removal efficiency. To estimate the total biogas volume, the methane fraction in the biogas composition was assumed. The mathematical model used is described in the Appendices of this atlas.

4.5.4. METHODOLOGY FOR ESTIMATING BIOMETHANE GENERATION POTENTIAL

To estimate the available volume of biomethane, a methane content is assumed for the produced biomethane, in accordance with the existing standards established by ANP Resolution nº. 886/2022, which stipulates biomethane quality for these purposes, namely, a fuel with at least 90% methane purity [15]. This value already accounts for methane losses and residual impurities. The mathematical model used is described in the Appendices of this atlas.

4.5.5. METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE POTENTIAL FOR ELECTRICITY GENERATION FROM BIOGAS

The calculation of the electrical potential of sanitary sewage in each municipality is based on the volume of biogas produced and the use of Otto-cycle motor, a technology widely employed in Brazil, albeit of imported origin [11]. For this calculation, the lower heating value (LHV) of methane, obtained from technical references, is applied together with the typical energy conversion efficiency of these engines, according to data from commercially available equipment. Performance and efficiency information was provided by [13] and corroborated by the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo [11], ensuring methodological consistency of the results. The mathematical model used is described in the Appendices of this atlas.

4.5.6 METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE HYDROGEN GENERATION POTENTIAL THROUGH BIOMETHANE REFORMING

The estimate of hydrogen production from biomethane was refined using calculations based on mass and energy balances, taking into account the typical operating conditions of conventional steam reforming plants. Since biomethane is primarily composed of methane, the same operating conditions used for natural gas steam reforming were adopted. Process conversion efficiency was determined on the basis of producing 1 kg of hydrogen, using the lower heating value (LHV) of hydrogen and biomethane, the density of biomethane, and the process's energy demand. In addition, the Thermal Content of the Hydrogen Product (TP) was calculated from the gas efficiency, the thermal content of hydrogen, and the thermal input to the system. Finally, the potential for hydrogen production via steam reforming of biomethane was obtained by considering mass flow, thermal content, and the LHV of hydrogen, ensuring greater accuracy in the assessment of energy recovery. The mathematical model used is described in the Appendices of this atlas.

4.6 RESULTS AND SPATIAL REPRESENTATION OF THE POTENTIALS

Table 4.1 presents the technical energy potentials from the anaerobic treatment of sanitary sewage in the ten municipalities with the greatest available potential in the State of Bahia. For each municipality, the following indicators are shown for the actual scenario: volume of biogas produced; amount of biomethane generated from biogas upgrading; electricity generation potential via a motor–generator set (genset) operating on biogas; and the estimated hydrogen production from biomethane. Table 4.2 presents the same indicators for the technical energy potentials from the anaerobic treatment of sanitary sewage in the ten municipalities with the greatest available potential in the State of Bahia, considering the ideal scenario.

4.5.3 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A quantificação do metano (CH_4) gerado a partir do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário foi realizada segundo a metodologia da [13], também utilizada no *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [11]. Os fatores considerados nos cálculos foram obtidos do Senai/Cimatec e Embasa, sendo aplicadas médias regionais ou estaduais após análise de consistência dos dados para municípios ou territórios sem informações específicas. O potencial de geração de metano considerou o fator de produção fornecido pela [14] e uma eficiência de remoção da demanda química de oxigênio (DQO). Para estimar o volume total de biogás, foi adotado o percentual de metano na composição do biogás. O modelo matemático utilizado está descrito no *Apêndice* deste atlas.

4.5.4 METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOMETANO

Para a estimativa do volume de biometano disponível, assume-se um teor de metano no biometano produzido, considerando a necessidade de seguir os padrões existentes estabelecidos pela *Resolução ANP 886/2022 que estipula a qualidade do biometano para essas finalidades, ou seja, um combustível com, no mínimo, 90% de pureza* [15]. Esse valor já inclui perdas de metano e impurezas residuais. O modelo matemático utilizado está descrito no *Apêndice deste atlas.*

4.5.5 METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DO BIOGÁS

O cálculo do potencial elétrico do esgoto sanitário em cada município baseia-se no volume de biogás produzido e na aplicação de motores de ciclo Otto, tecnologia amplamente utilizada no Brasil, ainda que de origem importada [11]. Para esse cálculo, utiliza-se o poder calorífico inferior (PCI) do metano, obtido em referências técnicas, aliado à eficiência de conversão energética típica desses motores, conforme dados de equipamentos comerciais disponíveis. As informações sobre desempenho e eficiência foram fornecidas pela [13] e corroboradas pelo *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [11], garantindo a consistência metodológica dos resultados. O modelo matemático utilizado está descrito no *Apêndice* deste atlas.

4.5.6 METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO VIA REFORMA DO BIOMETANO

A estimativa da produção de hidrogênio a partir do biometano foi aprimorada por meio de cálculos baseados em balanços de massa e energia, levando em conta as condições operacionais típicas de plantas industriais de reforma a vapor convencionais. Como o biometano tem o metano como principal componente, foram adotadas as mesmas condições de operação utilizadas para a reforma a vapor do gás natural. A eficiência de conversão dos processos foi determinada considerando a produção de 1 kg de hidrogênio, utilizando o poder calorífico inferior (PCI) do hidrogênio e do biometano, a densidade do biometano e a demanda energética do processo. Além disso, o conteúdo térmico do hidrogênio produzido *(Thermal Content of the Hydrogen Product – TP)* foi calculado a partir da eficiência do gás, do conteúdo térmico do hidrogênio e da entrada térmica no sistema. Por fim, o potencial de produção de hidrogênio via reforma a vapor do biometano foi obtido considerando o fluxo mássico, o conteúdo térmico e o PCI do hidrogênio, garantindo maior precisão na avaliação do aproveitamento energético. O modelo matemático utilizado está descrito no Apêndice deste atlas.

4.6 RESULTADOS E REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS POTENCIAIS

A *Tabela 4.1* apresenta os potenciais técnicos energéticos provenientes do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário nos dez municípios com maior potencial disponível no Estado da Bahia. São exibidos, para cada município, os seguintes indicadores para o cenário real: volume de biogás produzido, quantidade de biometano gerado a partir da purificação do biogás, potencial de geração elétrica por meio de grupo motogerador operando com biogás, e produção estimada de hidrogênio a partir do biometano. A *Tabela 4.2* apresenta os mesmos indicadores para os potenciais técnicos energéticos provenientes do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário nos dez municípios com maior potencial disponível no Estado da Bahia, considerando o cenário ideal.

Figura 4.6 Controle de qualidade do efluente tratado.
Figure 4.6 *Quality control of treated effluent.*



Foto / *Photo:* Avatar_023 / stock.adobe.com

Tabela 4.1 Potenciais técnicos energéticos provenientes do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário nos dez municípios com maior potencial disponível no Estado da Bahia – Cenário real.
Table 4.1 *Technical energy potentials from anaerobic treatment of sanitary sewage in the ten municipalities with the greatest available potential in the State of Bahia - Actual scenario*

CENÁRIO REAL / *ACTUAL SCENARIO*						
Município *Municipality*	**Habitantes** *Inhabitants*	**Esgoto coletado e tratado** *Collected and treated sewage*	**Volume de biogás produzido** *Volume of biogas produced*	**Quantidade de biometano gerado** *Quantity of biomethane generated*	**Potencial de geração de eletricidade** *Potential for electricity generation*	**Produção de hidrogênio a partir do biometano** *Hydrogen production from biomethane*
		(m^3/ano) *(m^3/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*	**(MWh/ano)** *(MWh/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*
Salvador	2.568.928	193.949.632,09	18.270.437,35	9.783.819,20	45.520,85	2.686.370,85
Feira de Santana	657.948	23.696.994,71	2.448.799,12	1.311.331,93	6.101,19	360.056,11
Vitória da Conquista	394.024	12.787.841,29	1.212.120,43	649.090,49	2.516,67	178.222,61
Ilhéus	189.028	5.357.809,63	1.189.673,57	637.070,20	2.470,06	174.922,16
Simões Filho	120.394	9.056.593,99	943.982,14	505.502,44	1.959,95	138.797,23
Itabuna	196.676	3.170.637,88	943.725,18	505.364,83	1.959,41	138.759,45
Lauro de Freitas	217.960	8.098.846,19	649.961,87	348.054,58	1.349,48	95.566,33
Porto Seguro	181.007	7.602.294,00	524.190,94	280.704,25	1.088,35	77.073,76
Barreiras	170.667	5.710.654,35	448.527,32	240.186,38	931,26	65.948,65
Juazeiro	254.481	3.443.636,89	417.575,37	223.611,61	866,99	61.397,67
Total 10+	**4.951.113**	**272.874.941**	**27.048.993**	**14.484.736**	**64.764**	**3.977.115**
Total estadual / State total	**14.850.513**	**400.998.531**	**39.819.645**	**21.323.420**	**91.279**	**5.854.832**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Tabela 4.2 Potenciais técnicos energéticos provenientes do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário nos dez municípios com maior potencial disponível no estado da Bahia – Cenário ideal.
Table 4.2 *Technical energy potentials from anaerobic treatment of sanitary sewage in the ten municipalities with the greatest available potential in the State of Bahia- Ideal scenario*

CENÁRIO IDEAL / *IDEAL SCENARIO*						
Município *Municipality*	**Habitantes** *Inhabitants*	**Esgoto coletado e tratado** *Collected and treated sewage*	**Volume de biogás produzido** *Volume of biogas produced*	**Quantidade de biometano gerado** *Quantity of biomethane generated*	**Potencial de geração de eletricidade** *Potential for electricity generation*	**Produção de hidrogênio a partir do biometano** *Hydrogen production from biomethane*
		(m^3/ano) *(m^3/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*	**(MWh/ano)** *(MWh/year)*	**(Nm^3/ano)** *(Nm^3/year)*
Salvador	2.568.928	200.376.384,00	18.875.850,04	10.108.017,70	47.029,24	2.775.386,95
Feira de Santana	657.948	34.651.928,00	3.580.859,59	1.917.550,31	8.921,72	526.507,20
Itabuna	196.676	6.462.211,43	1.923.446,28	1.030.005,49	4.792,27	282.811,51
Ilhéus	189.028	7.561.120,00	1.678.907,10	899.054,75	3.485,84	246.856,00
Vitória da Conquista	394.024	14.972.912,00	1.419.236,61	760.001,20	2.946,69	208.675,68
Camaçari	319.394	18.524.852,00	1.244.752,30	666.564,85	2.584,42	183.020,59
Simões Filho	120.394	11.678.218,00	1.217.237,88	651.830,88	2.527,29	178.975,05
Juazeiro	254.481	8.652.354,00	1.049.184,34	561.838,22	2.178,37	154.265,50
Lauro de Freitas	217.960	11.987.800,00	962.064,56	515.185,57	1.997,49	141.455,96
Campo Formoso	74.894	3.520.018,00	933.619,94	499.953,48	1.938,43	137.273,64
Total 10+	**4.993.727**	**318.387.797**	**32.885.159**	**17.610.002**	**78.402**	**4.835.228**
Total estadual / State total	**14.850.513**	**656.451.034**	**70.500.418**	**37.752.974**	**156.501**	**10.365.941**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 4.1 / *Map 4.1*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DO ESGOTO SANITÁRIO

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM SANITARY SEWAGE - ACTUAL SCENARIO

CENÁRIO REAL

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

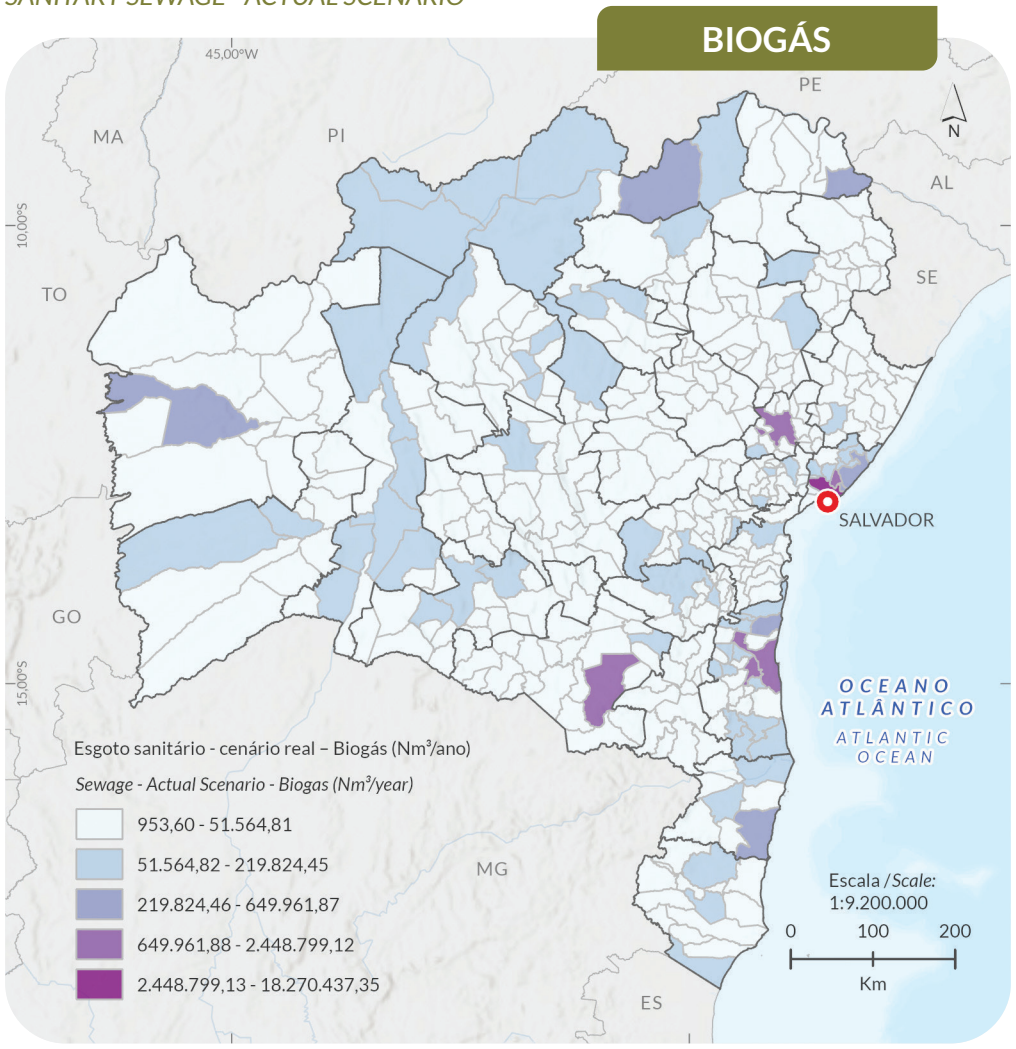
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

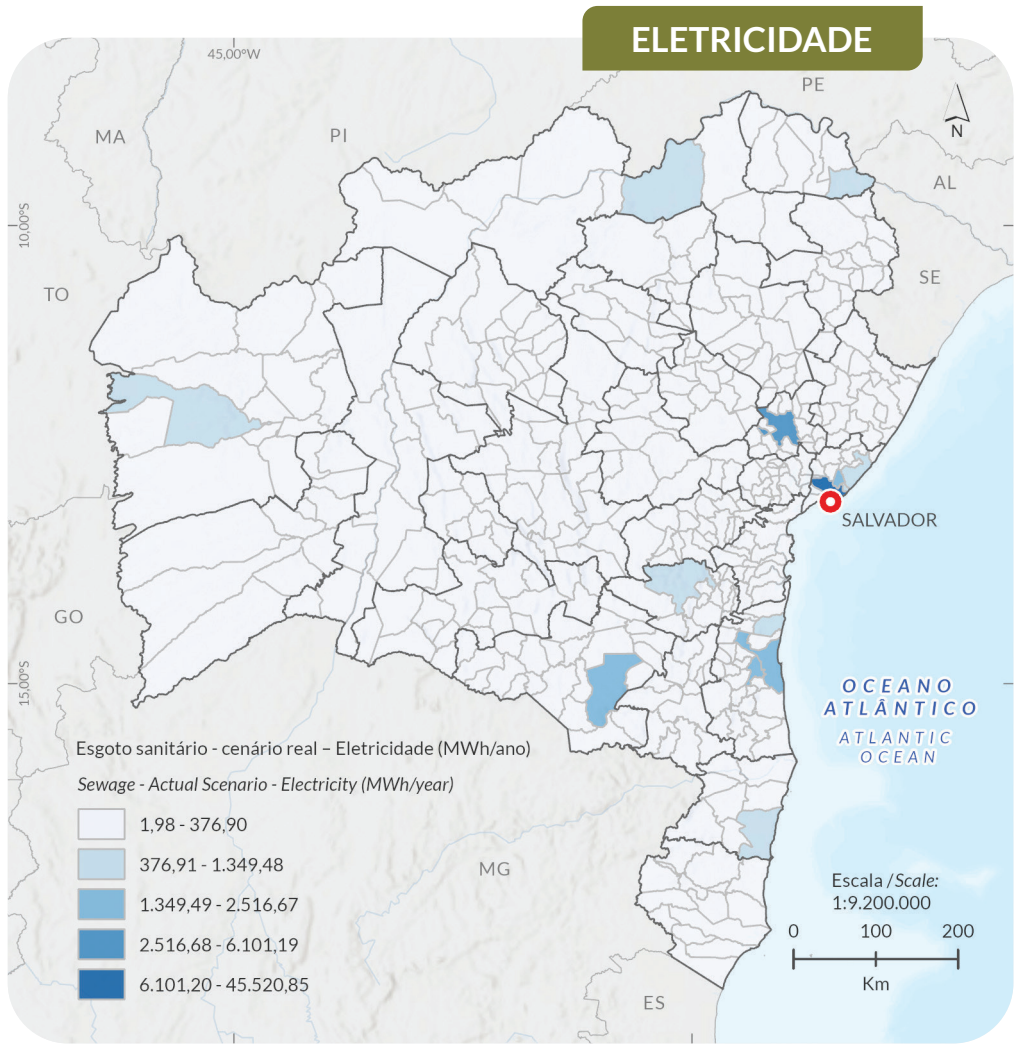
BIOGÁS

BIOGAS



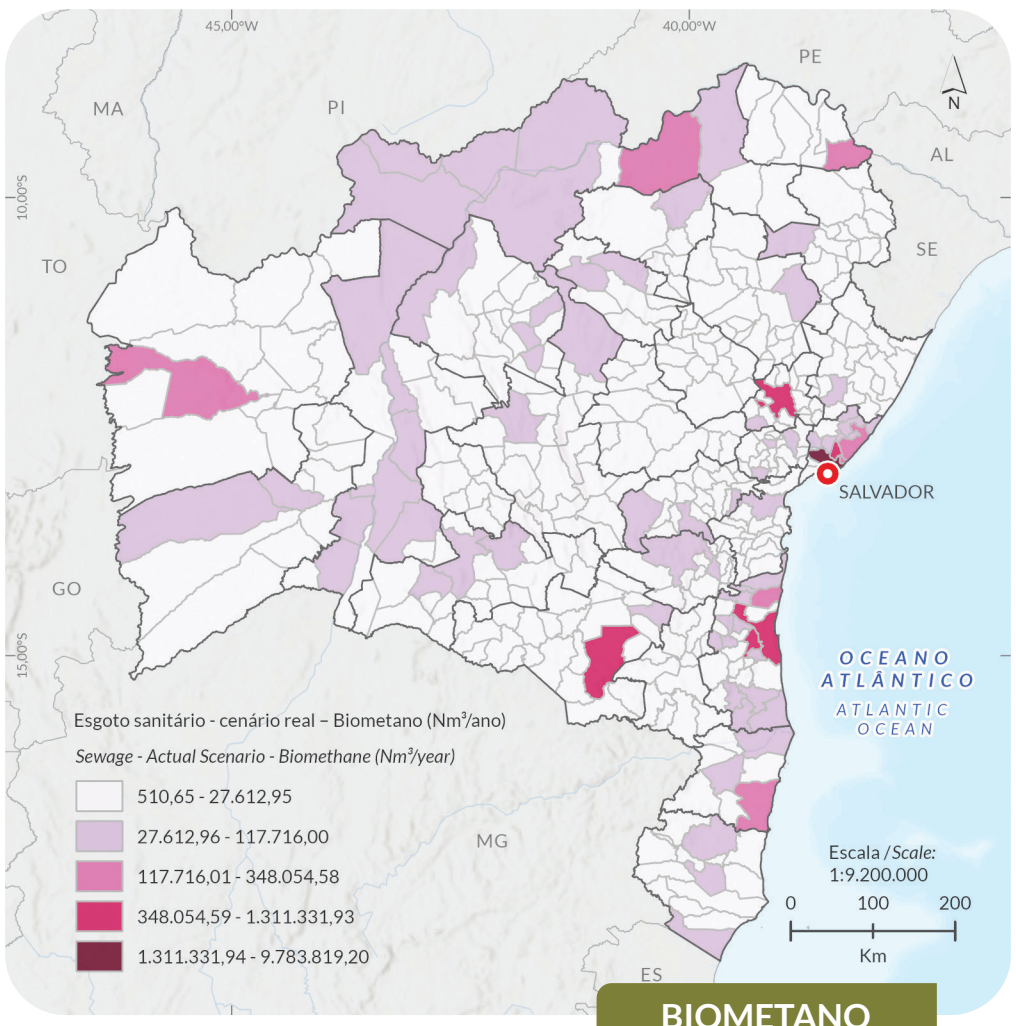
ELETRICIDADE

ELECTRICITY



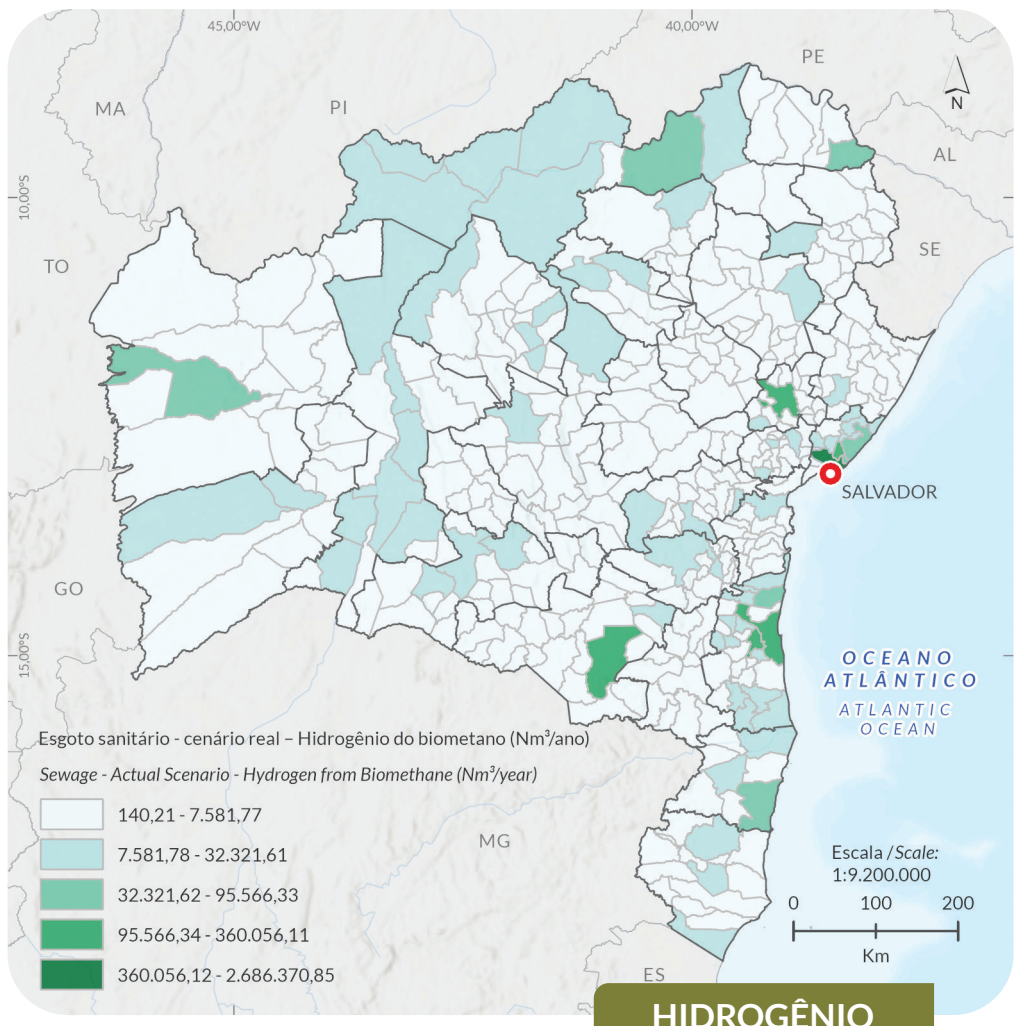
BIOMETANO

BIOMETHANE



HIDROGÊNIO

HYDROGEN



Mapa 4.2 / *Map 4.2*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DO ESGOTO SANITÁRIO

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM SANITARY SEWAGE - IDEAL SCENARIO

CENÁRIO IDEAL

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

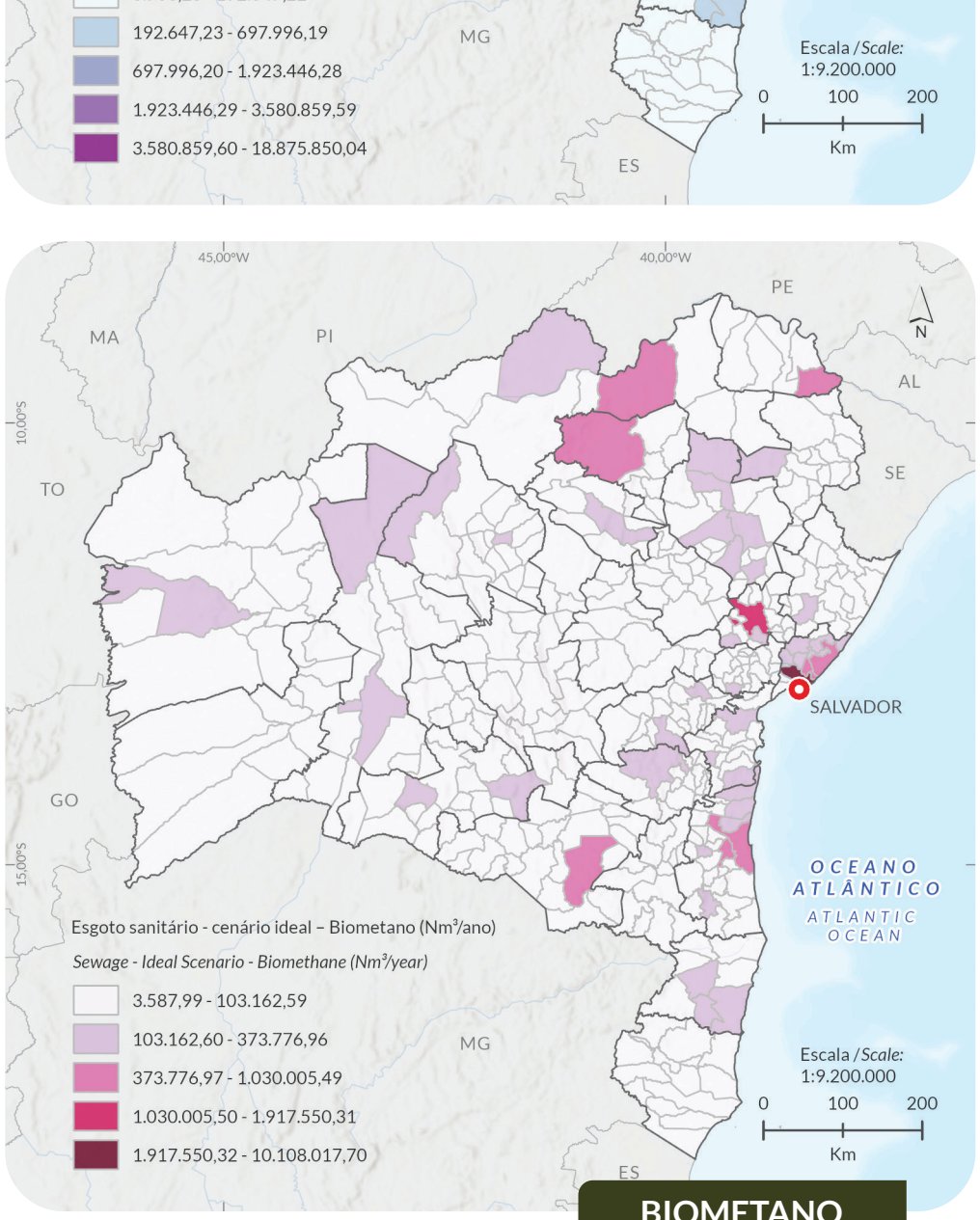
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

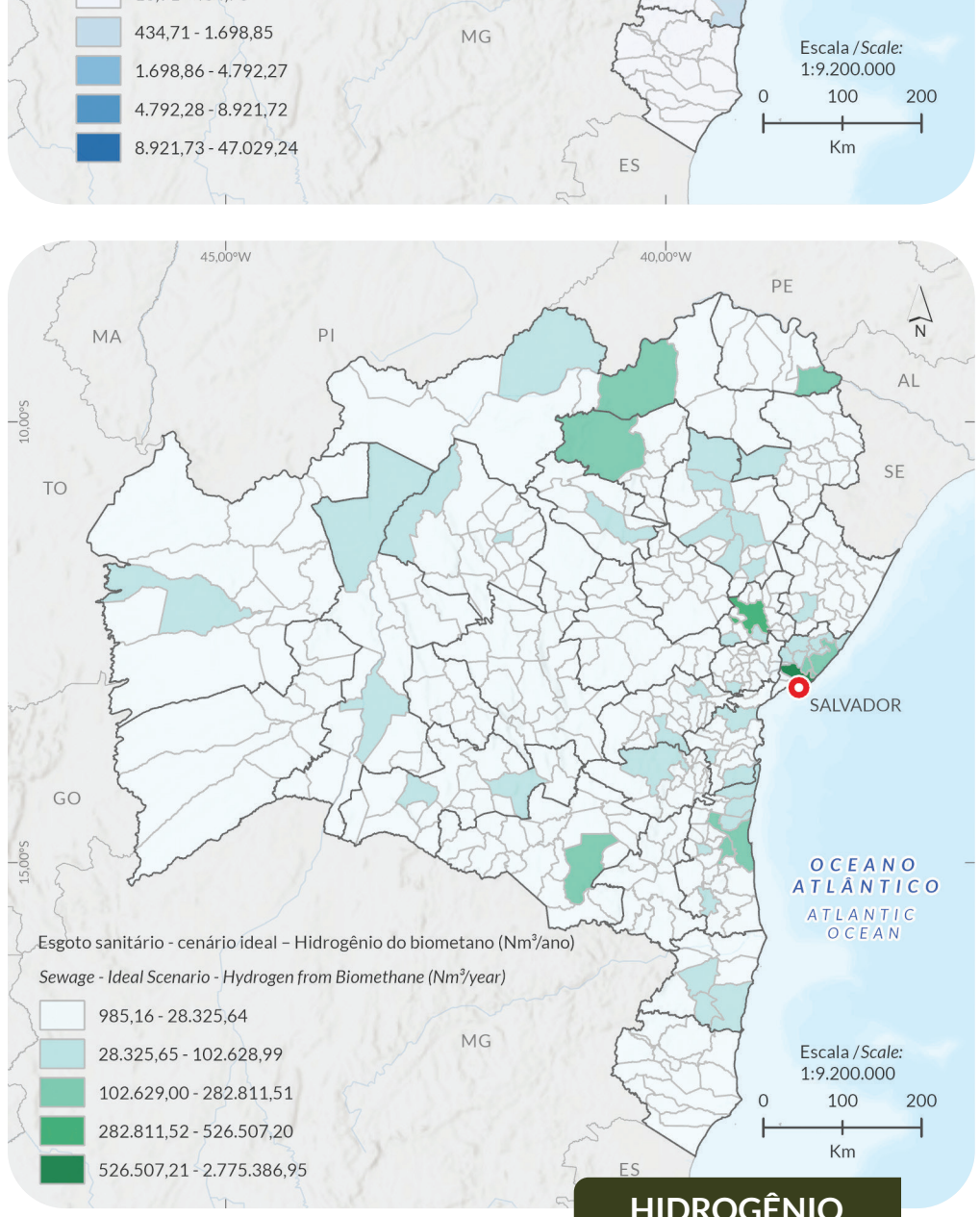
BIOGAS

BIOGÁS



ELECTRICITY

ELETRICIDADE



BIOMETHANE

BIOMETANO

HYDROGEN

HIDROGÊNIO

ENERGY RECOVERY FROM SANITARY SEWAGE IN BAHIA

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO ESGOTO SANITÁRIO NA BAHIA

The data analysis shows that municipalities in Bahia have significant potential for energy recovery from sanitary sewage, especially in the forms of biogas, biomethane, electricity, and hydrogen. The actual and ideal scenarios highlight the impact that expanding sewage collection and treatment coverage can have on renewable energy production.

The analysis of the results for the technical energy potentials from the anaerobic treatment of sanitary sewage in the ten municipalities with the highest potential in the State of Bahia, in the actual scenario (Table 4.1), indicates a concentration of this potential in regions with higher population density and more consolidated sanitation infrastructure. Salvador, the state capital, leads by a wide margin across all indicators evaluated, with an amount of sewage collected and treated of approximately 194 million m³/year, resulting in the production of 18.27 million Nm³/year of biogas. This strong performance is reflected in a biomethane production potential of 9.78 million Nm³/year and electricity generation of 45,521 MWh/year, in addition to the highest estimated production of hydrogen from biomethane (2.69 million Nm³/year), values that represent about 67% of the total recorded among the ten municipalities analyzed and about 45% of the state total.

Feira de Santana, the second-largest municipality by population, ranks second, albeit with values significantly lower than Salvador's. Its biogas (2.45 million Nm³/year) and biomethane (1.31 million Nm³/year) production correspond to approximately 9% of the total potential recorded among the ten municipalities analyzed and about 6% of the state total, underscoring the disparity between Bahia's two largest urban centers. Vitória da Conquista, Ilhéus, and Simões Filho show intermediate performance, with treated sewage volumes between 5 and 13 million m³/year, resulting in energy potentials ranging from 1,900 to 2,500 MWh/year and hydrogen production between 138,000 and 178,000 Nm³/year.

The remaining municipalities, Itabuna, Lauro de Freitas, Porto Seguro, Barreiras, and Juazeiro despite having sizable populations, show limitations in the volume of sewage treated and, consequently, in energy recovery, which may be associated with lower collection coverage and installed treatment capacity. Even so, together these five municipalities account for approximately 11% of the total potential recorded among the ten municipalities analyzed and about 7.5% of the state total.

Therefore, the ten municipalities with the highest potential in the State of Bahia together total 27.05 million Nm³/year of biogas, 14.48 million Nm³/year of biomethane, 64,764 MWh/year of electricity, and 3.98 million Nm³/year of hydrogen, which corresponds to approximately 68% of the state's potential.

The results confirm that energy recovery from sanitary sewage in Bahia represents a concrete opportunity to expand renewable energy generation, reduce environmental impacts, and contribute to the state's energy transition. The strong concentration of technical energy potential in larger municipalities, such as Salvador and Feira de Santana, underscores the importance of sanitation infrastructure as a determining factor for harnessing biogas and its derivatives.

However, the analysis also reveals a large disparity among municipalities, showing that regions with still-limited collection and treatment coverage exhibit reduced energy recovery even when they have significant populations. This finding reinforces the need for continued investments in expanding sanitary sewer networks and modernizing treatment plants.

The analysis of the ideal scenario, which assumes 100% collection and treatment of the sanitary sewage generated in Bahia's municipalities, reveals a technical energy potential substantially higher than that observed in the actual scenario. Universalizing collection and treatment not only increase the availability of biogas, biomethane, electricity, and hydrogen, but also highlights the positive impact that adequate sanitation infrastructure can have on renewable energy generation.

Salvador once again stands out as the municipality with the greatest energy potential. Under ideal conditions, the volume of treated sewage reaches 200.38 million m³/year, generating approximately 18.88 million Nm³/year of biogas. This volume would enable the production of 10.11 million Nm³/year of biomethane, an estimated 47,029 MWh/year of electricity, and about 2.78 million Nm³/year of hydrogen. These values represent the largest share of the potential recorded among the ten municipalities analyzed (57%) and of the state potential (27%), reinforcing the capital's strategic importance in implementing energy recovery projects from sewage.

Feira de Santana shows substantial gains compared with the actual scenario, reaching 3.58 million Nm³/year of biogas, 1.92 million Nm³/year of biomethane, more than 8,900 MWh/year of electricity, and 526

Figura 4.7 Ilustração isométrica de uma ETE com tratamento anaeróbio do esgoto.
Figure 4.7 *Isometric illustration of a WWTP with anaerobic sewage treatment.*

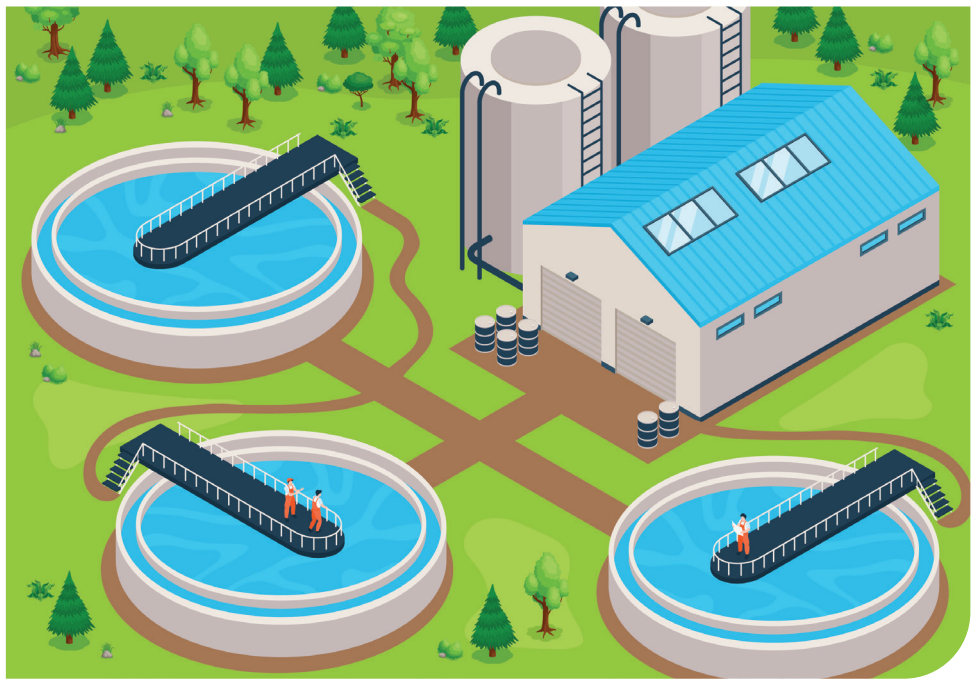


Ilustração / *Illustration*: macrovector / Freepik

A análise dos dados demonstra que os municípios baianos apresentam potenciais significativos para a valorização energética do esgoto sanitário, especialmente nas formas de biogás, biometano, energia elétrica e hidrogênio. Os cenários real e ideal evidenciam o impacto que a ampliação da cobertura de coleta e tratamento de esgoto pode ter na produção de energia renovável.

A análise dos resultados referentes aos potenciais técnicos energéticos provenientes do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário nos dez municípios com maior potencial no estado da Bahia, no cenário real *(Tabela 5.1)*, evidencia a concentração desse potencial em regiões de maior densidade populacional e infraestrutura de saneamento mais consolidada. Salvador, capital do Estado, lidera amplamente todos os indicadores avaliados, com um volume de esgoto coletado e tratado de aproximadamente 194 milhões m³/ano, resultando na produção de 18,27 milhões Nm³/ano de biogás. Esse desempenho expressivo se reflete em um potencial de produção de biometano de 9,78 milhões Nm³/ano e na geração elétrica de 45.521 MWh/ano, além da maior produção estimada de hidrogênio produzido a partir do biometano (2,69 milhões Nm³/ano), valores que representam cerca de 67% do total registrado entre os dez municípios analisados e cerca de 45% do total do Estado.

Feira de Santana, 2º maior município em termos de população, ocupa a 2ª posição, embora com valores significativamente menores que Salvador. Sua produção de biogás (2,45 milhões Nm³/ano) e de biometano (1,31 milhão Nm³/ano) corresponde a, aproximadamente, 9% do potencial total registrado entre os dez municípios analisados e cerca de 6% do total do Estado, destacando a disparidade existente entre os dois maiores centros urbanos baianos. Vitória da Conquista, Ilhéus e Simões Filho apresentam desempenhos intermediários, com volumes de esgoto tratados entre 5 milhões e 13 milhões m³/ano, resultando em potenciais energéticos que variam de 1.900 a 2.500 MWh/ano e produção de hidrogênio entre 138 mil e 178 mil Nm³/ano.

Os demais municípios (Itabuna, Lauro de Freitas, Porto Seguro, Barreiras e Juazeiro), embora apresentem população expressiva, revelam limitações no volume de esgoto tratado e, consequentemente, no aproveitamento energético, o que pode estar associado à menor cobertura de coleta e capacidade de tratamento instalada. Ainda assim, juntos, esses cinco municípios respondem por, aproximadamente, 11% do potencial total registrado entre os dez municípios analisados e cerca de 7,5% do total do Estado

Portanto, os dez municípios com maior potencial no Estado da Bahia somam juntos 27,05 milhões Nm³/ano de biogás, 14,48 milhões Nm³/ano de biometano, 64.764 MWh/ano de eletricidade e 3,98 milhões Nm³/ano de hidrogênio, o que corresponde a, aproximadamente, 68% do potencial do Estado.

Os resultados obtidos confirmam que a valorização energética do esgoto sanitário na Bahia representa uma oportunidade concreta para ampliar a geração de energia renovável, reduzir impactos ambientais e contribuir para a transição energética do Estado. A expressiva concentração do potencial técnico energético em municípios de maior porte, como Salvador e Feira de Santana, evidencia a importância da infraestrutura de saneamento como fator determinante para o aproveitamento energético do biogás e de seus derivados.

Entretanto, a análise também revela uma grande disparidade entre os municípios, demonstrando que regiões com cobertura de coleta e tratamento ainda limitada apresentam aproveitamento energético reduzido, mesmo possuindo população significativa. Essa constatação reforça a necessidade de investimentos contínuos em expansão da rede de esgotamento sanitário e modernização das estações de tratamento.

A análise do cenário ideal, que considera a coleta e o tratamento de 100% do esgoto sanitário gerado nos municípios baianos, revela um potencial técnico energético expressivamente superior ao observado no cenário real. A universalização da coleta e do tratamento não apenas amplia a disponibilidade de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio, mas também evidencia o impacto positivo que a infraestrutura adequada de saneamento pode exercer sobre a geração de energia renovável.

Salvador, mais uma vez, destaca-se como o município com maior potencial energético. Sob as condições ideais, o volume de esgoto tratado atinge 200,38 milhões m³/ano, gerando, aproximadamente, 18,88 milhões Nm³/ano de biogás. Esse volume possibi-

litaria a produção de 10,11 milhões Nm³/ano de biometano, uma geração elétrica estimada de 47.029 MWh/ano e cerca de 2,78 milhões Nm³/ano de hidrogênio. Esses valores representam a maior parcela do potencial registrado entre os dez municípios analisados (57%) e do potencial estadual (27%), reforçando a importância estratégica da capital na implementação de projetos de valorização energética do esgoto.

Feira de Santana apresenta ganhos expressivos em relação ao cenário real, alcançando 3,58 milhões Nm³/ano de biogás, 1,92 milhão Nm³/ano de biometano, mais de 8.900 MWh/ano de eletricidade e de 526 mil Nm³/ano de hidrogênio proveniente do biometano. Esses valores representam cerca de 11% do total registrado entre os dez municípios analisados e cerca de 5% do total do Estado.

O município de Itabuna continua se destacando no cenário ideal por apresentar o 3º maior potencial no cenário ideal: 5,85% do total registrado entre os dez municípios analisados e cerca de 2,73% do total do estado.

Nos municípios de menor porte entre os dez analisados, como Lauro de Freitas, Juazeiro, Ilhéus e Simões Filho, o cenário ideal revela potencialidades que atualmente permanecem subaproveitadas. Nessas localidades, a universalização da coleta poderia aumentar a geração de biogás e seus derivados, refletindo diretamente na produção energética e no aproveitamento de subprodutos. Esses dados mostram a significância dos polos com grande capacidade de contribuição para a matriz energética renovável quando há plena cobertura do saneamento.

Os municípios de Camaçari e Campo Formoso entram na lista dos dez mais potentes no cenário ideal. Camaçari tem produção energética semelhante à de Vitória da Conquista. Campo Formoso surpreende: com apenas 75 mil habitantes, gera mais eletricidade do que municípios como Lauro de Freitas no cenário real. Isso pode indicar características específicas dos municípios, como geração per capita de esgoto, além da totalidade de esgoto coletado e tratado e das suas características físico-químicas.

De maneira agregada, os dez municípios com maior potencial somam, no cenário ideal, 32,89 milhões Nm³/ano de biogás, 17,61 milhões Nm³/ano de biometano, 78.402 MWh/ano de eletricidade e 4,84 milhões Nm³/ano de hidrogênio. Esses valores correspondem a, aproximadamente, 47% do total projetado para o Estado, que, por sua vez, alcança 70,5 milhões Nm³/ano de biogás, 37,75 milhões Nm³/ano de biometano, 156.501 MWh/ano de eletricidade e 10,37 milhões Nm³/ano de hidrogênio.

Esses resultados evidenciam que a universalização da coleta de esgoto sanitário na Bahia não apenas mitigaria impactos ambientais e melhoraria a saúde pública, mas também abriria novas frentes para a diversificação da matriz energética, com potencial para consolidar o estado como referência na geração de energia renovável a partir de resíduos. Além disso, o cenário ideal demonstra a relevância de políticas públicas, investimentos em infraestrutura e adoção de tecnologias avançadas para viabilizar a plena exploração desse potencial.

A comparação entre os cenários real e ideal evidencia diferenças expressivas no aproveitamento energético do esgoto sanitário nos municípios baianos, destacando o impacto direto que a universalização da coleta e tratamento exerce sobre a produção de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio. No cenário real, observa-se que o potencial energético está fortemente concentrado em municípios com infraestrutura de saneamento consolidada, como Salvador e Feira de Santana, que, juntos, representam cerca de 76% do potencial energético dos dez municípios com maiores índices. Contudo, mesmo em cidades de médio porte, como Itabuna e Juazeiro, o aproveitamento permanece limitado devido à baixa cobertura de coleta, refletindo em menor produção de biogás e derivados.

Já no cenário ideal, a ampliação da coleta e tratamento para 100% do esgoto produzido modifica substancialmente a distribuição e a magnitude dos potenciais energéticos. Além de um aumento geral nos volumes de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio, novos municípios, como Camaçari e Campo Formoso, surgem entre os dez mais relevantes, demonstrando que a cobertura total pode revelar potenciais ocultos em regiões atualmente subexploradas. Além disso, municípios de menor porte, como Lauro de Freitas e Simões Filho, apresentam expressivos aumentos percentuais em relação ao cenário real, reforçando a influência da universalização no incremento energético.

Figura 4.8 Estação de tratamento de esgoto.
Figure 4.8 *Sewage treatment plant.*



Foto / *Photo:* wellphoto / stock.adobe.com

thousand Nm³/year of hydrogen from biomethane. These values represent about 11% of the total recorded among the ten municipalities analyzed and about 5% of the state total.

Itabuna continues to stand out in the ideal scenario, posting the third-largest potential: 5.85% of the total recorded among the ten municipalities analyzed and about 2.73% of the state total.

Among the smaller municipalities in the top ten, such as Lauro de Freitas, Juazeiro, Ilhéus, and Simões Filho, ideal scenario reveals potentials that are currently underutilized. In these localities, universalizing collection could increase the generation of biogas and its derivatives, directly boosting energy production and the use of by-products. These data highlight the significance of hubs with strong capacity to contribute to the renewable energy mix when sanitation coverage is universal.

Camaçari and Campo Formoso enter the top-ten list in the ideal scenario. Camaçari has an energy output similar to that of Vitória da Conquista. Campo Formoso is striking: with only 75,000 inhabitants, it would generate more electricity than municipalities such as Lauro de Freitas in the actual scenario. This may indicate municipality-specific characteristics, such as per-capita sewage generation, as well as the share of sewage collected and treated and its physicochemical characteristics.

Viewed in aggregate, the ten municipalities with the highest potential total, in the ideal scenario, 32.89 million Nm³/year of biogas, 17.61 million Nm³/year of biomethane, 78,402 MWh/year of electricity, and 4.84 million Nm³/year of hydrogen. These values correspond to approximately 47% of the state total, which, in turn, reaches 70.5 million Nm³/year of biogas, 37.75 million Nm³/year of biomethane, 156,501 MWh/year of electricity, and 10.37 million Nm³/year of hydrogen.

These results show that universalizing sanitary sewage collection in Bahia would not only mitigate environmental impacts and improve public health, but also open new avenues for diversifying the energy mix, positioning the State to become a reference in renewable energy generation from waste. Moreover, the ideal scenario underscores the importance of public policies, infrastructure investments, and advanced technologies to fully unlock this potential.

Comparing the actual and ideal scenarios reveal substantial differences in energy recovery from sanitary sewage in Bahia's municipalities, highlighting the direct impact that universalizing collection and treatment has on the production of biogas, biomethane, electricity, and hydrogen.

In the actual scenario, energy potential is heavily concentrated in municipalities with consolidated sanitation infrastructure, such as Salvador and Feira de Santana, which together account for about 76% of the potential among the ten leading municipalities. However, even in medium-sized cities like Itabuna and Juazeiro, utilization remains limited due to low collection coverage, resulting in lower production of biogas and its derivatives.

In the ideal scenario, expanding collection and treatment to 100% of the sewage produced substantially changes the distribution and magnitude of energy potentials. In addition to an overall increase in biogas, biomethane, electricity, and hydrogen, new municipalities, such as Camaçari and Campo Formoso, emerge among the ten most relevant, demonstrating that full coverage can reveal hidden potentials in currently underexplored regions. Furthermore, smaller municipalities such as Lauro de Freitas and Simões Filho show significant percentage increases relative to the actual scenario, reinforcing the influence of universalization on energy gains.

Quantitatively, the ten municipalities with the highest potential in the ideal scenario total about 32.89 million Nm³/year of biogas, 21% higher than in the actual scenario (27.05 million Nm³/year). The gain is even more significant at the state level, where the ideal-scenario potential nearly doubles compared with the actual scenario, reaching 70.5 million Nm³/year of biogas. This pattern is mirrored for biomethane, electricity, and hydrogen, confirming that sanitation infrastructure is a determining factor for energy recovery from sewage.

Another relevant point is the reduction in disparities among municipalities in the ideal scenario. Although Salvador retains the lead across all indicators, its relative share of the state total declines, showing that universalization broadens opportunities for smaller municipalities. This is strategically important for decentralizing renewable energy production and fostering balanced regional development.

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO ESGOTO SANITÁRIO NA BAHIA

Integrating technologies for biogas capture and utilization, upgrading to obtain biomethane, and its conversion to hydrogen can transform the sanitation sector into a strategic vector for producing clean, high-value energy. In addition, effective public policies, combined with economic incentives and public–private partnerships, can accelerate the implementation of projects aimed at the circular economy and the full utilization of generated wastes.

Therefore, the comparative analysis shows that progress toward the ideal scenario not only maximizes energy and environmental gains but also strengthens the resilience of the state's energy system. Investments in public policies, modernization of treatment plants, and expansion of sanitary sewer networks are essential to turn the identified potential into concrete benefits, consolidating Bahia as a key benchmark in waste valorization, particularly through Waste-to-Energy technologies.

The analysis of the sanitary sewage energy potential in the State of Bahia reveals a significant difference between the actual (current) and ideal (universalized) scenarios, as observed in the thematic maps. Table 4.3 compares the two scenarios with respect to the total energy potential available in the state, followed by context on Bahia's energy demand and the current regulatory framework.

In Bahia, average natural gas demand reached 6.89 million m³/day in 2022, the highest value recorded since the start of the historical series in 2010. Consumption was heavily concentrated in the industrial sector, responsible for 83.9% of total sales, followed by the power generation (10.5%), automotive (4.8%), commercial (0.5%), and residential (0.3%) segments [16].

Based on the results obtained, the actual scenario would enable the production of approximately 58.4 thousand m³/day of biomethane, or 0.85% of the state's total natural gas demand. In the ideal scenario, this figure rises to approximately 103.4 thousand m³/day, corresponding to 1.50% of total demand. These results indicate that both scenarios are more than sufficient to supply Bahia's commercial and residential segments, which together account for only 0.8% of the state's demand [16,17].

With regard to electricity generation from the biogas produced by the anaerobic treatment of sanitary sewage, Bahia is estimated to have a potential of 91.28 GWh/year in the actual scenario and 156.5 GWh/year in the ideal scenario. Considering that the energy consumption of the state's sanitary sewerage system is on the order of 86 GWh/year, in the actual scenario energy recovery from biogas would be sufficient to fully self-supply the system's own demand, still with a small surplus. In the ideal scenario, this surplus would be significantly larger, enabling not only a reduction in the sector's operating costs but also the sale of the electricity generated to the national interconnected system.

The Legal Framework for Distributed Micro and Minigeneration (MMGD), established by Law no. 14,300/2022 [17], allows surplus energy to be injected into the grid and converted into carbon credits, financially benefiting treatment plants. For consumers in the free market, Law no. 9,427/1996 guarantees discounts on distribution/transmission for renewable sources [18]. However, the proposal contained in Provisional Measure (MP) nº. 1,300/2025 [19], which aims to reform the power sector, seeks to remove these benefits, which may affect economic attractiveness.

The estimated production of renewable hydrogen (from biomethane) is 5.85 million Nm³/year in the actual scenario and 10.37 million Nm³/year in the ideal scenario. With the Low-Carbon Hydrogen Legal Framework, established by Law nº. 14,948/2024 [20], it becomes possible to issue renewable energy and emissions-reduction certificates, in addition to making hydrogen from biogas a competitive product in domestic and international markets.

The comparison between the actual and ideal scenarios shows that the energy potential from sanitary sewage in Bahia is largely underutilized, since universalizing collection and treatment could nearly double the energy benefits, supplying sectors not currently served and enabling surplus generation of electricity and renewable hydrogen. Beyond the energy gains, the ideal scenario reinforces the technical, environmental, and economic feasibility of integrating sanitation as a strategic pillar of the state's energy transition. Although the current legislation already favors the valorization of biogas, it is essential to closely monitor the regulatory changes under discussion, such as Provisional Measure (MP) no. 1,300/2025, to ensure conditions that enable investment and the full exploitation of this renewable potential.

Em termos quantitativos, os dez municípios com maior potencial no cenário ideal somam cerca de 32,89 milhões Nm³/ano de biogás, valor 21% superior ao registrado no cenário real (27,05 milhões Nm³/ano). O ganho é ainda mais significativo quando se observa o potencial estadual total, que no cenário ideal quase dobra em relação ao real, alcançando 70,5 milhões Nm³/ano de biogás. Esse comportamento é replicado para biometano, eletricidade e hidrogênio, confirmando que a infraestrutura de saneamento é determinante para o aproveitamento energético do esgoto.

Outro ponto relevante é a redução da disparidade entre municípios no cenário ideal. Embora Salvador mantenha a liderança em todos os indicadores, sua participação relativa no total estadual diminui, demonstrando que a universalização amplia as oportunidades para municípios menores. Esse aspecto é estratégico para descentralizar a produção de energia renovável, favorecendo o desenvolvimento regional equilibrado. A integração de tecnologias para captura e aproveitamento do biogás, purificação para obtenção de biometano e sua conversão em hidrogênio pode transformar o setor de saneamento em um vetor estratégico para a geração de energia limpa e de alto valor agregado. Além disso, políticas públicas eficazes, aliadas a incentivos econômicos e parcerias público-privadas, podem acelerar a implementação de projetos voltados à economia circular e ao aproveitamento integral dos resíduos gerados.

Portanto, a análise comparativa evidencia que o avanço em direção ao cenário ideal não apenas potencializa os ganhos energéticos e ambientais, mas também fortalece a resiliência do sistema energético estadual. Investimentos em políticas públicas, modernização de estações de tratamento e ampliação da rede de esgotamento sanitário são essenciais para transformar o potencial identificado em benefícios concretos, consolidando a Bahia como referência na valorização energética de resíduos.

A análise dos resultados do potencial energético do esgoto sanitário no Estado da Bahia revela uma diferença significativa entre o cenário real (atual) e o ideal (universalizado), conforme observado nos mapas temáticos. A *Tabela 4.3* compara os dois cenários, em relação ao potencial energético total disponível no Estado, seguidos da contextualização em relação à demanda energética da Bahia e ao marco regulatório vigente.

Na Bahia, a demanda média de gás natural atingiu 6,89 milhões de m³/dia em 2022, o maior valor registrado desde o início da série histórica em 2010. O consumo foi fortemente concentrado no setor industrial, responsável por 83,9% do total comercializado, seguido pelos segmentos de geração elétrica (10,5%), automotivo (4,8%), comercial (0,5%) e residencial (0,3%) [16].

A partir dos resultados obtidos foi possível observar que o cenário real possibilitaria a produção de aproximadamente 58.400 m³/dia de biometano, ou 0,85% da demanda total de gás natural do Estado. No cenário ideal, esse valor sobe para, aproximadamente, 103.400 m³/dia, o que corresponde a 1,50% da demanda total. Esses resultados indicam que ambos os cenários são mais do que suficientes para suprir o segmento comercial e residencial da Bahia, que juntos representam apenas 0,8% da demanda estadual [16,17].

No que se refere à geração de eletricidade a partir do biogás produzido no tratamento anaeróbio do esgoto sanitário, estima-se que a Bahia disponha de um potencial de 91,28 GWh/ano no cenário real e de 156,5 GWh/ano no cenário ideal. Considerando que o consumo energético do sistema de esgotamento sanitário do Estado é da ordem de 86 GWh/ano, observa-se que, no cenário real, o aproveitamento energético do biogás seria suficiente para autossuprir integralmente a demanda do próprio sistema, ainda com uma pequena margem excedente. Já no cenário ideal, esse excedente seria significativamente maior, possibilitando não ape-

Tabela 4.3 Comparação dos cenários real e ideal do potencial energético do esgoto sanitário no Estado da Bahia.
Table 4.3 *Comparison of the actual and ideal scenarios for the energy potential from sanitary swage in the State of Bahia.*

Indicador *Indicator*	Cenário real *Actual scenario*	Cenário ideal *Ideal scenario*	Aumento *Increase* (%)
Esgoto coletado e tratado (m³/ano) *Sewage collected and treated (m³/year)*	400.998.531	656.451.034	+63,7
Biogás (Nm³/ano) *Biogas (Nm³/year)*	39.819.645	70.500.418	+77,1
Biometano (Nm³/ano) *Biomethane (Nm³/year)*	21.323.420	37.752.974	+77,1
Eletricidade (MWh/ano) *Electricity (MWh/year)*	91.279	156.501	+71,5
Hidrogênio (Nm³/ano) *Hydrogen (Nm³/year)*	5.854.832	10.365.941	+77,1
Demanda de gás natural da Bahia (m³/dia) *Natural gas demand in Bahia (m³/day)*	6.890.000	6.890.000	
% da demanda de gás natural suprida *% of natural gas demand met*	0,85%	1,50%	+76,5

Fonte: elaborada pelos autores com base nos resultados obtidos no estudo e em [14]. / *Source: prepared by the authors based on the results obtained in the study and in [14].*

nas a redução dos custos operacionais do setor, mas também a comercialização da energia elétrica gerada junto ao sistema interligado nacional. O *Marco Legal da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD)* instituído pela *Lei nº 14.300/2022* [17] permite que a energia excedente seja injetada na rede e convertida em créditos, beneficiando financeiramente as estações de tratamento. Para consumidores no mercado livre, a *Lei nº 9.427/1996* garante descontos na distribuição/transmissão para fontes renováveis [18]. No entanto, a proposta contida na *MP nº 1.300/2025* [19], que tem por objetivo a reforma do setor elétrico, busca remover esses benefícios, o que pode impactar a atratividade econômica.

A produção estimada de hidrogênio verde (a partir do biometano) é 5,85 milhões Nm^3/ano no cenário real e 10,37 milhões Nm^3/ano no cenário ideal. Com o *Marco Legal do Hidrogênio de Baixo Carbono,* instituído pela *Lei nº 14.948/2024* [20], passa a ser possível emitir certificados de energia renovável e de redução de emissões, além de tornar o hidrogênio do biogás um produto competitivo no mercado nacional e internacional.

A comparação entre os cenários real e ideal evidencia que o potencial energético do esgoto sanitário na Bahia é amplamente subaproveitado, uma vez que a universalização da coleta e do tratamento poderia praticamente dobrar os benefícios energéticos, suprindo setores atualmente não atendidos e possibilitando a geração excedente de eletricidade e hidrogênio verde. Além do ganho energético, o cenário ideal reforça a viabilidade técnica, ambiental e econômica de integrar o saneamento como eixo estratégico da transição energética no Estado. Embora a legislação vigente já favoreça a valorização do biogás, é essencial acompanhar de perto as mudanças regulatórias em discussão, como a *MP nº 1.300/2025,* para assegurar condições que viabilizem investimentos e a plena exploração desse potencial renovável.

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados demonstra que o tratamento anaeróbio do esgoto sanitário na Bahia possui um potencial energético expressivo, capaz de contribuir significativamente para a geração de energia renovável no Estado. No cenário real, observou-se que a produção de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio está fortemente concentrada em municípios com infraestrutura de saneamento consolidada, como Salvador e Feira de Santana, enquanto cidades de médio e pequeno portes apresentam aproveitamento limitado devido à baixa cobertura de coleta e tratamento. Já no cenário ideal, que considera a universalização do saneamento, verifica-se uma ampliação substancial dos potenciais energéticos, além de uma melhor distribuição entre os municípios, com destaque para o surgimento de novos polos como Camaçari e Campo Formoso.

Os ganhos quantitativos são significativos: o volume estadual de biogás aumenta praticamente 80% no cenário ideal, o potencial de biometano supera a demanda de gás natural dos segmentos comerciais e residenciais do Estado em qualquer cenário, além de aumentar substancialmente o potencial de eletricidade e hidrogênio verde. Esse incremento garante a redução da dependência de fontes fósseis, diminui custos operacionais do setor de saneamento e contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, fortalecendo os compromissos ambientais do Estado. Esses resultados evidenciam que a universalização da coleta e tratamento não apenas amplia a disponibilidade de energia limpa, mas também fortalece a resiliência energética, descentraliza a geração e reduz desigualdades regionais.

Do ponto de vista regulatório e econômico, o marco legal vigente favorece a valorização energética do biogás, permitindo créditos de energia e certificação de hidrogênio renovável; entretanto, mudanças previstas, como a *MP nº 1.300/2025*, podem impactar a atratividade de investimentos, sendo necessário monitoramento contínuo. Portanto, o avanço rumo ao cenário ideal depende de políticas públicas eficazes, investimentos em infraestrutura, adoção de tecnologias modernas e parcerias estratégicas que consolidem o saneamento como um vetor essencial da transição energética, transformando o potencial identificado em benefícios ambientais, sociais e econômicos para o Estado da Bahia.

4.7 FINAL CONSIDERATIONS

The analysis of the results shows that the anaerobic treatment of sanitary sewage in Bahia has substantial energy potential, capable of contributing significantly to the state's renewable energy generation. In the actual scenario, the production of biogas, biomethane, electricity, and hydrogen is heavily concentrated in municipalities with consolidated sanitation infrastructure, such as Salvador and Feira de Santana, while medium, and small-sized cities show limited utilization due to low collection and treatment coverage. In the ideal scenario, which assumes universalization of sanitation, there is a substantial increase in energy potentials and a better distribution among municipalities, with new hubs emerging, notably Camaçari and Campo Formoso.

The quantitative gains are significant: the state's biogas volume increases by nearly 80% in the ideal scenario; the biomethane potential exceeds the natural gas demand of the state's commercial and residential segments under either scenario; and the potential for electricity and renewable hydrogen increases substantially. This boost reduces dependence on fossil sources, lowers operating costs in the sanitation sector, and helps mitigate greenhouse gas emissions, strengthening the state's environmental commitments. These results show that universalizing collection and treatment not only expands the availability of clean energy but also strengthens energy resilience, decentralizes generation, and reduces regional inequalities.

From a regulatory and economic perspective, the current legal framework favors energy valorization of biogas, allowing energy credits and renewable hydrogen certification; however, planned changes, such as Provisional Measure (MP) nº. 1,300/2025, may affect investment attractiveness, requiring continuous monitoring. Therefore, progress toward the ideal scenario depends on effective public policies, infrastructure investments, the adoption of modern technologies, and strategic partnerships that consolidate sanitation as a key driver of the energy transition, transforming the identified potential into environmental, social, and economic benefits for the State of Bahia.

Figura 4.9 Vista aérea de uma ETE com tratamento anaeróbio de esgoto sanitário.
Figure 4.9 *Aerial view of a WWTP with anaerobic sanitary sewage treatment.*



Foto / *Photo:* MVProductions / stock.adobe.com

Atlas Bioenergia Bahia

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS NA BAHIA

ENERGY RECOVERY FROM AGRICULTURAL RESIDUES IN BAHIA

5.1 RESÍDUOS AGRÍCOLAS E BIOENERGIA: CAMINHOS SUSTENTÁVEIS PARA O CAMPO BAIANO

As práticas de manejo de resíduos agrícolas no Brasil ainda são, em grande parte, baseadas em métodos tradicionais e pouco sustentáveis. A queima de restos de colheita, usada para facilitar o preparo do solo, contribui para a emissão de poluentes atmosféricos e perda de matéria orgânica. A incorporação direta ao solo, embora comum, pode provocar desequilíbrios nutricionais e alterações na microbiota, dependendo da cultura. Em algumas regiões, ainda persiste o descarte inadequado desses resíduos em áreas não controladas, agravando os impactos ambientais. Já o uso como forragem exige atenção quanto à qualidade e ao valor nutricional do material [1,2].

Diante desse cenário, o aproveitamento energético dos resíduos agrícolas surge como uma alternativa estratégica, capaz de mitigar emissões, reduzir impactos ambientais e gerar energia a partir de subprodutos já existentes na cadeia produtiva, sem demandar expansão da área cultivada ou competir com a produção de alimentos [1]. No Estado da Bahia, a diversidade territorial e o expressivo volume de culturas temporárias e permanentes resultam em grande quantidade de resíduos com potencial energético a ser explorado.

Este estudo concentra-se na avaliação do potencial de geração de eletricidade a partir da queima direta desses resíduos, considerando aspectos produtivos, regionais e tecnológicos. Para os resíduos selecionados, foram estimados os potenciais de geração de eletricidade, expressos em megawatts-hora (MWh), com base em dados secundários [4] e hipóteses específicas descritas na seção de metodologia. A análise busca identificar oportunidades sustentáveis e viáveis para o contexto rural e agroindustrial baiano, contribuindo para uma gestão mais eficiente dos resíduos e para a diversificação da matriz energética regional.

Neste documento, o termo "resíduos agrícolas" refere-se exclusivamente a materiais orgânicos provenientes dos cultivos, como restos vegetais, cascas e subprodutos da colheita e/ou do processamento agroindustrial. Resíduos não orgânicos, como embalagens de defensivos agrícolas, não foram considerados neste escopo.

5.1 AGRICULTURAL RESIDUES AND BIOENERGY: SUSTAINABLE PATHWAYS FOR THE STATE OF BAHIA

Agricultural residues management practices in Brazil are still largely based on traditional and unsustainable methods. The burning of crop residues, often used to facilitate soil preparation, contributes to the emission of atmospheric pollutants and the loss of organic matter. Direct incorporation into the soil, although common, can cause nutritional imbalances and alterations in the microbiota, depending on the crop. In some regions, improper disposal of this residue in uncontrolled areas persists, exacerbating environmental impacts. Using it as forage requires attention to the quality and nutritional value of the material [1,2].

Given this scenario, the energy recovery of agricultural residues emerges as a strategic alternative, capable of mitigating emissions, reducing environmental impacts, and generating energy from byproducts already present in the production chain, without requiring the expansion of cultivated areas or competing with food production [3]. In the State of Bahia, territorial diversity and the significant volume of temporary and permanent crops result in a large amount of residues with energy potential to be explored.

This study focuses on assessing the potential for electricity generation from the direct combustion of these residues, considering production, regional and technological aspects. For the selected residues, electricity generation potentials were estimated, expressed in megawatt-hours (MWh), based on secondary data [4] and specific assumptions described in the methodology section. The analysis seeks to identify sustainable and viable opportunities for the rural and agro-industrial context of Bahia, contributing to more efficient residue management and to the diversification of the regional energy mix.

In this document, the term "agricultural residues" refers exclusively to organic materials from crops, such as plant remains, peelings, and byproducts of harvesting and/or agro-industrial processing. Non-organic residues, such as pesticide packaging, were not considered within this scope.

Figura 5.1 Plantação de soja
Figure 5.1 *Soybean plantation*



Foto / *Photo:* oticki / stock.adobe.com

5.2 AGRICULTURE AND RESIDUE GENERATION IN BRAZIL: PRODUCTIVE EXPANSION AND ENVIRONMENTAL CHALLENGES

In recent decades, Brazilian agribusiness has undergone a profound transformation, consolidating its position as one of the most dynamic sectors of the national economy. Currently, Brazil is one of the largest food producers and exporters in the world. This evolution is the result of significant productivity gains, driven by investments in science, technology, and public policies, combined with the efforts of rural producers. In 2024, the sector represented approximately 25% of the country's Gross Domestic Product (GDP) (BRL 2.72 trillion) and accounted for almost half of Brazilian exports, particularly soybeans, beef, and corn. Furthermore, one in three Brazilian workers is employed in the agribusiness sector [5].

Brazilian agriculture stands out as the main driver of agribusiness, representing 70% of the sector's GDP in 2024 (BRL 1.9 trillion) and reaching a Gross Production Value (GVP) of BRL 886.6 billion. Adapted to the tropical climate and characterized by technological intensity, national agricultural production is led by soybeans, with revenues of BRL 334.1 billion, followed by corn (BRL 128.2 billion), sugarcane (BRL 106.2 billion), and Arabica coffee (BRL 56.7 billion). High productivity and the surpluses generated by agriculture have boosted Brazilian exports, consolidating the country as a world leader in the production and export of products such as soybeans (40% of global production), coffee (38% of global production), orange juice (70% of global production), and sugar (23% of global production) [5]*. Given this scenario, it is relevant to examine how states with a strong agricultural presence, such as the State of Bahia, can integrate the use of agricultural residues into their sustainable development strategies.*

5.3 AGRICULTURE IN BAHIA: PRODUCTIVE DIVERSITY AND LAND STRUCTURE

Bahia's climate is predominantly tropical, with high average temperatures. Precipitation varies: in the semi-arid Sertão (the semi-arid hinterland region of Bahia), precipitation is scarce, whereas along the coast and in higher-altitude areas, such as the plateaus, humidity is higher, and rainfall can exceed 1,200 mm. The state's topography, with variations in altitude, directly influences temperature distribution, with the highest temperatures found in low-altitude valleys, such as those along the São Francisco River. This climatic diversity influences regional development, with the semiarid interior experiencing greater water and production constraints compared to the coast and the west of the state [6].

In addition to climate, rural Bahia is also characterized by significant diversity in land tenure, reflecting the environmental and socioeconomic conditions of each region. The regions with the greatest concentration of large rural properties include the western Bahia, the far South, and parts of the Salvador Metropolitan Region and the Recôncavo area. In western Bahia, for example, large-scale establishments focused on mechanized and export-oriented production, such as soybeans, corn, and cotton, predominate. Conversely, territories located in the state's semi-arid region generally have a lower concentration of land ownership. This territorial distribution reflects the agroecological, historical, and economic conditions of each region, directly influencing the production systems adopted [7]*. Data from the most recent Agricultural Census (2017) show that in Bahia* [8]*, 74% of temporary crop establishments and 70% of permanent crop establishments were up to 10 hectares (ha) in size, highlighting the predominance of small-scale establishments in the state (Table 5.1).*

5.2 AGRICULTURA E GERAÇÃO DE RESÍDUOS NO BRASIL: EXPANSÃO PRODUTIVA E DESAFIOS AMBIENTAIS

Nas últimas décadas, o agronegócio brasileiro passou por uma profunda transformação, consolidando-se como um dos setores mais dinâmicos da economia nacional. Atualmente, o Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de alimentos do mundo. Essa evolução decorre de ganhos expressivos de produtividade, impulsionados por investimentos em ciência, tecnologia e políticas públicas, aliados à atuação dos produtores rurais. Em 2024, o setor representou cerca de 25% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (R$ 2,72 trilhões) e respondeu por quase metade das exportações brasileiras, com destaque para a soja, carne bovina e milho. Além disso, um em cada três trabalhadores brasileiros trabalha no setor do agronegócio [5].

A agricultura brasileira se destaca como o principal motor do agronegócio, representando 70% do PIB setorial em 2024 (R$ 1,9 trilhão) e alcançando um Valor Bruto da Produção (VBP) de R$ 886,6 bilhões. Adaptada ao clima tropical e intensiva em tecnologia, a produção agrícola nacional é liderada pela soja em grão, com faturamento de R$ 334,1 bilhões, seguida por milho (R$ 128,2 bilhões), cana-de-açúcar (R$ 106,2 bilhões) e café arábica (R$ 56,7 bilhões). A elevada produtividade e os excedentes gerados pela agricultura têm impulsionado as exportações brasileiras, consolidando o País como líder mundial na produção e exportação de produtos como soja (40% da produção mundial), café (38% da produção mundial), suco de laranja (70% da produção mundial) e açúcar (23% da produção mundial) [5]. Diante desse cenário, torna-se relevante examinar como Estados com forte presença agropecuária, como a Bahia, podem integrar o aproveitamento de resíduos agrícolas em suas estratégias de desenvolvimento sustentável.

5.3 AGRICULTURA BAIANA EM NÚMEROS: DIVERSIDADE PRODUTIVA E ESTRUTURA FUNDIÁRIA

O clima predominante na Bahia é o tropical, com médias de temperatura elevadas. A precipitação varia: no sertão semiárido, a chuva é escassa, enquanto na costa e em áreas de maior altitude, como as chapadas, a umidade é maior e a pluviosidade pode ultrapassar 1.200 mm. O relevo do Estado, com variações de altitude, influencia diretamente na distribuição das temperaturas, sendo as mais altas encontradas em vales de menor altitude, como o do Rio São Francisco. Essa diversidade climática influencia o desenvolvimento regional, com o interior semiárido apresentando maiores limitações hídricas e produtivas em comparação ao litoral e ao Oeste do Estado [6].

Além do clima, a organização do espaço rural baiano também é marcada por uma expressiva diversidade na estrutura fundiária, refletindo as condições ambientais e socioeconômicas de cada território. As regiões com maior presença de grandes propriedades rurais incluem o Oeste baiano, Extremo Sul e em partes da Região Metropolitana de Salvador e do Recôncavo. No Oeste, por exemplo, predominam estabelecimentos de grande porte voltados à produção mecanizada e de exportação, como soja, milho e algodão. Por outro lado, territórios localizados no semiárido do Estado possuem em geral, menor concentração de terra. Essa distribuição territorial reflete as condições agroecológicas, históricas e econômicas de cada região, influenciando diretamente os sistemas produtivos adotados [7]. Dados do último *Censo Agropecuário de 2017* mostram que, na Bahia [8], 74% dos estabelecimentos de lavouras temporárias e 70% dos estabelecimentos de lavouras permanentes possuíam até 10 ha, o que destaca a predominância de estabelecimentos de pequeno porte no Estado (*Tabela 5.1*).

Essa diversidade estrutural se reflete também na variedade de culturas cultivadas na Bahia. A soja, com produção crescente no Oeste, e o algodão, em que o Estado ocupa posição de destaque nacional, são exemplos de culturas de larga escala. O milho, fundamental tanto para consumo humano quanto para ração animal, e a cana-de-açúcar, voltada à produção de açúcar e etanol, também possuem grande relevância. Além disso, a Bahia é referência na produção de feijão, uma cultura tradicional, e de frutas tropicais, como mamão, banana e melancia, que têm forte aceitação nos mercados interno e externo. A produção de cacau, especialmente na Região Sul, e o café, cultivado em diversas áreas, complementam a diversidade agrícola do Estado [4]. A *Figura 5.2* apresenta a produtividade baiana em relação ao total brasileiro no ano de 2023. Observa-se que, além das culturas já mencionadas, a Bahia se destaca também como um importante produtor de mamona, sisal, guaraná, manga, maracujá, coco-da-baía, cebola, entre outros.

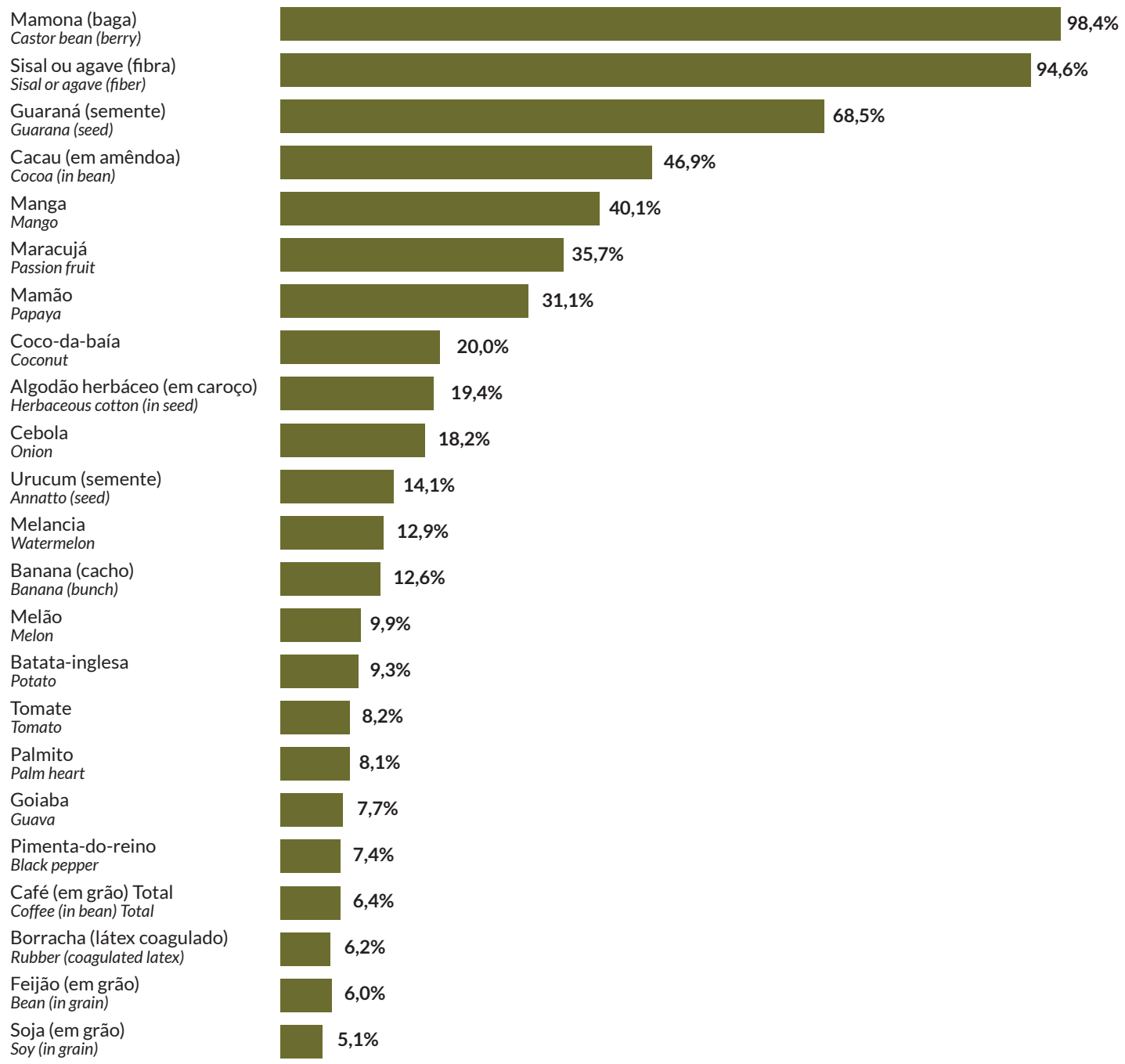
A área total plantada com culturas temporárias e permanentes na Bahia em 2023 foi de 4.590.189 ha [4], o que corresponde a, aproximadamente, 8,13% do território estadual. Deste total, a área efetivamente colhida foi de cerca de 4,5 milhões de ha. As principais culturas em extensão são a soja, com 1.923.627 ha, seguida

Tabela 5.1 Número de estabelecimentos agropecuários do Estado da Bahia registrados no Censo Agropecuário de 2017.
Table 5.1 *Number of agricultural establishments in the State of Bahia registered in the 2017 Agricultural Census.*

Área (ha) *Area (ha)*	Total	Produção de lavouras temporárias *Production of temporary crops*	Produção de lavouras permanentes *Production of permanent crops*
0 - 1	117.617	48.141	16.384
1 - 10	349.068	111.251	73.465
10 - 100	253.539	49.067	33.635
100 - 1.000	33.422	3.142	3.673
> 1.000	3.176	742	159
Produtor sem área / *Producer without area*	6.026	1.462	264

Fonte: elaborada pelos autores a partir de [8]. / *Source: prepared by the authors based on* [8].

Figura 5.2 Produção agrícola baiana em relação a produção nacional das culturas temporárias e permanentes em 2023.
Figure 5.2 *Bahia's agricultural production relative to the national production of seasonal and permanent crops in 2023.*



Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

pelo milho (651.396 ha), cacau (425.818 ha) e feijão (325.953 ha). Outras culturas de destaque incluem o algodão herbáceo (312.521 ha), o café (122.503 ha), e a mandioca (102.902 ha). Embora em menor escala, cultivos como sisal, sorgo, cana-de-açúcar, banana e frutas tropicais como manga e coco também contribuem para a diversidade agrícola do Estado (*Figura 5.3*).

O valor bruto da produção agrícola da Bahia revela a forte dominância da soja, que totalizou R$ 17 bilhões em 2023, seguida pelo algodão herbáceo (R$ 7,3 bilhões) e pelo milho em grão (R$ 2,9 bilhões) [4]. Esses três produtos representam os principais pilares da agricultura comercial no Estado. As culturas permanentes também apresentaram relevância, com destaque para o café (R$ 2,4 bilhões), o cacau (R$ 2,4 bilhões) e a manga (R$ 1,6 bilhão). Outros produtos expressivos incluem banana (R$ 1,5 bilhão), tomate (R$ 935,9 milhões), cana-de-açúcar (R$ 776,8 milhões) e batata (R$ 730,5 milhões) (*Figura 5.4*).

Em 2024, o agronegócio representou 22,5% do Produto Interno Bruto (PIB) da Bahia, conforme dados da Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (SEI), indicando uma elevação em relação aos 21,1% registrados em 2023. Esse aumento na participação ocorreu apesar da retração real de 0,4% no setor, resultado principalmente da queda na safra de grãos provocada por condições climáticas adversas relacionadas ao fenômeno El Niño, com destaque para o milho e a soja, que sofreram reduções de 24,7% e 3,1%, respectivamente. O crescimento nominal do PIB do agronegócio baiano foi impulsionado pela valorização dos preços de produtos como laranja, café, cacau e boi gordo [10]. Nacionalmente, o PIB do agronegócio representou 23,2% da economia brasileira em 2024, um leve recuo frente aos 23,5% de 2023 [11], o que posicionou a Bahia em patamar semelhante ao contexto nacional.

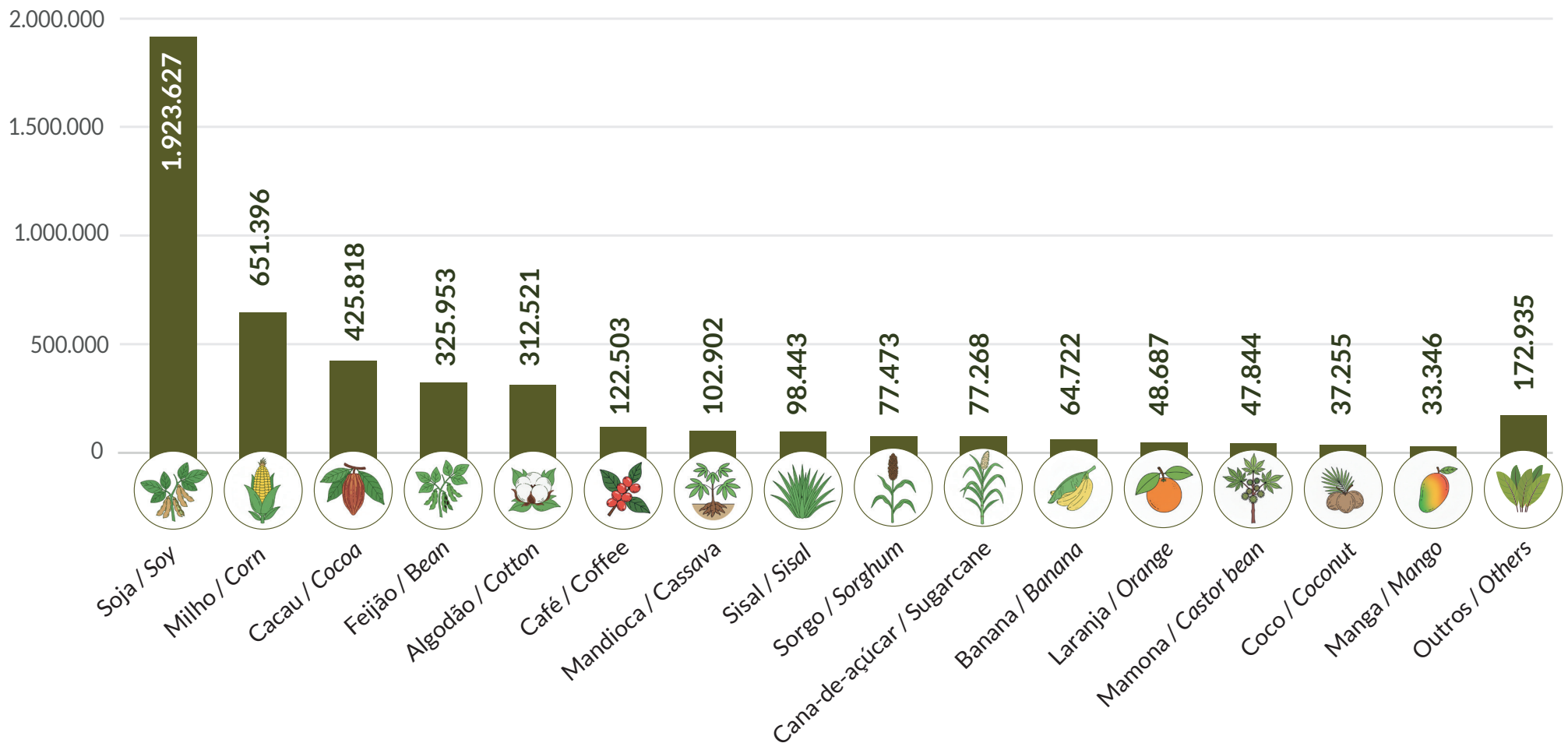
This structural diversity is also reflected in the variety of crops grown in Bahia. Soybeans, whose production has been increasing in the western region, and cotton, in which the state occupies a prominent national position, are examples of large-scale crops. Corn, essential for both human consumption and animal feed, and sugarcane, used for sugar and ethanol production, are also highly relevant. Furthermore, Bahia is a leading producer of beans, a traditional crop, and tropical fruits such as papaya, banana, and watermelon, which are highly valued in domestic and international markets. Cocoa production, especially in the southern region, and coffee, grown in several areas, complement the state's agricultural diversity [4]. Figure 5.2 illustrates Bahia's share of national production in 2023. It can be seen that, in addition to the crops already mentioned, Bahia also stands out as a major producer of castor beans, sisal, guarana, mango, passion fruit, coconut, onion, and others.

The total area planted with temporary and permanent crops in Bahia in 2023 was 4,590,189 hectares [4], which corresponds to approximately 8.13% of the state's territory. Of this total, the harvested area was approximately 4.5 million ha. The main crops in terms of area are soybeans, with 1,923,627 ha, followed by corn (651,396 ha), cocoa (425,818 ha), and beans (325,953 ha). Other notable crops include upland cotton (312,521 ha), coffee (122,503 ha), and cassava (102,902 ha). Although cultivated on a smaller scale, crops such as sisal, sorghum, sugarcane, bananas, and tropical fruits like mango and coconut also contribute to the state's agricultural diversity (Figure 5.3).

The gross value of Bahia's agricultural production highlights the strong dominance of soybeans, which totaled BRL 17 billion in 2023, followed by upland cotton (BRL 7.3 billion) and corn (BRL 2.9 billion) [4]. These three crops represent the main pillars of commercial agriculture in the state. Permanent crops also made a significant contribution, particularly coffee (BRL 2.4 billion), cocoa (BRL 2.4 billion), and mango (BRL 1.6 billion). Other significant crops include bananas (BRL 1.5 billion), tomatoes (BRL 935.9 million), sugarcane (BRL 776.8 million), and potatoes (BRL 730.5 million) (Figure 5.4).

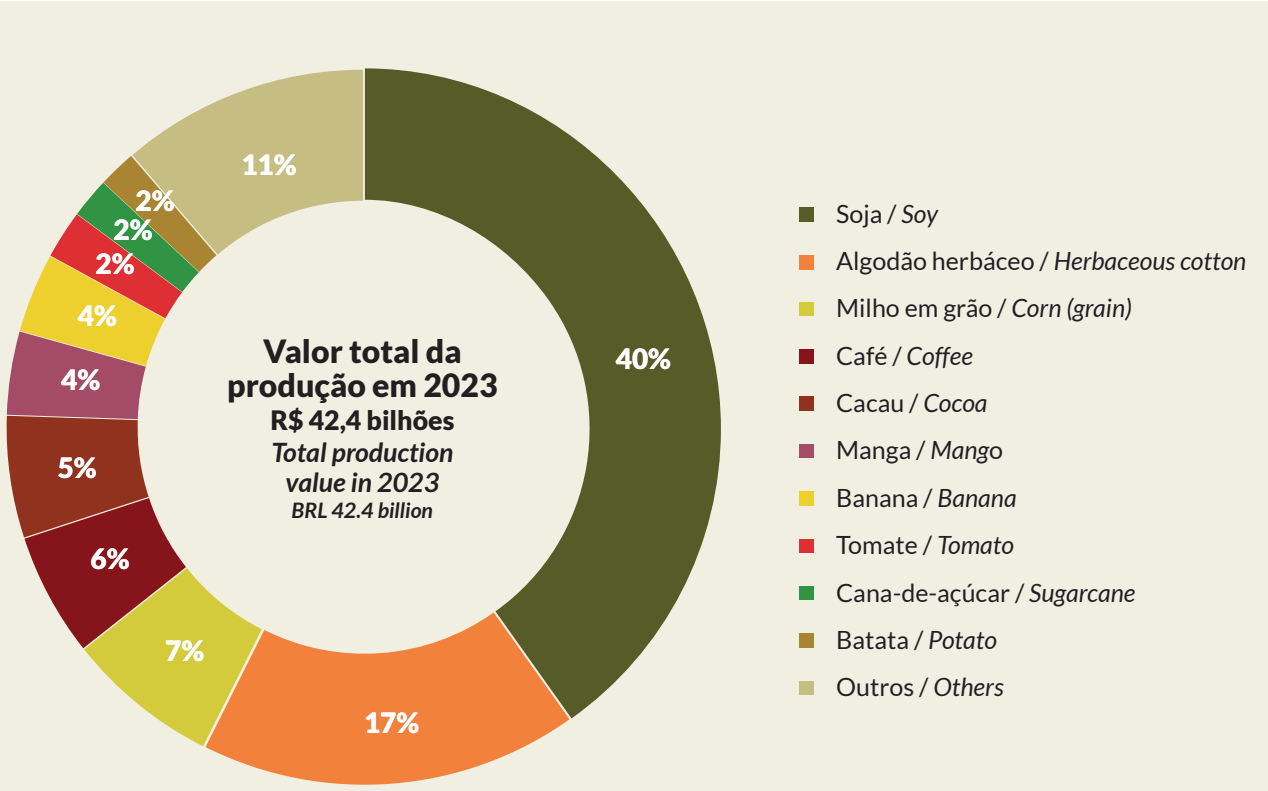
In 2024, agribusiness accounted for 22.5% of Bahia's Gross Domestic Product (GDP), according to data from the Bahia Superintendence of Economic and Social Studies (SEI), indicating an increase from the 21.1% recorded in 2023. This increase in participation occurred despite a real contraction of 0.4% in the sector, mainly due to the decline in the grain harvest caused by adverse weather conditions related to El Niño phenomenon, particularly affecting corn and soybeans, which suffered reductions of 24.7% and 3.1%, respectively. The nominal growth of Bahia's agribusiness GDP was driven by the appreciation in the prices of products such as oranges, coffee, cocoa, and beef [10]. Nationally, agribusiness GDP represented 23.2% of the Brazilian economy in 2024, a slight decline compared to 23.5% in 2023 [11], which positioned Bahia at a similar level to the national context.

Figura 5.3 Cultivo agrícola e área colhida (em ha) por culturas temporárias e permanentes no Estado da Bahia no ano de 2023.
Figure 5.3 *Agricultural cultivation and harvested area (in ha) by temporary and permanent crops in the State of Bahia in 2023.*



Fonte: Elaborada pelos autores a partir de [4]. / *Source: Prepared by the authors based on* [4].

Figura 5.4 Valor total da produção das principais culturas temporárias e definitivas no estado da Bahia em 2023.
Figure 5.4 *Total production value of the main seasonal and permanent crops in the State of Bahia in 2023.*



Fonte: Elaborada pelos autores a partir de [9]. / *Source: Prepared by the authors based on* [9].

A expressiva produção agrícola no Estado resulta na geração de grandes volumes de resíduos agrícolas, que, quando gerenciados de forma inadequada, podem trazer impactos ambientais, sociais e econômicos. Ambientalmente, o descarte incorreto de resíduos pode contaminar solos e corpos d'água, além de contribuir para o aquecimento global com a emissão de metano, proveniente da decomposição anaeróbica. A queima desses resíduos também libera poluentes que afetam a qualidade do ar e a saúde das populações locais, enquanto o acúmulo não tratado pode comprometer a biodiversidade e levar à eutrofização de corpos d'água devido ao excesso de nutrientes [1,13,12]. Social e economicamente, o desperdício de resíduos impede a implementação de uma economia circular, que poderia gerar energia, biofertilizantes e biocombustíveis. Além disso, os custos associados à poluição e à degradação ambiental podem impactar tanto os agricultores, com multas e redução da produtividade agrícola a longo prazo, quanto à saúde pública, devido à contaminação do solo, da água e do ar [2,3].

A Bahia conta com uma *Política Estadual de Resíduos Sólidos* que fomenta a recuperação e o aproveitamento energético de resíduos sólidos, incluindo os agrícolas. A *Lei Estadual nº 12.932/2014* estabelece diretrizes para a implementação da *Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS)*, promovendo o desenvolvimento de tecnologias limpas e a gestão integrada dos resíduos. Essa legislação prevê incentivos fiscais e creditícios para projetos voltados ao reaproveitamento energético, criando um ambiente favorável para a adoção de práticas mais sustentáveis [13]. Adicionalmente, o *Plano ABC+ Bahia 2020-2030* enfatiza a geração de energia renovável por pequenos produtores rurais, reforçando o apoio a iniciativas que busquem integrar sustentabilidade e aproveitamento energético nos processos agrícolas [14].

Assim, o aproveitamento energético dos resíduos agrícolas apresenta-se como uma alternativa promissora, capaz de gerar benefícios sociais, ambientais e econômicos para o Estado. A utilização de resíduos contribui para a redução da poluição e melhora a qualidade do solo, uma vez que esses materiais podem ser transformados em biofertilizantes. Além disso, a conversão de resíduos em energia reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa, mitigando os impactos das mudanças climáticas. O aproveitamento energético também fortalece a segurança energética do Estado, diversificando as fontes de energia e promovendo o uso de recursos locais de forma eficiente e sustentável [15].

Diversas tecnologias podem ser utilizadas para o aproveitamento energético de resíduos agrícolas. Cada uma delas pode ser mais ou menos adequada a depender do tipo de biomassa disponível (*Figura 5.5*).

É importante destacar que nem todos os resíduos agrícolas podem ser aproveitados energeticamente, seja devido à baixa disponibilidade em determinadas regiões, à dispersão geográfica, que dificulta a coleta e o transporte, ou à composição inadequada da biomassa para conversão energética. Além disso, fatores como custos logísticos, tecnologias não adaptadas e limitações técnicas também podem inviabilizar o uso de alguns tipos de resíduos. Esses desafios reforçam a necessidade de avaliações criteriosas

The state's significant agricultural production results in large volumes of agricultural residues, which, when improperly managed, can have environmental, social, and economic impacts. Environmentally, improper residue disposal can contaminate soil and water bodies, in addition to contributing to global warming through methane emissions from anaerobic decomposition. Burning this residue also releases pollutants that affect air quality and the health of local populations, while untreated accumulation can compromise biodiversity and lead to the eutrophication of water bodies due to excess nutrients [1,13,12]. Socially and economically, the wasting of residues hinders the implementation of a circular economy, which could generate energy, biofertilizers, and biofuels. Furthermore, the costs associated with pollution and environmental degradation can impact both farmers, by means of fines and long-term reductions in agricultural productivity, and public health, due to soil, water, and air contamination [2,3].

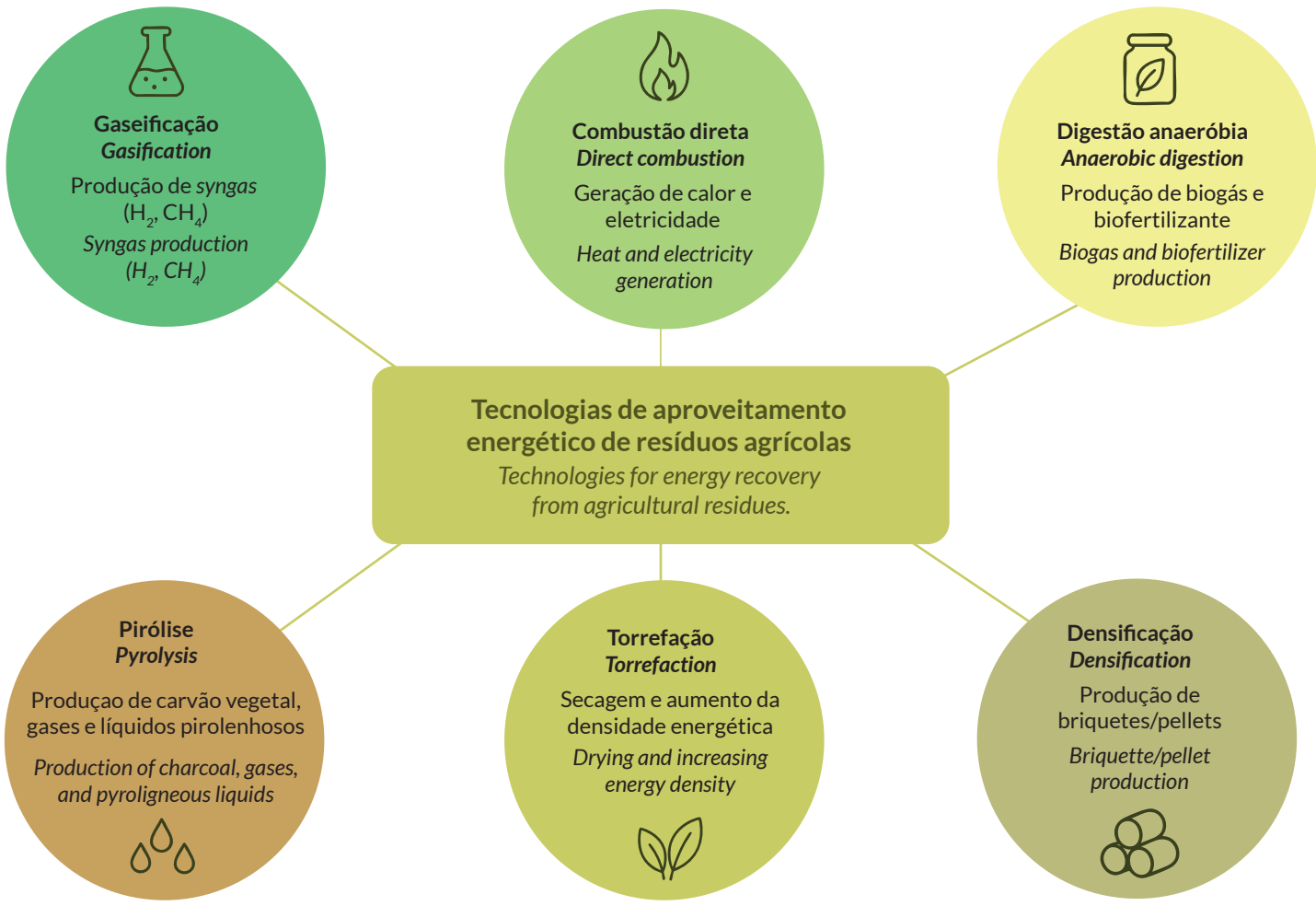
The State of Bahia has a Solid Waste Policy that promotes the recovery and energy use of solid waste, including agricultural residues. State Law Nº. 12932/2014 establishes guidelines for the implementation of the Solid Waste Management Plan (PERS-Bahia), promoting the development of clean technologies and integrated waste management. This legislation provides tax and credit incentives for projects focused on energy recovery, creating a favorable environment for the adoption of more sustainable practices [13]. Additionally, the 2020-2030 ABC+ Bahia Plan emphasizes the generation of renewable energy by small rural producers, reinforcing support for initiatives that seek to integrate sustainability and energy use into agricultural processes [14].

Thus, the energy recovery of agricultural residues presents itself as a promising alternative capable of generating social, environmental, and economic benefits for the state. The use of residues contributes to reducing pollution and improving soil quality, as these materials can be transformed into biofertilizers. In addition, converting residues into energy significantly reduces greenhouse gas emissions, mitigating the impacts of climate change. Energy recovery also strengthens the state's energy security by diversifying energy sources and promoting the efficient and sustainable use of local resources [15].

Several technologies can be used for the energy recovery of agricultural residues. Each may be more or less suitable depending on the type of biomass available (Figure 5.5).

It is important to emphasize that not all agricultural residues can be used for energy, whether due to low availability in certain regions, geographic dispersion, which hinders collection and transportation, or inadequate biomass composition for energy conversion. Furthermore, factors such as logistical costs, unsuitable technologies, and technical limitations can also make the use of some types of residues unfeasible. These challenges reinforce the need for careful assessments to identify

Figura 5.5 Principais tecnologias de aproveitamento energético de resíduos agrícolas.
Figure 5.5 *Main technologies for energy recovery from agricultural waste.*



Fonte: elaborada pelos autores com base em [3, 16, 17, 18, 19, 20]. / *Source: prepared by the authors based from* [3, 16, 17, 18, 19, 20].

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS NA BAHIA

which residues have the greatest potential for energy use and which strategies are most viable for ensuring process efficiency and sustainability [20,21].

However, some barriers hinder the energy use of these residues. The geographical dispersion of production and the difficulty in concentrating residues make the logistics of collection, transportation, and storage complex. The shortage of skilled labor and seasonal availability also limit the viability of projects. Each production scenario demands specific solutions, considering the volume of available agricultural residues, local infrastructure, appropriate technologies, and opportunities for integration with other production chains. For the technical potential estimated here to be converted into actual energy generation, investments in research, regional planning, and coordination between the agricultural, energy, and environmental sectors are necessary.

para identificar quais resíduos possuem maior potencial de aproveitamento energético e quais estratégias são mais viáveis para garantir a eficiência e sustentabilidade dos processos [20,21].

Algumas barreiras, porém, podem dificultar o aproveitamento energético desses resíduos. A dispersão geográfica das produções e a dificuldade de concentrar os resíduos tornam complexa a logística de coleta, transporte e armazenamento. A escassez de mão de obra capacitada e a sazonalidade da oferta também limitam a viabilidade de projetos. Cada realidade produtiva demanda soluções específicas, considerando o volume de resíduos disponível, a infraestrutura local, tecnologias adequadas e oportunidades de integração com outras cadeias produtivas. Para que o potencial técnico aqui estimado se converta em geração real de energia, são necessários investimentos em pesquisa, planejamento regional e articulação entre os setores agrícola, energético e ambiental.

5.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS: ABORDAGEM METODOLÓGICA E PARÂMETROS ADOTADOS

A metodologia para o cálculo do potencial energético disponível a partir de resíduos agrícolas nos municípios do Estado da Bahia pode ser dividida em três etapas (*Figura 5.6*), sendo essas o levantamento de dados, a avaliação e seleção de culturas que irão compor a análise e a determinação de premissas e cálculo do potencial energético disponível pelos resíduos.

Apesar de alguns resíduos agrícolas apresentarem características adequadas para a biodigestão, essa rota tecnológica foi excluída do escopo deste estudo devido à variabilidade nas condições ope-



Figura 5.6 Etapas metodológicas para a estimativa do potencial energético a partir de resíduos agrícolas na Bahia.
Figure 5.6 *Methodological steps for estimating the energy potential from agricultural residues in Bahia.*

1 Levantamento de dados
Data collection

Na Etapa 1 foi selecionada a base de dados para fornecimento de informações sobre a produção (número de frutos ou toneladas) e/ou área plantada de cada cultivo. Essas informações são essenciais para o cálculo da disponibilidade de resíduos de cada cultura. Para isso, foram levantados os dados de produção, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE), na base de dados da *Produção Agrícola Municipal (PAM)*, ano base 2023 [4]. O IBGE disponibiliza informações sobre a produção de setenrta diferentes culturas, abrangendo tanto cultivos de ciclo temporário quanto permanente. Segundo o levantamento, no Estado da Bahia, são produzidas 45 das 70 culturas.

In Step 1, the database containing information on the production (number of fruits or tons) and/or planted area of each crop was selected. This information is essential for calculating the residue availability for each crop. To this end, production data provided by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) through the Municipal Agricultural Production (PAM) database for the base year 2023 [4], were collected. IBGE provides production data for 70 different crops, covering both temporary and permanent ones. According to the survey, 45 of these 70 crops are produced in the State of Bahia.

2 Avaliação e seleção de culturas
Crop evaluation and selection

Após filtragens baseadas em representatividade e disponibilidade de resíduos para cada um dos 417 municípios, foram identificadas as culturas mais representativas em âmbitos estadual e municipal. Nessa etapa, catorze culturas foram selecionadas para o cálculo do potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos agrícolas. As culturas selecionadas foram algodão, banana, cacau, café, cana-de-açúcar, coco-da-baía, dendê, feijão, laranja, limão, mandioca, milho, soja e tangerina). É importante destacar que mesmo em algumas culturas em que o Estado tem destaque nacional de produção como, por exemplo, o abacate (8º), amendoim (4º), fumo (5º), guaraná (1º), pimenta-do-reino (3º), urucum (2º) etc., as produções não foram representativas para que essas culturas seguissem englobadas na análise considerando os parâmetros desta análise.

After filtering based on representativeness and residue availability for each of the 417 municipalities, the most representative crops were identified at both the state and municipal levels. In this step, 14 crops were selected to calculate the potential for electricity generation from agricultural residues. The selected crops were: cotton, banana, cocoa, coffee, sugarcane, coconut, oil palm, beans, orange, lemon, cassava, corn, soybean, and tangerine. It is important to note that even for some crops in which the state holds national relevance, such as avocado (8th), peanut (4th), tobacco (5th), guarana (1st), black pepper (3rd), and annatto (2nd), production volumes were not representative enough to be included in the analysis.

3 Definição de premissas e cálculo do potencial energético
Definition of assumptions and calculation of the energy potential

O cálculo do potencial foi baseado na queima direta de resíduos lignocelulósicos em caldeiras (ciclo Rankine), adaptando a metodologia do *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [22]. As fórmulas e métodos de cálculo utilizados, além das considerações adotadas para cada cultura, incluindo parâmetros como fator de geração de resíduos, teor de umidade e poder calorífico, estão descritas nos apêndices deste documento. Essas premissas foram definidas com base em dados secundários provenientes de fontes técnico-científicas e relatórios oficiais, sendo fundamentais para a estimativa do potencial energético dos resíduos agrícolas avaliados neste estudo. É importante destacar que, na estimativa da disponibilidade de biomassa para algumas culturas, foi considerado que parte dos resíduos agrícolas deve permanecer no campo, prática recomendada para a reciclagem de nutrientes e a manutenção da cobertura do solo. Essa estratégia contribui para a reposição de matéria orgânica, preservação da fertilidade, proteção contra erosão e melhoria das condições físicas e biológicas do solo, assegurando a sustentabilidade do sistema produtivo [1,22]. Dessa forma, para culturas como banana, milho, soja, cana-de-açúcar, feijão e mandioca, apenas uma fração dos resíduos foi contabilizada como disponível, conforme percentuais descritos nos parâmetros de cálculo apresentados no apêndice deste documento.

The potential was calculated based on the direct combustion of lignocellulosic residues in boilers (Rankine cycle), adapting the methodology from the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo [22]. The formulas and calculation methods employed, as well as the considerations adopted for each crop, including parameters such as residue generation factor, moisture content, and calorific value, are described in the appendices of this document. These assumptions were defined using secondary data from technical-scientific literature and official reports and are essential for estimating the energy potential of the agricultural residues evaluated in this study. It is important to note that, when estimating biomass availability for certain crops, it was assumed that a portion of the agricultural residues should remain in the field, a recommended practice for nutrient recycling and soil cover maintenance. This approach contributes to replenishing organic matter, preserving fertility, protecting against erosion, and improving the physical and biological conditions of the soil, thereby ensuring the sustainability of the production system [1,22]. Therefore, for crops such as banana, corn, soybean, sugarcane, bean, and cassava, only a fraction of the residues was considered available, according to the percentages described in the calculation parameters presented in the appendix of this document.

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

Tabela 5.2 Culturas analisadas para aproveitamento energético e tipos de resíduos considerados de cada cultura.
Table 5.2 *Crops analyzed for energy recovery and types of residues considered for each crop.*

Cultura *Crop*	Resíduos considerados nos cálculos *Residues considered in the calculations*
Algodão / *Cotton*	Caule e casca do caroço / *Stalks and cottonseed hulls*
Banana	Pseudocaule e folhas / *Pseudo-stem and leaves*
Cacau / *Cocoa*	Casca do fruto / *Fruit husk*
Café / *Coffee*	Casca / *Husk*
Cana-de-açúcar / ***Sugarcane***	Palha / *Straw*
Citros (laranja, limão e tangerina) / *Citrus fruits (orange, lemon and tangerine)*	Poda / *Pruning*
Coco-da-baía / *Coconut*	Casca / *Husk*
Dendê / *Oil palm*	Cacho vazio / *Empty bunch*
Feijão / *Beans*	Palha / *Straw*
Mandioca / *Cassava*	Ramas / *Stems*
Milho / *Corn*	Palha, folha, colmo, sabugo / *Straw, leaves, stalks, cobs*
Soja / *Soybean*	Palha / *Straw*

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

racionais dos biodigestores (como temperatura, tipo de substrato e tempo de retenção), o que compromete a replicabilidade de parâmetros obtidos em outras regiões e pode levar a estimativas imprecisas ou superdimensionadas quando aplicadas à realidade baiana.

Após a definição das culturas analisadas, foram identificados os principais resíduos gerados por cada uma, sendo selecionados para os cálculos de aproveitamento energético aqueles com maior representatividade em volume e maior disponibilidade de dados técnico-científicos. A *Tabela 5.2* apresenta o resumo das culturas incluídas na análise e os respectivos tipos de resíduo considerados.

O potencial energético dos resíduos agrícolas depende de diversas variáveis, incluindo a composição da biomassa, sua disponibilidade e a eficiência do processo de conversão em energia, que varia de acordo com a tecnologia utilizada. Em geral, a energia disponível pode ser calculada de acordo com a *Equação 1* (ver apêndices), que considera a quantidade de biomassa residual disponível (mres) e o percentual que pode ser aproveitado (%disp). Em algumas culturas agrícolas, por exemplo, é recomendado manter uma parte dos resíduos no solo para preservar suas propriedades e garantir sua proteção. Além disso, o cálculo também considera o Poder Calorífico Inferior (PCI) da biomassa, que é afetada pela presença de umidade quando expresso em base úmida, o que reduz a energia disponível para conversão. Por isso, é fundamental verificar o teor de umidade e garantir que tanto o PCI quanto a massa da biomassa estejam expressos na mesma base (seca ou úmida), a fim de assegurar consistência e precisão nos cálculos de potencial energético.

Por fim, a metodologia adotada neste estudo considerou a queima direta de resíduos agrícolas lignocelulósicos em caldeiras, utilizando o ciclo Rankine como base. A eficiência de conversão (η), que representa a transformação da energia térmica em elétrica, depende da tecnologia empregada e da escala da instalação. Neste estudo, foram utilizadas as premissas do *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [22]: eficiência de 15% para sistemas de pequeno porte (200 kW a 2 MW) e 30% para sistemas acima de 2 MW, com fator de capacidade de 80%, correspondente a 7.008 horas de operação por ano.

5.5 POTENCIAIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR CADEIA PRODUTIVA: RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados a seguir detalham o potencial de geração de eletricidade a partir dos principais resíduos agrícolas selecionados, considerando as características de cada cultura, os volumes disponíveis e a energia estimada em megawatts-hora (MWh). A análise permite identificar oportunidades concretas de aproveitamento energético no contexto agroindustrial da Bahia, com foco em soluções sustentáveis e alinhadas à vocação produtiva dos territórios.

5.4 ESTIMATING THE ENERGY POTENTIAL OF AGRICULTURAL RESIDUES: METHODOLOGICAL APPROACH AND PARAMETERS ADOPTED

The methodology for calculating the available energy potential from agricultural residues in municipalities in the State of Bahia can be divided into three stages (Figure 5.6): data collection, evaluation and selection of crops to be included in the analysis, and determination of assumptions and calculation of the available energy potential of the agricultural residues.

Although some agricultural residues have suitable characteristics for anaerobic digestion, this technological route was excluded from the scope of this study due to the variability in biodigester operating conditions (such as temperature, substrate type, and retention time), which compromise the replicability of parameters obtained in other regions and may lead to inaccurate or overestimated results when applied to the context of Bahia.

After defining the crops analyzed, the main residues generated by each were identified, and those with the highest volume representation and the most comprehensive technical and scientific data were selected for the energy recovery calculations. Table 5.2 presents a summary of the crops included in the analysis and their respective residues considered.

The energy potential of agricultural residues depends on several variables, including the biomass composition, its availability, and the efficiency of the energy conversion process, which varies depending on the technology used. In general, available energy can be calculated using Equation 1 (see appendices), which considers the amount of available residual biomass (mres) and the percentage that can be used (%disp). In some agricultural crops, for example, it is recommended to keep a portion of the residues in the soil to preserve their properties and ensure their protection. Furthermore, the calculation also considers the Lower Heating Value (LHV) of the biomass, which is affected by the presence of moisture when expressed on a wet basis, reducing the energy available for conversion. Therefore, it is essential to verify the moisture content and ensure that both the LHV and the biomass mass are expressed on the same basis (dry or wet) to ensure consistency and accuracy in energy potential calculations.

Finally, the methodology adopted in this study considered the direct combustion of lignocellulosic agricultural residues in boilers, using the Rankine cycle as a basis. The conversion efficiency (η), which represents the transformation of thermal energy into electrical energy, depends on the technology employed and the scale of the installation. In this study, the assumptions of the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (22) were used: 15% efficiency for small systems (200 kW to 2 MW) and 30% for systems above 2 MW, with a capacity factor of 80%, corresponding to 7,008 hours of operation per year.

5.5 ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL BY PRODUCTION CHAIN: RESULTS AND ANALYSIS

The following results detail the electricity generation potential from the main agricultural residues selected, considering the characteristics of each crop, available volumes, and estimated energy in megawatt-hours (MWh). The analysis identifies concrete opportunities for energy use in Bahia's agro-industrial context, focusing on sustainable solutions aligned with the productive vocation of the territories.

5.5.1 RESIDUAL BIOMASS FROM COTTON CULTIVATION AND PROCESSING AS A SOURCE OF ELECTRICAL ENERGY

Cotton cultivation plays a strategic role in Brazilian agriculture, especially in the State of Bahia, where it stands out as one of the main crops in terms of planted area, productivity, and value generation. In 2023, Bahia harvested 312,500 hectares of cotton, totaling a production of 1.45 million t and achieving an average yield of 4.6 t/ha, with particular emphasis on the municipality of São Desidério and the entire western region of the state [9]. National performance is also impressive: in 2024, Brazil established itself as the world's largest cotton exporter, surpassing the United States, a target initially planned for 2030 [23].

The cotton production chain, however, is not limited to fiber production. During the agricultural and industrial stages, large amounts of residues are generated, including stalks left in the field after harvest and processing byproducts, such as cottonseed hulls. It is estimated that, globally, the annual production of 25 million t of fiber results in approximately 50 million t of biomass residue [24]. In the specific case of cottonseed hulls, it is a fibrous, porous, and low-density material traditionally used as animal feed, but it also has high energy potential due to its fixed carbon content and calorific value [24,25].

In Bahia, this potential is particularly significant when considering the growth of cotton production and the logistical challenges associated with the storage and transportation of this residue. Compacting these residues into briquettes, for example, has proven to be a viable alternative for facilitating the handling and energy recovery of residual biomass [26]. Furthermore, the energy use of cotton husks can be strategically integrated into the industrial process itself, such as in boilers or dryers, replacing fossil fuels such as fuel oil and contributing to the energy transition.

In the field, residual biomass, such as stalks, can represent up to the same mass as the harvested cotton, although not all of the material is available for energy use, as part of it is used to control pests, such as the boll weevil [27], or is subject to sanitary restrictions for direct use on farms [24]. Even so, strategies such as composting, gasification, anaerobic digestion, and direct combustion have been explored as ways to add value to this residue and minimize environmental impacts. Also considering the context of Bahia, marked by a strong cotton industry, significant availability of residual biomass, and growing demand for sustainable energy sources, the study of the energy use of cotton residues becomes not only timely, but necessary.

The estimate indicates a total potential for electricity generation from cotton agricultural residue in Bahia of 1,801.5 GWh per year, considering both the stalks from the harvest (966.9 GWh) and the residues from processing, especially the seed husk (1,104.6 GWh). A strong territorial concentration is observed: approximately 98.6% of the total potential is concentrated in just ten municipalities (Table 5.3).

It can be seen that most of the identified energy potential is concentrated in the Western Region of Bahia (Figure 5.5), which may indicate the feasibility of forming regional hubs for generating electricity from residues from the cotton production chain. The geographic clustering of these municipalities favors logistical optimization by reducing the costs and complexity associated with the collection, transportation, and processing of residual biomass.

Given the significant territorial concentration of cotton production and the high availability of residual biomass, Bahia's cotton production chain provides favorable conditions for developing regional electricity generation systems based on agricultural residues. Energy recovery from cotton stalks and cottonseed hulls can add value to production, reduce operating costs, and contribute to the sector's environmental sustainability, especially in regions like western Bahia, which already have a well-established agro-industrial infrastructure. These results reinforce cotton's potential not only as an agricultural commodity but also as a strategic driver in the state's energy transition.

5.5.1 BIOMASSA RESIDUAL DA CULTURA E BENEFICIAMENTO DO ALGODÃO COMO FONTE DE ENERGIA ELÉTRICA

O cultivo do algodão desempenha um papel estratégico na agricultura brasileira, especialmente no Estado da Bahia, onde se destaca como uma das principais culturas em termos de área plantada, produtividade e geração de valor. Em 2023, a Bahia colheu 312,5 mil ha de algodão, totalizando uma produção de 1,45 milhão de t e alcançando um rendimento médio de 4,6 t/ha, com destaque para o município de São Desidério e toda a Região Oeste do Estado [9]. O desempenho nacional também é expressivo: o Brasil se consolidou em 2024 como o maior exportador mundial de algodão, superando os Estados Unidos, meta que inicialmente estava prevista apenas para 2030 [23].

A cadeia produtiva do algodão, no entanto, não se limita à produção da fibra. Durante as etapas agrícolas e industriais, são geradas grandes quantidades de resíduos, entre os quais se destacam os caules deixados no campo após a colheita e os subprodutos do beneficiamento, como a casca do caroço de algodão. Estima-se que, globalmente, a produção anual de 25 milhões de t de fibra resulte em cerca de 50 milhões de t de resíduos de biomassa [24]. Já no caso específico da casca de algodão, trata-se de um material fibroso, poroso e de baixa densidade, tradicionalmente utilizado como ração animal, mas que também apresenta elevado potencial energético devido ao seu conteúdo de carbono fixo e poder calorífico [24,25].

Na Bahia, esse potencial é particularmente relevante, quando considerado o crescimento da produção algodoeira e os desafios logísticos associados ao armazenamento e transporte desses resíduos. A compactação em briquetes, por exemplo, tem se mostrado uma alternativa viável para facilitar o manuseio e valorizar energeticamente a biomassa residual [26]. Além disso, o aproveitamento energético da casca de algodão pode ser estrategicamente integrado ao próprio processo industrial, como no uso em caldeiras ou secadores, substituindo fontes fósseis como o óleo combustível e contribuindo para a transição energética.

No campo, a biomassa residual, como os caules, pode representar até a mesma massa da parte colhida, embora nem todo o material esteja disponível para aproveitamento energético, uma vez que parte é utilizada para controle de pragas, como o bicudo [27], ou apresenta restrições sanitárias para uso direto nas fazendas [24]. Mesmo assim, estratégias como compostagem, gaseificação, digestão anaeróbica e queima direta vêm sendo exploradas como formas de agregar valor a esses resíduos e minimizar impactos ambientais. Ainda considerando o contexto baiano, marcado por forte presença da cotonicultura, disponibilidade significativa de biomassa residual e crescente demanda por fontes energéticas sustentáveis, o estudo do aproveitamento energético dos resíduos do algodão torna-se não apenas oportuno, mas necessário.

A estimativa aponta um potencial total energia elétrica disponível a partir dos resíduos do algodão na Bahia de 1.801,5 GWh por ano, considerando tanto os caules provenientes da colheita (966,9 GWh) quanto os resíduos do beneficiamento, especialmente a casca do caroço (1.104,6 GWh). Observa-se uma forte concentração territorial: cerca de 98,6% do potencial total está concentrado em apenas dez municípios (*Tabela 5.3*).

Observa-se que a maior parte do potencial energético identificado está concentrada na Região Oeste da Bahia (*Figura 5.5*), o que pode indicar viabilidade de formação de polos regionais para geração de energia elétrica a partir dos resíduos da cadeia produtiva do algodão. O agrupamento geográfico desses municípios favorece a otimização logística, ao reduzir os custos e a complexidade associados à coleta, transporte e processamento da biomassa residual.

Diante da expressiva concentração territorial da produção de algodão e da elevada disponibilidade de biomassa residual, a cadeia produtiva da cotonicultura baiana apresenta condições favoráveis para a implantação de sistemas regionais de geração elétrica a partir de resíduos. A valorização energética dos caules e da casca do caroço pode agregar valor à produção, reduzir custos operacionais e contribuir para a sustentabilidade ambiental do setor, especialmente em regiões como o Oeste baiano, que já contam com infraestrutura agroindustrial consolidada. Esses resultados reforçam o potencial do algodão não apenas como *commodity* agrícola, mas também como vetor estratégico na transição energética do Estado.

Tabela 5.3 Dez municípios com maior potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos agrícolas da colheita do algodoeiro.
Table 5.3 *Ten municipalities with the highest electricity generation potential from cotton harvest agricultural residues.*

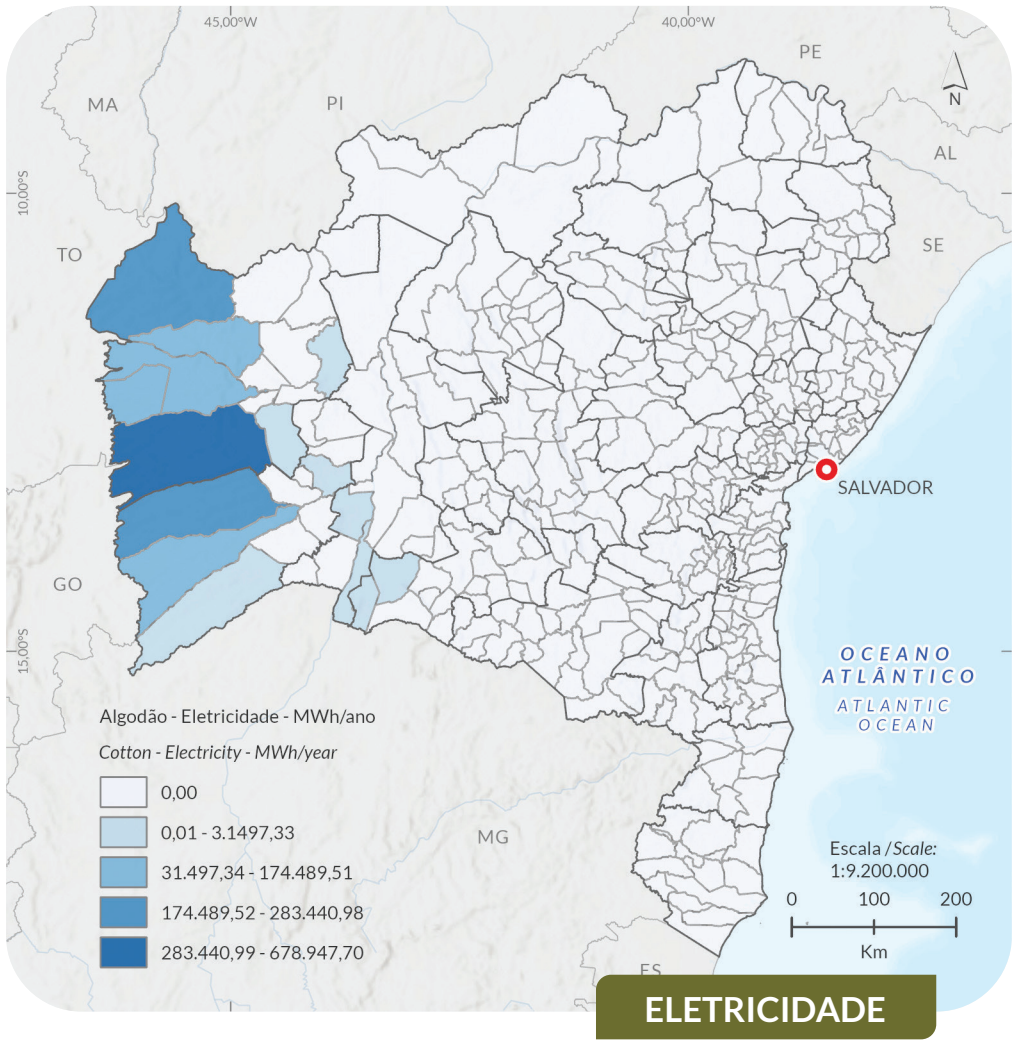
Munícipio *Municipality*	Algodão produzido (t/ano) *Cotton produced (t/year)*	Casca do caroço (t/ano) *Cottonseed hulls (t/year)*	Caules (t/ano) *Stalks (t/year)*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*
Total	**1.452.841,00**	**871.704,60**	**581.136,40**	**1.801.489,35**
Total 10+	**1.424.902,00**	**854.941,20**	**569.960,80**	**1.777.979,18**
São Desidério	543.506,00	326.103,60	217.402,40	678.947,70
Formosa do Rio Preto	226.898,00	136.138,80	90.759,20	283.440,98
Correntina	189.121,00	113.472,60	75.648,40	236.249,95
Riachão das Neves	139.681,00	83.808,60	55.872,40	174.489,51
Barreiras	116.429,00	69.857,40	46.571,60	145.443,11
Jaborandi	80.992,00	48.595,20	32.396,80	101.175,21
Luís Eduardo Magalhães	79.015,00	47.409,00	31.606,00	98.705,54
Cocos	25.214,00	15.128,40	10.085,60	31.497,33
Baianópolis	15.781,00	9.468,60	6.312,40	19.713,63
Malhada	8.265,00	4.959,00	3.306,00	8.316,24

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

Mapa 5.1 / *Map 5.1*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS DA COLHEITA DO ALGODOEIRO (MWh/ANO)

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM COTTON HARVEST AGRICULTURAL RESIDUES (MWh/YEAR)



Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

ELETRICIDADE

ELECTRICITY

Figura 5.7 Colheitadeiras em operação durante a colheita do algodão.
Figure 5.7 *Harvesters operating during cotton harvest.*



Foto / *Photo:* Casa.da.Photo / stock.adobe.com

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS NA BAHIA

5.5.2 BANANA CULTIVATION AND ITS RESIDUES: ENERGY FROM PSEUDO-STEMS AND LEAVES

In 2023, Bahia emerged as the 2nd largest banana producer in Brazil, with a production of 862,500 t, corresponding to 12.63% of the national total. This amount was harvested from 64,700 hectares, resulting in an average yield of 13.32 t/ha [9]. During harvest, only the fruits are used, while the pseudo-stems, leaves, and portions of the fruits that do not meet quality standards are discarded. This residue generally remains in the field, helping to maintain moisture and replenish nutrients in the soil. However, alternative reuse options are being studied, such as the production of animal feed, briquettes [28], bioethanol and biogas [29].

Reusing this residue for biogas production is feasible, but requires pretreatments such as shredding, composting, or chemical degradation, which aid in the degradation of the biomass. However, depending on the type of pretreatment adopted, there may be an increase in the formation of hydrogen sulfide (H_2S), a highly toxic compound, even at low concentrations [29,30]. This requires an additional step in the process: biogas desulfurization. Implementing this step can represent a significant cost, especially in smaller-scale units. Therefore, thermoelectric recovery was considered.

The results indicate that the State of Bahia has a total electricity generation capacity from banana harvest residues of 283.3 GWh/year. Of this total, the ten municipalities with the greatest electricity production potential together account for 187.9 GWh, equivalent to 66% of the state's available capacity (Table 5.4).

Among the municipalities with the largest banana production, Bom Jesus da Lapa, located in the western part of the state, stands out, besides leading the state's harvest volume, it also boasts one of the largest electricity generation potentials, totaling 70 GWh/year. The municipality is part of the Formoso Project's irrigated production hub, whose infrastructure enables high productivity and plays a strategic role in generating jobs and income for the local population. Fruit growing is central to the region's economy, operated by small, medium, and large producers. Other municipalities, such as Barreiras, have distinguished themselves by their intensive use of technologies in crop management, such as digital systems with artificial intelligence and QR-code tracking on each plant, enabling real-time monitoring of agronomic and phytosanitary variables. This combination of productive tradition, irrigation infrastructure, and technological innovation strengthens the banana chain in the state, expanding not only its economic impact but also the potential for energy use of its residue [31].

Bahia proactively prevents diseases that threaten agricultural production, particularly in combating Fusarium Wilt Tropical Race 4 (R4T), one of the most severe threats to banana cultivation globally. Caused by the fungus Fusarium oxysporum f. sp. Cubense, this disease attacks the plant's vascular system, leading to progressive wilting and death. Its main characteristic is that it is difficult to eradicate once it is established in the soil. Although there are no records of the pest in the state, State authorities maintain a rigorous surveillance system [32]. Maintaining plant health in Bahia's banana plantations is therefore strategic not only for the continuity of production and income generation, but also for ensuring the availability of agricultural residues suitable for energy use. In this sense, phytosanitary surveillance contributes indirectly but significantly to the sustainability of the production chain and the development of biomass-based energy transition solutions.

5.5.2 A CULTURA DA BANANA E SEUS RESÍDUOS: ENERGIA A PARTIR DO PSEUDOCAULE E DAS FOLHAS

Em 2023, a Bahia se destacou como o 2º maior produtor de banana do Brasil, com uma produção de 862,5 mil t, o que corresponde a 12,63% do total nacional. Essa quantidade foi colhida em 64,7 mil ha, resultando em um rendimento médio de 13,32 t por ha [9]. Durante a colheita, apenas os frutos são aproveitados, enquanto o pseudocaule, as folhas e parte dos frutos que não atendem aos padrões de qualidade, são descartados. Esses resíduos geralmente permanecem no campo, contribuindo para a manutenção da umidade e a reposição de nutrientes no solo. No entanto, alternativas de reaproveitamento vêm sendo estudadas, como a produção de ração animal, briquetes [28], bioetanol e biogás [29].

O aproveitamento desses resíduos para a produção de biogás é viável, mas requer pré-tratamentos como trituração, compostagem ou degradação química, que auxiliam na degradação da biomassa. No entanto, dependendo do tipo de pré-tratamento adotado, pode haver aumento na formação de sulfeto de hidrogênio (H_2S), um composto altamente tóxico, mesmo em baixas concentrações [29,30]. Isso exige uma etapa adicional no processo: a dessulfurização do biogás. A implementação dessa etapa pode representar um custo significativo, especialmente em unidades de menor escala. Dessa forma, o aproveitamento termelétrico foi considerado.

Os resultados indicam que o Estado da Bahia possui um potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita da banana no total de 283,3 GWh/ano. Desse total, os dez municípios com maior potencial de produção de energia elétrica concentram juntos 187,9 GWh, o equivalente a 66% da capacidade disponível no estado (*Tabela 5.4*).

Entre os municípios baianos de maior expressão na produção de banana, destaca-se Bom Jesus da Lapa, situado no Oeste do Estado, que, além de liderar o volume estadual colhido, possui um dos maiores potenciais de geração de eletricidade, totalizando 70 GWh/ano. O município integra o polo produtivo irrigado do Projeto Formoso, cuja estrutura viabiliza elevadas produtividades e desempenha papel estratégico na geração de emprego e renda para a população local. A fruticultura é central para a economia da região, sendo conduzida por pequenos, médios e grandes produtores. Outros municípios, como Barreiras, têm se destacado pelo uso intensivo de tecnologias no manejo da cultura, como sistemas digitais com inteligência artificial e rastreamento por *QR Code* em cada planta, permitindo monitoramento em tempo real de variáveis agronômicas e fitossanitárias. Essa combinação entre tradição produtiva, estrutura de irrigação e inovação tecnológica fortalece a cadeia da banana no estado, ampliando não apenas seu impacto econômico, mas também o potencial de aproveitamento energético de seus resíduos [31].

A Bahia atua de forma proativa na prevenção de doenças que ameaçam a produção agrícola, com destaque para o combate à Fusariose Raça 4 Tropical (R4T), uma das mais severas ameaças à cultura da banana em nível global. Causada pelo fungo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, essa doença ataca o sistema vascular da planta, levando ao murchamento progressivo e à morte, e sua principal característica é a dificuldade de erradicação uma vez estabelecida no solo. Embora não haja registros da praga no estado, as autoridades baianas mantêm um sistema de vigilância rigoroso [32]. A manutenção da sanidade vegetal nos bananais da Bahia é, portanto, estratégica não apenas para a continuidade da produção e da geração de renda, mas também para assegurar a disponibilidade de resíduos agrícolas passíveis de aproveitamento energético. Nesse sentido, a vigilância fitossanitária contribui de forma indireta, mas significativa, para a sustentabilidade da cadeia produtiva e para o desenvolvimento de soluções de transição energética baseadas na biomassa.

Tabela 5.4 Dez municípios com maior potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos do cultivo da banana (pseudocaule e folhas)
Table 5.4 *Ten municipalities with the highest electricity generation potential from banana cultivation residues (pseudo-stem and leaves).*

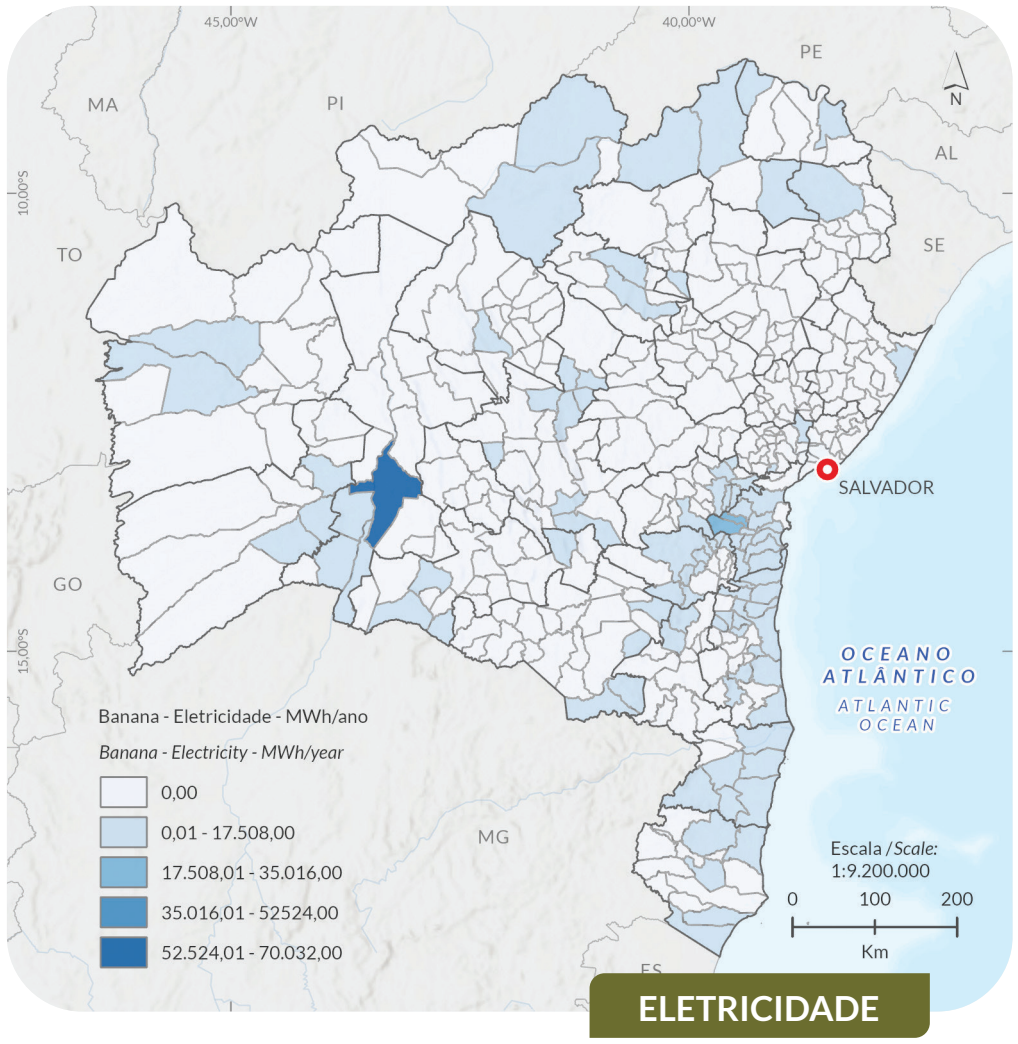
Munícipio *Municipality*	Banana produzida (t/ano) *Banana produced (t/year)*	Resíduo (t/ano) *Residue (t/year)*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*
Total	**862.568,00**	**300.173,66**	**283.256,65**
Total 10+	**449.654,00**	**156.479,59**	**187.888,82**
Bom Jesus da Lapa	167.600,00	58.324,80	70.032,00
Wenceslau Guimarães	52.687,00	18.335,08	22.015,37
Teolândia	44.561,00	15.507,23	18.619,90
Presidente Tancredo Neves	36.000,00	12.528,00	15.042,67
Juazeiro	32.466,00	11.298,17	13.565,98
Curaçá	28.048,00	9.760,70	11.719,91
Valença	24.453,00	8.509,64	10.217,73
Ibipeba	23.809,00	8.285,53	9.948,64
Riachão das Neves	23.620,00	8.219,76	9.869,66
Canudos	16.410,00	5.710,68	6.856,95

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

Mapa 5.2 / *Map 5.2*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS DA COLHEITA DA BANANA (MWh/ANO)

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM BANANA HARVEST AGRICULTURAL RESIDUES (MWh/YEAR)



Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

ELETRICIDADE

ELECTRICITY

Figura 5.8 Plantação comercial de banana no Brasil.
Figure 5.8 *Commercial banana plantation in Brazil.*



Foto / *Photo:* Pulsar Imagens / stock.adobe.com

5.5.3 COCOA HUSKS AS AN ENERGY INPUT: VALORIZATION OF PROCESSING RESIDUE

Currently, Brazil is the 6th largest cocoa producer in the world, accounting for 46.9% of national production in 2023. In that year, the estimated production value reached BRL 2,356,369,000, with a total volume of 139,011 t harvested from an area of 425,818 hectares, resulting in an average yield of 326 kg/ha [9].

The husk accounts for 75% of the cocoa fruit and is discarded during the processing stage. However, it can be reused in several ways: in the manufacture of briquettes for heat or electricity generation [34], in animal feed, in the production of biochar to improve soil quality, or even by direct combustion to produce electricity [35].

The estimates presented indicate that, by fully utilizing the cocoa husks resulting from the processing of the beans, the state has the technical potential to generate approximately 38,690 MWh/year of electricity from approximately 48,500 t of dry residue. This value assumes the utilization of 100% of the volume of residue generated during cocoa processing (Table 5.5).

The ten municipalities with the greatest potential together account for more than half of the total residue production and represent approximately 21,025 MWh/year, or approximately 54% of the state's estimated electricity. Among these municipalities, Ilhéus, Wenceslau Guimarães, and Ibirapitanga stand out, which together represent more than 13,000 MWh/year of generation potential, equivalent to 33% of the state's total.

5.5.3 CASCA DO CACAU COMO INSUMO ENERGÉTICO: VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO

Atualmente, o Brasil é o 6º maior produtor de cacau do mundo, sendo responsável por 46,9% da produção nacional em 2023. Nesse ano, o valor estimado da produção atingiu R$ 2.356.369.000, com um volume total de 139.011 t colhidas em uma área de 425.818 ha, resultando em um rendimento médio de 326 kg por ha [9].

A casca corresponde por 75% do fruto do cacau, e na etapa do beneficiamento é descartada. No entanto, pode ser reaproveitada de diversas formas: na fabricação de briquetes para geração de calor ou eletricidade [34], na alimentação animal, na produção de *biochar* para melhorar a qualidade do solo, ou ainda na queima direta para produção de energia elétrica [35].

As estimativas apresentadas indicam que, ao se aproveitar integralmente as cascas do cacau resultantes do processamento das amêndoas, o estado possui um potencial técnico de geração de, aproximadamente, 38.690 MWh/ano de energia elétrica, a partir de cerca de 48,5 mil t de resíduo seco. Esse valor considera o aproveitamento de 100% do volume de resíduos gerados no processamento do cacau (*Tabela 5.5*).

Os dez municípios com maior potencial concentram juntos mais da metade da produção total de resíduos e respondem por cerca de 21.025 MWh/ano, ou seja, aproximadamente, 54% da energia elétrica estimada para o Estado. Entre eles, destacam-se Ilhéus, Wenceslau Guimarães e Ibirapitanga, os quais, juntos, representam mais de 13 mil MWh/ano de potencial de geração, o equivalente a 33% do total estadual.

5.5.4 A CAFEICULTURA COMO VETOR ENERGÉTICO: VALORIZAÇÃO DA CASCA NO EXTREMO SUL

Os resíduos da cafeicultura representam uma promissora fonte de aproveitamento energético sustentável. Esses subprodutos podem ser utilizados na produção de biocombustíveis, biofertilizantes, briquetes e na geração de calor para a secagem dos grãos, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e das emissões de gases de efeito estufa. Além dos benefícios ambientais, o reaproveitamento desses materiais pode diversificar a renda dos produtores, fortalecendo a sustentabilidade econômica da atividade cafeeira.

Em 2023, a Bahia foi responsável por 6,8% da produção nacional de café. O Estado produziu 232.497 t, distribuídas por 122.503 ha, com um rendimento médio de 1.898 kg por ha e um valor total da produção de café na Bahia foi estimado em R$ 2,38 bilhões [9]. A produção está presente em diversas regiões baianas, com destaque para o município de Itamaraju, maior produtor estadual no ano, que alcançou 26.800 t. A atividade está concentrada principalmente nos territórios de identidade do Extremo Sul, Litoral Sul, Vitória

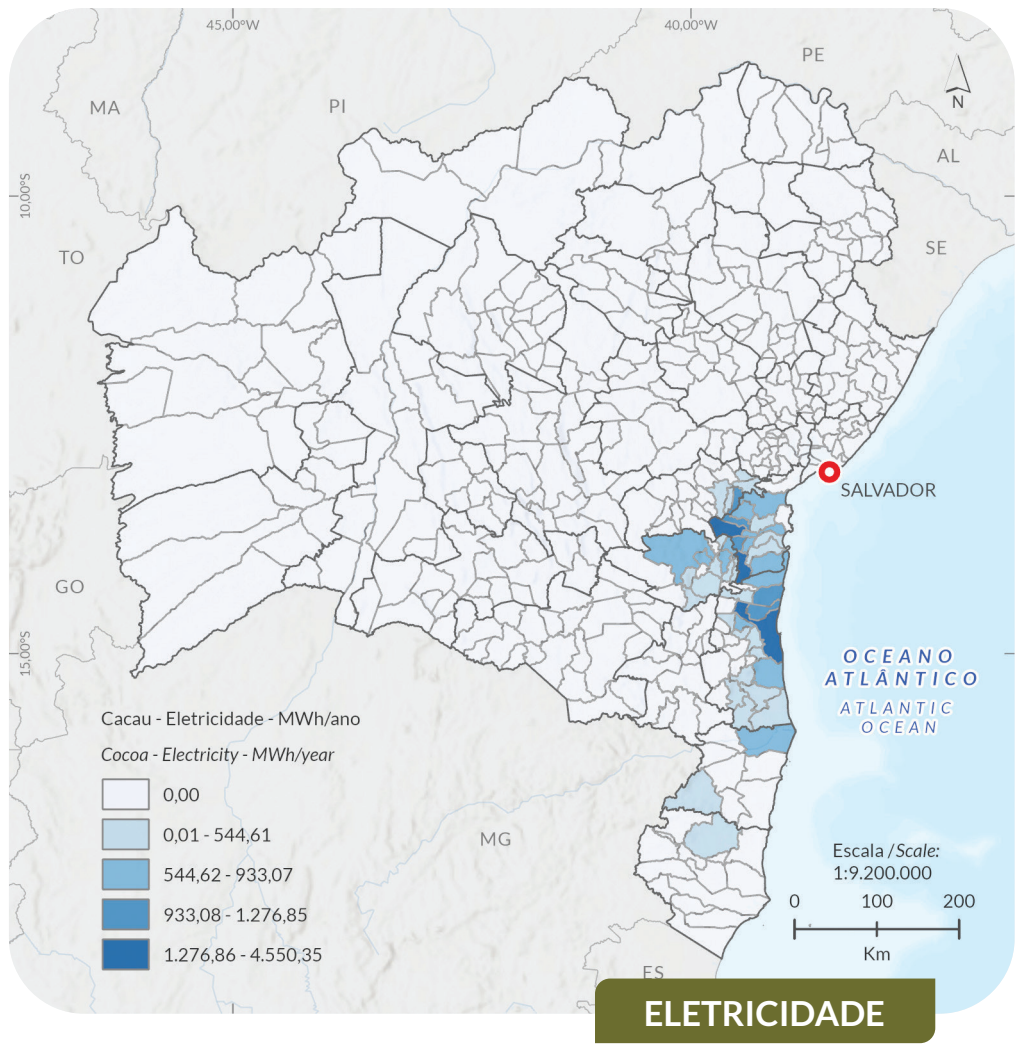
Tabela 5.5 Dez municípios com maior potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos do fruto do cacau (cascas).
Table 5.5 *Ten municipalities with the highest electricity generation potential from cocoa fruit residues (husks).*

Munícipio *Municipality*	Cacau (em amêndoa) produzido (t/ano) *Total cocoa (beans) produced (t/year)*	Resíduo seco (t/ano) *Dry residue (t/year)*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*
Total	**139.011,00**	**48.514,84**	**38.689,66**
Total 10+	**56.420,00**	**19.690,58**	**21.025,51**
Ilhéus	8.961,00	3.127,39	4.550,35
Wenceslau Guimarães	8.775,00	3.062,48	4.455,90
Ibirapitanga	8.655,00	3.020,60	4.394,97
Gandu	5.029,00	1.755,12	1.276,85
Teolândia	5.003,00	1.746,05	1.270,25
Uruçuca	4.639,00	1.619,01	1.177,83
Itacaré	4.231,00	1.476,62	1.074,24
Mutuípe	4.002,00	1.396,70	1.016,10
Camamu	3.675,00	1.282,58	933,07
Valença	3.450,00	1.204,05	875,95

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

Mapa 5.3 / *Map 5.3*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DOS RESÍDUOS DO FRUTO DO CACAU (CASCAS) (MWh/ANO)
GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM COCOA FRUIT RESIDUES (HUSKS) (MWh/YEAR)



da Conquista, Vale do Jiquiriçá, Chapada Diamantina e Bacia do Rio Grande. Entre os municípios com maior volume de produção destacam-se (além de Itamaraju) Porto Seguro, Prado, Eunápolis e Teixeira de Freitas, todos localizados no Extremo Sul baiano.

Quanto à estimativa de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento das cascas de café, estima-se que a Bahia possua um potencial total de, aproximadamente, 79.662 MWh por ano, gerados a partir das mais de 100 mil t de resíduos (casca). Os dez municípios com maior volume de produção concentram juntos 66.888 t de casca de café, correspondendo a 65.096 MWh/ano, ou cerca de 82% do potencial energético total do Estado (*Tabela 5.6*).

Entre os principais destaques estão Itamaraju (12.315 MWh/ano), Prado (10.807 MWh/ano), Barra da Estiva (8.067 MWh/ano) e Porto Seguro (7.896 MWh/ano). A forte concentração produtiva nos municípios do Extremo Sul e da Chapada Diamantina indica regiões estratégicas para a implementação de iniciativas de valorização energética dos resíduos da cafeicultura.

A expressiva produção de café na Bahia, concentrada em regiões como o Extremo Sul e a Chapada Diamantina, gera volumes significativos de casca no beneficiamento, com potencial para uso energético. A valorização desse resíduo contribui para agregar valor à cadeia cafeeira, especialmente em territórios com presença marcante da agricultura familiar, ampliando oportunidades de renda e uso eficiente dos recursos. Além disso, o aproveitamento energético da casca favorece a descentralização da geração elétrica e a diversificação da matriz estadual, alinhando sustentabilidade produtiva e segurança energética regional.

Tabela 5.6 Dez municípios com maior potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos da cultura do café (cascas).
Table 5.6 *Ten municipalities with the highest electricity generation potential from coffee cultivation residues (husks).*

Munícipio *Municipality*	Café produzido (t/ano) *Coffee produced (t/year)*	Resíduo casca (t/ano) *Husk residue (t/year)*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*
Total	**232.497,00**	**100.554,95**	**79.661,93**
Total 10+	**154.654,00**	**66.887,86**	**65.095,82**
Itamaraju	26.865,00	11.619,11	12.315,10
Prado	23.576,00	10.196,62	10.807,40
Barra da Estiva	17.598,00	7.611,14	8.067,04
Porto Seguro	17.224,00	7.449,38	7.895,60
Barra do Choça	15.360,00	6.643,20	7.041,13
Itabela	14.952,00	6.466,74	6.854,10
Eunápolis	13.780,00	5.959,85	6.316,85
Barreiras	8.568,00	3.705,66	1.963,81
Ibicoara	8.540,00	3.693,55	1.957,40
Teixeira de Freitas	8.191,00	3.542,61	1.877,40

Fonte: Elaborado pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

5.5.4 COFFEE FARMING AS AN ENERGY SOURCE: HUSK VALORIZATION IN THE EXTREMO SUL

Coffee farming residues represent a promising source of sustainable energy. These byproducts can be used to produce biofuels, biofertilizers, briquettes, and to generate heat for drying beans, contributing to reducing dependence on fossil fuels and greenhouse gas emissions. In addition to the environmental benefits, reusing these materials can diversify producers' incomes, strengthening the economic sustainability of coffee farming.

In 2023, Bahia accounted for 6.8% of national coffee production. The state produced 232,497 t, spread over 122,503 hectares, with an average yield of 1,898 kg/ha, and the total value of coffee production in Bahia was estimated at BRL 2.38 billion [9]. Production is present in several regions of Bahia, notably the municipality of Itamaraju, the largest state producer that year, reaching 26,800 t. Activity is concentrated mainly in the Identity Territories of the Extremo Sul, Litoral Sul, Vitória da Conquista, Vale do Jiquiriçá, Chapada Diamantina, and the Bacia do Rio Grande. Among the municipalities with the highest production volume are (in addition to Itamaraju) Porto Seguro, Prado, Eunápolis, and Teixeira de Freitas, all located in the Extremo Sul Identity Territory of Bahia.

Regarding the estimated electricity generation from the use of coffee husks, Bahia is estimated to have a total potential of approximately 79,662 MWh per year, generated from more than 100,000 t of residues (husks). The ten municipalities with the largest production volume together concentrate 66,888 t of coffee husks, corresponding to 65,096 MWh/year, or approximately 82% of the state's total energy potential (Table 5.6).

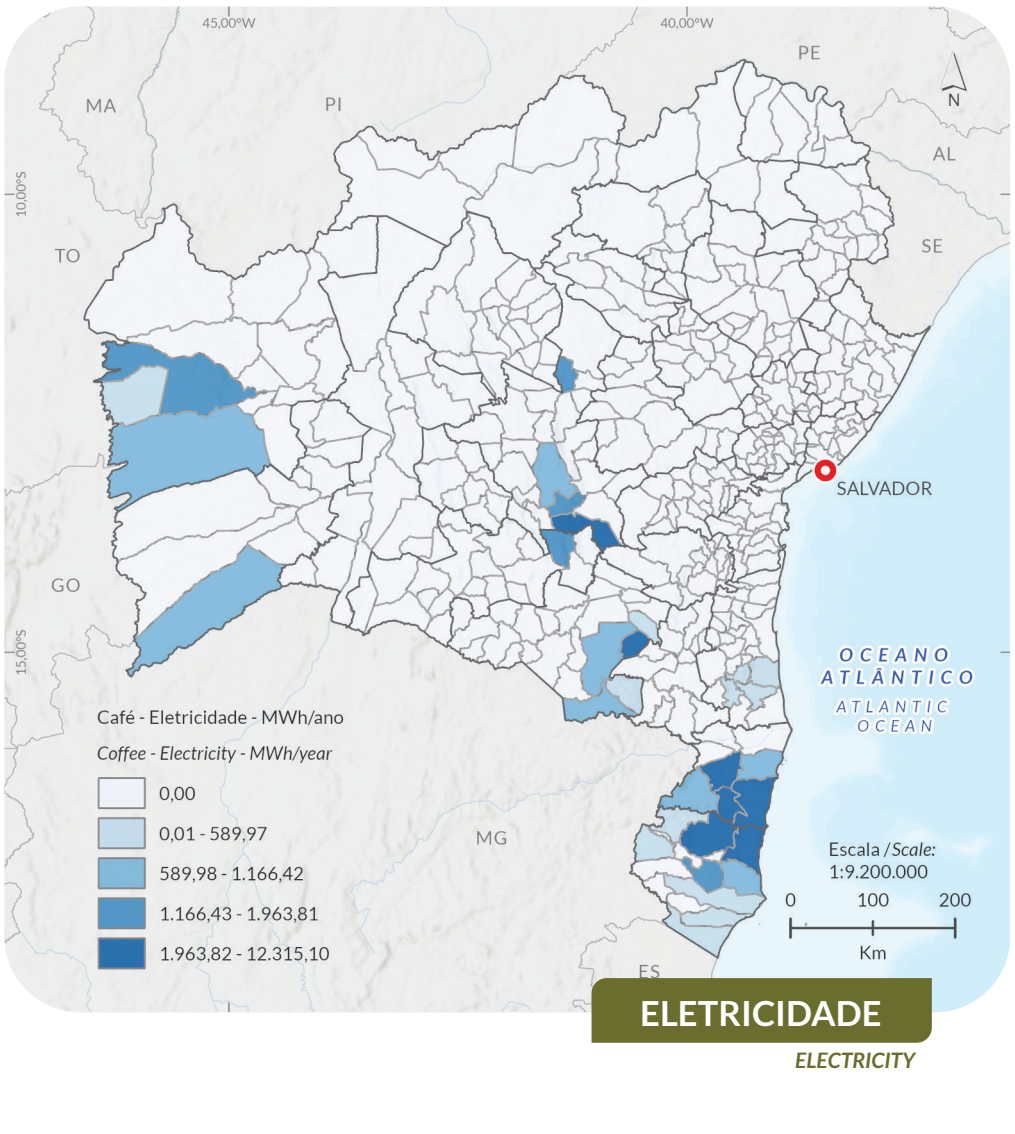
Among the main highlights are Itamaraju (12,315 MWh/year), Prado (10,807 MWh/year), Barra da Estiva (8,067 MWh/year), and Porto Seguro (7,896 MWh/year). The strong concentration of production in the municipalities of the Extremo Sul and Chapada Diamantina Identity Territories indicates strategic regions for the implementation of initiatives to convert coffee agricultural residues into energy.

Bahia's significant coffee production, concentrated in regions such as the Extremo Sul and Chapada Diamantina Identity Territories, generates significant volumes of husk during processing, with potential for energy use. Recovering this residue contributes to adding value to the coffee chain, especially in areas with a significant presence of family farming, expanding income opportunities and efficient use of resources. Furthermore, harnessing husks for energy favors the decentralization of electricity generation and the diversification of the state's energy mix, aligning productive sustainability with regional energy security.

Mapa 5.4 / *Map 5.4*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE PELO APROVEITAMENTO DA CASCA DO CAFÉ (MWh/ANO)

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM COFFEE HUSK UTILIZATION (MWh/YEAR)



5.5.5 ENERGY RECOVERY FROM SUGARCANE STRAW: POTENTIAL, LIMITS, AND OPPORTUNITIES IN BAHIA

Sugarcane production in the state in 2023 reached 5.65 million t [4]. From 2022 to 2023, the harvested area grew by 2.4%, while production increased by 8.5% over the same period [4]. This growth has been driven by investments in industrial modernization, harvest mechanization, and expansion of ethanol and energy production capacity. Furthermore, the sector has been coordinating initiatives aimed at diversifying the state's energy mix and generating carbon credits, reinforcing the role of sugarcane not only as a source of food and fuel, but also as a driver of Bahia's energy transition [14].

In 2023, Bahia produced 5,651,267 t of sugarcane, representing only 0.7% of national production. This amount was harvested on 77,268 ha, resulting in an average yield of 73,139 kg/ha. Although not a prominent crop nationally, the crop has regional relevance, being cultivated in more than 15,000 establishments (2017 data) and with a strong presence in the municipality of Juazeiro, the state's largest producer, responsible for approximately 1.9 million t, equivalent to 33% of Bahia's production. The total value of production in the state reached BRL 776.8 million, highlighting the economic role of sugarcane for several locations in Bahia [4].

Based on sugarcane production data in Bahia, a total electricity generation potential of approximately 383.53 GWh/year is estimated, considering the use of straw generated during cultivation (Table 5.7). Of this total, the ten municipalities with the largest production volume concentrate 377.59 GWh/year, representing approximately 98.4% of the state's estimated energy capacity. The municipality of Juazeiro has the largest potential (136.34 GWh/year), followed by Caravelas (77.70 GWh/year), Lajedão (38.05 GWh/year), and Ibirapuã (37.99 GWh/year). These results highlight the high territorial concentration of sugarcane production and the significant energy potential of this crop's residual biomass, especially in the north and far south regions of Bahia, which are strategic areas for the implementation of combined heat and power (CHP) systems and industrial use of bioenergy.

These municipalities are distributed across different Identity Territories in Bahia: Juazeiro belongs to the São Francisco Backlands, while Caravelas, Lajedão, Ibirapuã, Mucuri, Medeiros Neto, Nova Viçosa, and Itanhém are located in the Extremo Sul Identity Territory. Santa Cruz Cabrália belongs to the Identity Territory of Costa do Descobrimento, and Muquém do São Francisco is located in the Velho Chico Identity Territory.

The use of sugarcane straw for electricity production emerges as a strategic and sustainable alternative, considering that this biomass is already available as a byproduct of agricultural activity. Thus, by utilizing straw that would otherwise be discarded or underutilized, the state advances toward a cleaner, more efficient, and decentralized energy mix.

5.5.5 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA PALHA DA CANA-DE-AÇÚCAR: POTENCIAL, LIMITES E OPORTUNIDADES NA BAHIA

A produção de cana-de-açúcar no Estado no ano de 2023 foi de 5,65 milhões de t [4]. De 2022 a 2023, a área colhida cresceu 2,4%, enquanto a produção teve um aumento de 8,5% no mesmo período [4]. Esse avanço tem sido impulsionado por investimentos em modernização industrial, mecanização da colheita e expansão da capacidade de produção de etanol e energia. Além disso, o setor vem articulando iniciativas voltadas à diversificação da matriz energética estadual e à geração de créditos de carbono, reforçando o papel da cana-de-açúcar não apenas como fonte de alimento e combustível, mas também como vetor da transição energética na Bahia [14].

Em 2023, a Bahia produziu 5.651.267 t de cana-de-açúcar, o que correspondeu a apenas 0,7% da produção nacional. Essa quantidade foi colhida em 77.268 ha, resultando em um rendimento médio de 73.139 kg por ha. Apesar de não ocupar posição de destaque no cenário nacional, a cultura possui relevância regional, sendo cultivada em mais de 15 mil estabelecimentos (dados de 2017) e com forte presença no município de Juazeiro, maior produtor do Estado, responsável por cerca de 1,9 milhão de t, o equivalente a 33% da produção baiana. O valor total da produção no estado alcançou R$ 776,8 milhões, destacando o papel econômico da cana-de-açúcar para diversas localidades baianas [4].

Com base nos dados de produção de cana-de-açúcar na Bahia, estima-se um potencial total de geração elétrica de, aproximadamente, 383,53 GWh/ano, considerando o aproveitamento da palha gerada no cultivo *(Tabela 5.7)*. Desse total, os dez municípios com maior volume de produção concentram 377,59 GWh/ano, o que representa cerca de 98,4% da capacidade energética estimada para o Estado. O município de Juazeiro possui o maior potencial (136,34 GWh/ano), seguido por Caravelas (77,70 GWh/ano), Lajedão (38,05 GWh/ano) e Ibirapuã (37,99 GWh/ano). Esses resultados evidenciam a elevada concentração territorial da produção de cana-de-açúcar e o expressivo potencial energético da biomassa residual dessa cultura, especialmente nas regiões do Norte e Extremo Sul da Bahia, que se configuram como áreas estratégicas para a implementação de sistemas de cogeração e aproveitamento industrial da bioenergia.

Esses municípios estão distribuídos entre diferentes Territórios de Identidade da Bahia: Juazeiro pertence ao Sertão do São Francisco, enquanto Caravelas, Lajedão, Ibirapuã, Mucuri, Medeiros Neto, Nova Viçosa e Itanhém estão localizadas no Extremo Sul. Santa Cruz Cabrália pertence ao território da Costa do Descobrimento e Muquém do São Francisco está inserido no território do Velho Chico.

O aproveitamento da palha da cana-de-açúcar para a produção de energia elétrica surge como uma alternativa estratégica e sustentável, considerando que essa biomassa já está disponível como subproduto da atividade agrícola. Assim, ao se utilizar a palha que de outra forma poderia ser descartada ou subutilizada, o Estado avança em direção a uma matriz energética mais limpa, eficiente e descentralizada.

Tabela 5.7 Dez municípios com maior potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos agrícolas de cana-de-açúcar (palha).
Table 5.7 *Ten municipalities with the highest electricity generation potential from sugarcane agricultural residues (straw).*

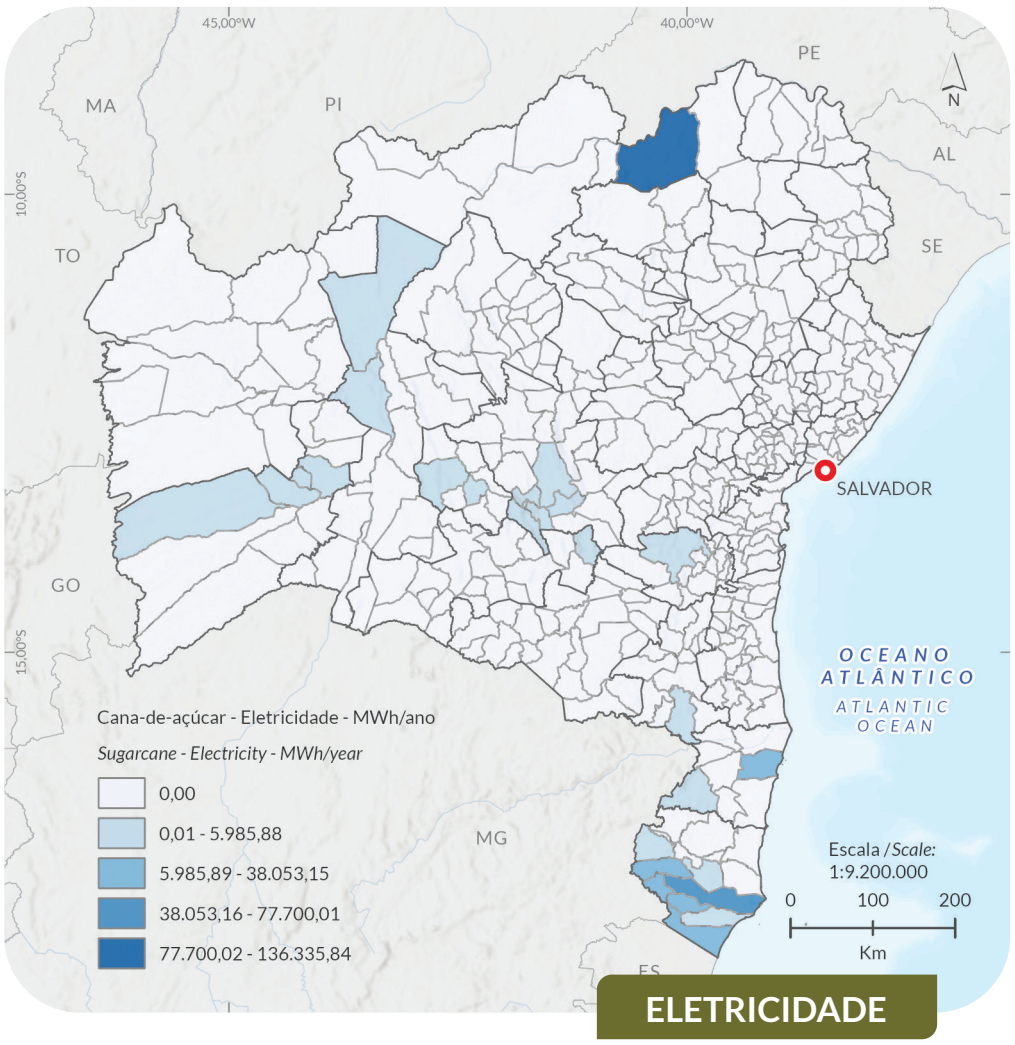
Munícipio *Municipality*	Cana-de-açúcar produzida (t/ano) *Sugarcane produced (t/year)*	Resíduo (t/ano) *Residue (t/year)*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*
Total	**5.651.267,00**	**372.305,47**	**383.533,14**
Total 10+	**5.327.804,00**	**350.995,73**	**377.587,49**
Juazeiro	1.916.164,00	126.236,88	136.335,84
Caravelas	1.092.053,00	71.944,45	77.700,01
Lajedão	534.827,00	35.234,40	38.053,15
Ibirapuã	534.064,00	35.184,14	37.998,87
Mucuri	500.206,00	32.953,57	35.589,86
Medeiros Neto	332.877,00	21.929,94	23.684,33
Santa Cruz Cabrália	291.659,00	19.214,49	20.751,65
Nova Viçosa	84.130,00	5.542,48	5.985,88
Itanhém	21.980,00	1.448,04	781,94
Muquém do São Francisco	19.844,00	1.307,32	705,95

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

Mapa 5.5 / *Map 5.5*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS DA CANA-DE-AÇÚCAR (PALHA) (MWh/ANO)

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM SUGARCANE AGRICULTURAL RESIDUES (STRAW) (MWh/YEAR)



Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source*:
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

ELETRICIDADE

ELECTRICITY

Figura 5.9 Resíduos de palha sobre o solo em área de cana-de-açúcar.
Figure 5.9 *Straw residues on the soil surface in a sugarcane plantation.*



Foto / *Photo:* Oleksandr/stock.adobe.com

5.5.6 CITRUS FRUITS AND BIOENERGY: PRUNING AS A STRATEGIC ENERGY RESOURCE

In 2023, Bahia emerged as a major national producer of citrus fruits, including oranges, lemons, and tangerines, with a significant and diversified production that significantly contributes to the country's agricultural landscape. The state produced 610,000 t of oranges, representing 3.5% of national production and ranking 4th among the largest producers. This production occurred at approximately 49,000 hectares, with an average yield of 12.5 t/ha. The municipality of Rio Real was the largest producer in the state, with 17,000 t [9].

Regarding lemons, Bahia produced 80,500 t, representing 4.7% of the national total, ranking it as the 3rd largest producer in the country. The cultivated area was approximately 6,200 ha, with an average yield of 12.9 t/ha. Sátiro Dias was the main producing municipality, with 16,200 t [9]. Tangerine production reached approximately 14,000 t, equivalent to 1.3% of national production, cultivated on 1,400 ha, with an average yield of 9.8 t/ha. Barra da Estiva stood out as the largest state producer, with 2,000 t [9].

Despite the significant production, average yields observed in 2023 were lower than in previous years, when values reached 17.16 t/ha for oranges (2007); 19.39 t/ha for lemons (2010); and 19.03 t/ha for tangerines (2012) [36]. This decline is associated with phytosanitary problems, water crises, and reduced crop care. Furthermore, the significant increase in production costs, such as that recorded in 2022, when orange cultivation costs rose by more than 84% due to the indirect effects of the war in Ukraine [37], worsened the situation for producers.

Given this challenging context, strategies for utilizing citrus crop residues are gaining importance. In addition to helping control pests and diseases, these practices can generate additional income, especially for small producers, promoting the diversification of agricultural activities and increasing economic resilience in the face of climate and market instability.

Citrus trees undergo three main types of pruning: formative, cleaning (or winter), and fruiting. Most of the agricultural residues are generated during cleaning and fruiting pruning, performed in the winter and immediately after harvest [38,39]. Since each hectare of orange, lemon, or tangerine cultivation generates approximately 3.5 t of branches/year [40,41], it is estimated that nearly 200,000 t of pruning residues are generated annually in citrus crops in Bahia, demonstrating a high potential for energy conversion of these lignocellulosic residues.

5.5.6 CITROS E BIOENERGIA: PODAS COMO RECURSO ENERGÉTICO ESTRATÉGICO

Em 2023, a Bahia destacou-se como um importante produtor nacional de citros, englobando laranja, limão e tangerina, com uma produção expressiva e diversificada que contribui significativamente para o cenário agrícola do país. O Estado produziu 610 mil t de laranja, correspondendo a 3,5% da produção nacional e ocupando a 4ª posição entre os maiores produtores. Essa produção ocorreu em cerca de 49 mil ha, com rendimento médio de 12,5 t/ha. O município de Rio Real foi o maior produtor estadual, com 17 mil t [9].

Quanto ao limão, a Bahia obteve uma produção de 80,5 mil t, o que representa 4,7% do total nacional, posicionando-se como o 3º maior produtor do País. A área cultivada foi de, aproximadamente, 6,2 mil ha, com rendimento médio de 12,9 t/ha. Sátiro Dias foi o principal município produtor, com 16,2 mil t [9]. Já a produção de tangerina alcançou cerca de 14 mil t, equivalente a 1,3% da produção nacional, cultivadas em 1.400 ha, com rendimento médio de 9,8 t/ha. Barra da Estiva destacou-se como maior produtor estadual, com 2 mil t [9].

Apesar da relevância da produção, os rendimentos médios observados em 2023 foram inferiores aos de anos anteriores, quando os valores chegaram a 17,16 t/ha, para laranja (2007); 19,39 t/ha, para limão (2010); e 19,03 t/ha, para tangerina (2012) [36]. Essa

Tabela 5.8 Dez municípios com maior potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos do cultivo de citros (poda).
Table 5.8 *Ten municipalities with the highest electricity generation potential from citrus cultivation residues (pruning).*

Munícipio *Municipality*	Resíduo total (t/ano) *Total residue (t/year)*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*			
		Laranja *Orange*	Limão *Lemon*	Tangerina *Tangerine*	Total
Total	**199.405,50**	**157.811,78**	**11.693,69**	**1.383,53**	**170.889,01**
Total 10+	**150.258,50**	**144.628,42**	**10.433,35**	**1.383,53**	**151.104,49**
Rio Real	60.347,00	64.438,50	363,89	0,00	64.802,39
Inhambupe	33.124,00	34.114,50	796,01	0,00	34.910,51
Esplanada	16.170,00	17.436,30	0,00	0,00	17.436,30
Itapicuru	14.000,00	15.162,00	0,00	0,00	15.162,00
Sapeaçu	7.490,00	1.895,25	4.321,17	0,00	6.216,42
Jandaíra	4.200,00	4.548,60	0,00	0,00	4.548,60
Cruz das Almas	3.997,00	739,15	1.421,44	0,00	2.160,59
Acajutiba	3.860,50	2.084,78	0,00	0,00	2.084,78
Santo Antônio de Jesus	3.720,50	1.470,71	0,00	540,15	2.010,86
Laje	3.349,50	1.772,06	0,00	0,00	1.772,06

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*



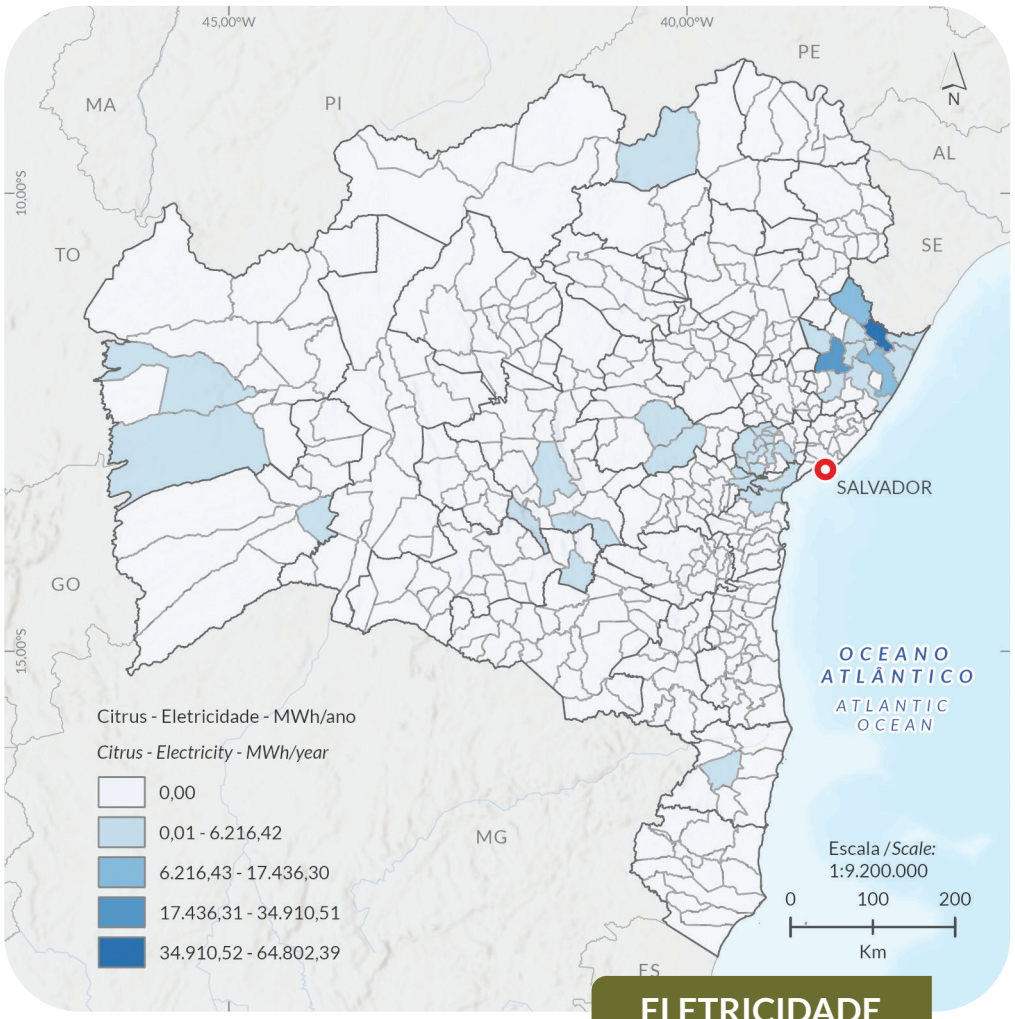
Foto / *Photo:* Murilo / stock.adobe.com

Figura 5.10 Imagem aérea de plantação comercial de laranja no Brasil.
Figure 5.10 *Aerial image of a commercial orange plantation in Brazil.*

Mapa 5.6 / *Map 5.6*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS DE CITROS (PODA) (MWh/ANO)

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM CITRUS AGRICULTURAL RESIDUES (PRUNING) (MWh/YEAR)



ELETRICIDADE

ELECTRICITY

queda está associada a problemas fitossanitários, crises hídricas e à redução dos tratos culturais. Além disso, o aumento expressivo dos custos de produção, como o registrado em 2022, quando os custos da cultura da laranja subiram mais de 84% devido a efeitos indiretos da guerra na Ucrânia [37], agravou o cenário para os produtores.

Diante desse contexto desafiador, estratégias de aproveitamento dos resíduos da plantação de citros ganham relevância. Além de auxiliar no controle de pragas e doenças, essas práticas podem gerar renda complementar, principalmente para pequenos produtores, promovendo a diversificação das atividades agrícolas e aumentando a resiliência econômica frente às instabilidades climáticas e de mercado.

Plantas cítricas passam por três tipos principais de poda: de formação, de limpeza (ou de inverno) e de frutificação. A maior parte dos resíduos é gerada durante as podas de limpeza e frutificação, realizadas no inverno e logo após a colheita [38,39]. Visto que cada hectare cultivado com laranja, limão ou tangerina gera cerca de 3,5 t de galhos/ano [40,41], estima-se que, quase 200 mil t de resíduos de poda sejam geradas nos cultivos de citros na Bahia anualmente, evidenciando um elevado potencial para conversão energética desses resíduos lignocelulósicos.

A estimativa de geração de energia elétrica a partir dos resíduos do cultivo de citros no Estado da Bahia aponta um potencial total de, aproximadamente, 170.889 MWh por ano *(Tabela 5.8)*. Desse total, os dez municípios com maior volume de produção concentram cerca de 151.104 MWh/ano, o que representa, aproximadamente, 88% do potencial energético estadual para essa cultura. O município de Rio Real se destaca amplamente, com um total estimado de 64.802 MWh/ano, seguido por Inhambupe (34.911 MWh/ano), Esplanada (17.436 MWh/ano) e Itapicuru (15.162 MWh/ano). A maior parte da energia disponível é proveniente do processamento da laranja, com menor participação do limão e da tangerina.

Os municípios com maior potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos do cultivo de citros estão concentrados majoritariamente na região Nordeste do Estado, em territórios de identidade que compartilham características agroclimáticas favoráveis à fruticultura. Rio Real, Inhambupe, Esplanada, Itapicuru, Acajutiba e Jandaíra integram o Território Litoral Norte e Agreste Baiano, uma região tradicional na produção de laranja e limão, com forte presença da agricultura familiar e proximidade com o Estado de Sergipe. Já Sapeaçu, Cruz das Almas, Santo Antônio de Jesus e Laje pertencem ao Território do Recôncavo, conhecido por sua diversidade agrícola e presença de instituições de ensino e pesquisa.

Esses dois territórios são geograficamente próximos, localizados no eixo entre o litoral norte e a região central do Estado, e compartilham infraestrutura logística e polos agroindustriais. A concentração produtiva desses municípios em áreas adjacentes favorece estratégias integradas de coleta e valorização energética dos resíduos da plantação de citros, ampliando a viabilidade de projetos regionais de bioenergia.

Estimates of electricity generation from citrus crop residues in the State of Bahia indicate a total potential of approximately 170,889 MWh per year (Table 5.8). Of this total, the ten municipalities with the highest production volume account for approximately 151,104 MWh/year, representing approximately 88% of the state's energy potential for this crop. The municipality of Rio Real stands out, with an estimated total of 64,802 MWh/year, followed by Inhambupe (34,911 MWh/year), Esplanada (17,436 MWh/year), and Itapicuru (15,162 MWh/year). Most of the available energy comes from orange processing, with a smaller share of lemons and tangerines.

The municipalities with the greatest potential for generating electricity from citrus crop residues are concentrated primarily in the Northeast region of the state, in territories with similar characteristics that share agroclimatic conditions favorable to fruit growing. Rio Real, Inhambupe, Esplanada, Itapicuru, Acajutiba, and Jandaíra are part of the North Coast and Agreste Bahia Territory, a traditional orange and lemon-growing region with a strong family farming presence and proximity to the State of Sergipe. Sapeaçu, Cruz das Almas, Santo Antônio de Jesus, and Laje belong to the Recôncavo Territory, known for its agricultural diversity and the presence of educational and research institutions.

These two territories are geographically close, located on the axis between the northern coast and the central region of the state, and share logistical infrastructure and agro-industrial hubs. The productive concentration of these municipalities in adjacent areas favors integrated strategies for collecting and energy recovery from citrus plantation residues, increasing the viability of regional bioenergy projects.

5.5.7 COCONUT HUSK AS AN ENERGY ASSET IN THE COASTAL AND SEMI-ARID REGIONS

In 2023, Brazil allocated 187,000 ha to coconut production [4]. Among the states, Bahia stands out as the 2nd largest in cultivated area, with 37,200 ha, behind only Ceará, which leads with 42,700 ha dedicated to the crop. Production is concentrated mainly along the coast, including the regions known as Costa Verde, and Extremo Sul, in addition to the capital, Salvador. Production also stands out in the far north of the state, especially in the municipality of Juazeiro, consolidating these areas as the main hubs of coconut cultivation in Bahia.

In terms of production, Bahia is home to three of the top ten coconut-producing municipalities in Brazil. The municipality of Rodelas stands out, ranking 3rd nationally, with an annual production of 100.7 million coconuts. Juazeiro ranks 7th, with 62.9 million coconuts produced, followed by Conde, in 8th place, with a production of 55 million coconuts in 2023 (Table 5.9).

The genus Cocos includes only the species Cocos nucifera L., which has several varieties, the most important of which are: Typica (giant coconut) and Nana (dwarf coconut). The most widely used coconut hybrids are generated from the cross between the dwarf and giant varieties [42].

The dwarf coconut is primarily used to produce coconut water for both fresh and industrial consumption. The giant coconut, on the other hand, is used to produce dried coconut and coconut milk, primarily supplying the industry. The hybrid coconut is an intermediate species, combining greater resistance and versatility, serving both the fresh and industrial consumption markets [42]. In all cases, the agricultural stage, processing, and consumption of coconut water generate a large volume of residues.

Among the main agricultural residues, husks stand out because they represent approximately 80% of the fruit's weight and take a long time to decompose, lasting over eight years, which can generate negative environmental impacts, such as pollution and the proliferation of disease vectors. However, they have a high energy value and are used in the production of solid biofuels, such as pellets and charcoal, as well as fuel in boilers. The fibers extracted from the husks are highly durable and have multiple applications, including upholstery, carpets, and composites in construction. The bagasse, resulting from the pulp extraction, is rich in nutrients, making it a viable option for animal feed or as an agricultural substrate. Finally, coconut leaves and straw, although often discarded as fertilizer in crops, could be compacted and better utilized, contributing to the sustainable management of residues from the coconut production chain [43]. However, a significant portion of this residue is improperly disposed of: dry coconut residue is often abandoned in the cultivation areas themselves, while green coconut residue frequently ends up in urban landfills, contributing to environmental problems and wasting valuable resources [44].

Based on the adopted assumptions (see appendices), a total potential for electricity generation of approximately 56,515 MWh/year is estimated, considering the energy use of coconut husks. The ten municipalities with the largest production volume together account for 51,052 MWh/year, representing approximately 90% of the state's energy potential. Among them is the municipality of Rodelas, with a production of over 100 million fruits and an estimated potential of 19,877 MWh/year, followed by Juazeiro (12,425 MWh/year) and Conde (10,855 MWh/year).

The territorial distribution of these municipalities covers different regions of the state, with emphasis on the Itaparica Identity Territory Region (BA/PE) (Rodelas), the São Francisco Backlands (Juazeiro, Casa Nova), the North Coast and Agreste region of Bahia (Conde, Esplanada, Acajutiba, Jandaíra), and Costa do Descobrimento (Porto Seguro, Santa Cruz Cabrália), in addition to the South Coast (Canavieiras).

It is important to note that the calculation was based on production recorded by the IBGE [4]. However, the estimate does not consider possible trade movements between states. It is known, for example, that coconuts from Sergipe are purchased for supply or processing in Bahia. Therefore, considering this interstate dynamic, residue generation in the State of Bahia may be even greater than that estimated based solely on local production.

5.5.7 A CASCA DO COCO-DA-BAÍA COMO ATIVO ENERGÉTICO NO LITORAL E SEMIÁRIDO

Em 2023, o Brasil destinou 187 mil ha à produção de coco-da-baía [4]. Entre os Estados, a Bahia se destaca como o 2º maior em área cultivada, com 37,2 mil ha, ficando atrás apenas do Ceará, que lidera com 42,7 mil ha destinados à cultura. A produção está concentrada principalmente ao longo do litoral, incluindo a região conhecida como Costa Verde, e nas áreas do Extremo sul, além da capital, Salvador. Também se destaca a produção na região do Extremo Norte do Estado, com destaque para o município de Juazeiro, consolidando essas áreas como os principais polos de cultivo de coco na Bahia.

Em termos de produção, a Bahia abriga três dos dez principais municípios produtores de coco-da-baía no Brasil. O destaque vai para o município de Rodelas, que ocupa o 3º lugar no *ranking* nacional, com uma produção anual de 100,7 milhões de cocos. Juazeiro aparece na 7ª posição, com 62,9 milhões de cocos produzidos, seguido por Conde, em 8º lugar, com uma produção de 55 milhões de cocos no ano de 2023 *(Tabela 5.9)*.

O gênero *Cocos* inclui apenas a espécie *Cocos nucifera* L., que possui algumas variedades, destacando-se as mais importantes: *Typica* (coqueiro-gigante) e *Nana* (coqueiro-anão). Os híbridos de coqueiro mais amplamente utilizados são gerados a partir do cruzamento entre as variedades anão e gigante [42].

O coco anão é voltado principalmente para a produção de água de coco e consumo *in natura* e industrial da água de coco. Já o coco gigante é direcionado para a produção de coco seco e leite de coco, abastecendo principalmente a indústria. Por sua vez, o coco híbrido é uma espécie intermediária, que combina maior resistência e versatilidade, atendendo tanto ao mercado de consumo *in natura* quanto à indústria [42]. Em todos os casos, a etapa agrícola, o processamento ou o consumo da água de coco gera grande volume de resíduos.

Entre os principais resíduos, as cascas se destacam por representarem cerca de 80% do peso do fruto e pelo longo tempo de decomposição, superior a oito anos, o que pode gerar impactos ambientais negativos, como poluição e proliferação de vetores de doenças. No entanto, possuem alto valor energético, sendo empregadas na produção de biocombustíveis sólidos, como *pellets* e carvão vegetal, além de servir como combustível em caldeiras. As fibras, extraídas das cascas, são altamente duráveis e têm múltiplas aplicações, incluindo estofamentos, tapetes e compósitos na construção civil. Já os bagaços, resultantes da extração da polpa, são ricos em nutrientes, tornando-se uma opção viável para alimentação animal ou como substrato agrícola. Por fim, as folhas e palhas dos coqueiros, apesar de muitas vezes descartadas nos cultivos como adubo, poderiam ser compactadas e mais bem aproveitadas, contribuindo para a gestão sustentável dos resíduos da cadeia produtiva do coco [43]. Porém, uma parcela significativa desses resíduos é descartada inadequadamente: resíduos do coco seco costumam ser abandonados nas próprias áreas de cultivo, enquanto resíduos do coco verde frequentemente acabam em aterros sanitários urbanos, contribuindo para problemas ambientais e desperdício de recursos valiosos [44].

Com base nas premissas adotadas (*ver apêndices*), estima-se um potencial total de geração de energia elétrica de, aproximadamente, 56.515 MWh por ano, considerando o aproveitamento energético das cascas de coco-da-baía. Os dez municípios com maior volume de produção concentram juntos 51.052 MWh/ano, o que representa cerca de 90% do potencial energético estadual. Entre eles, o município de Rodelas, com produção superior a 100 milhões de frutos e um potencial estimado de 19.877 MWh/ano, seguido por Juazeiro (12.425 MWh/ano) e Conde (10.855 MWh/ano).

A distribuição territorial desses municípios abrange diferentes regiões do Estado, com destaque para a Região de Território de Identidade da Itaparica (BA/PE) (Rodelas), do Sertão do São Francisco (Juazeiro, Casa Nova), o Litoral Norte e Agreste Baiano (Conde, Esplanada, Acajutiba, Jandaíra) e a Costa do Descobrimento (Porto Seguro, Santa Cruz Cabrália), além do Litoral Sul (Canavieiras).

É importante destacar que o cálculo realizado foi baseado na produção registrada pelo IBGE [4]. No entanto, a estimativa não considera possíveis movimentações comerciais entre Estados. Sabe-se, por exemplo, que há aquisição de coco-da-baía proveniente de Sergipe para abastecimento ou beneficiamento na Bahia. Dessa forma, considerando essa dinâmica interestadual, a geração de resíduos no estado da Bahia pode ser ainda maior do que a estimada apenas com base na produção local.

Tabela 5.9 Lista dos dez principais produtores de coco-da-baía no Brasil no ano de 2023.
Table 5.9 *List of the top ten coconut-producing municipalities in Brazil in 2023.*

Ranking	Munícipio *Municipality*	UF *State*	Produção em 2023 (mil frutos) *Production in 2023 (thousand fruits)*
1º	Paraipaba	Ceará	171.409
2º	Petrolândia	Pernambuco	135.750
3º	Rodelas	Bahia	100.715
4º	Acaraú	Ceará	93.085
5º	Moju	Pará	82.835
6º	Petrolina	Pernambuco	80.500
7º	Juazeiro	Bahia	62.957
8º	Conde	Bahia	55.000
9º	São Mateus	Espírito Santo	51.840
10º	Trairi	Ceará	49.638

Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [4]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [4].

Tabela 5.10 Municípios com maior potencial de geração de eletricidade a partir das cascas de coco-da-baía.
Table 5.10 *Municipalities with the highest electricity generation potential from coconut husks.*

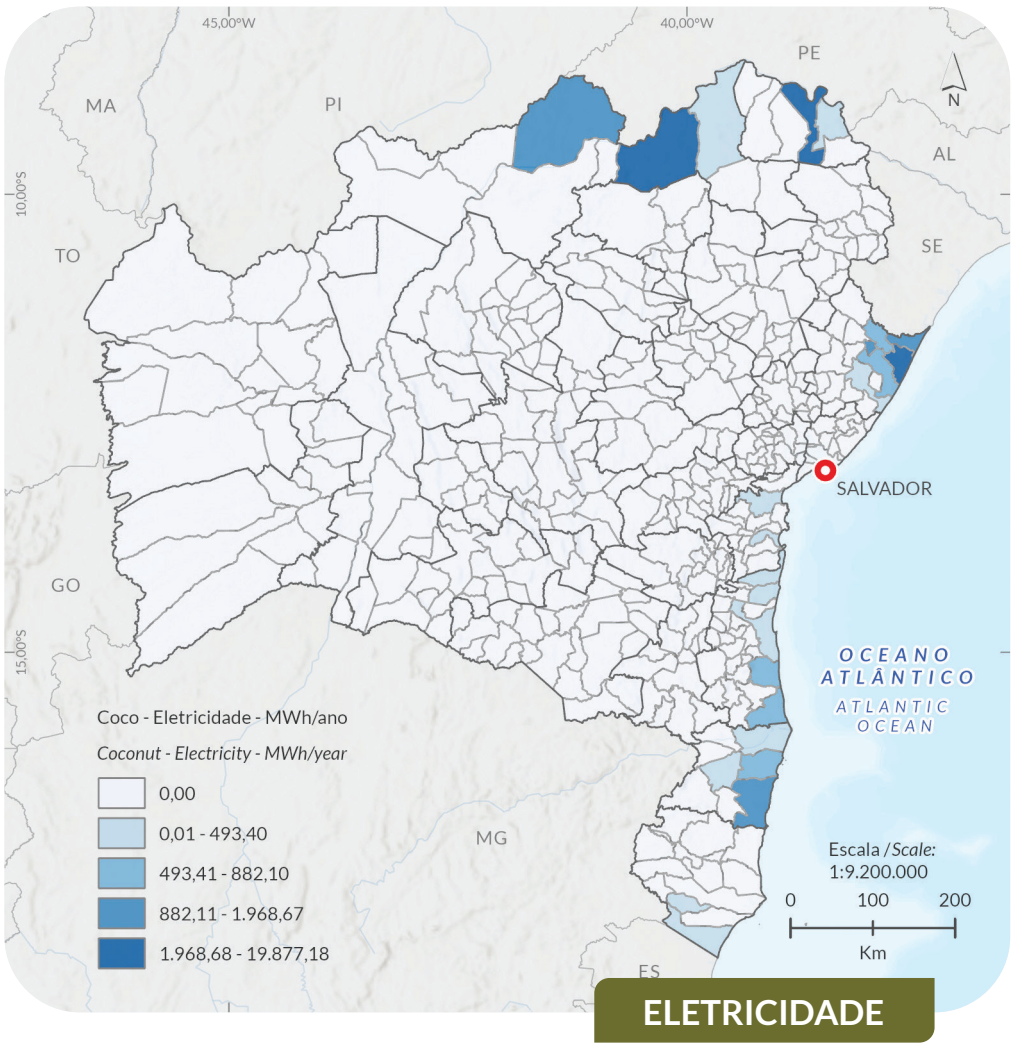
Munícipio *Municipality*	Produção (mil frutos) *Production (thousand fruits)*	Coco-da-baía produzido (t/ano) *Coconut produced (t/year)*	Resíduo (base seca) (t/ano) *Residue (dry basis) (t/year)*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*
Total	**387.404**	**495.877**	**59.505**	**56.514**
Total 10+	**298.676**	**382.305**	**45.876**	**51.052**
Rodelas	100.715	128.915	15.470	19.877
Juazeiro	62.957	80.585	9.670	12.425
Conde	55.000	70.400	8.448	10.855
Porto Seguro	19.950	25.536	3.064	1.969
Casa Nova	13.891	17.780	2.134	1.371
Jandaíra	11.944	15.288	1.835	1.179
Acajutiba	11.853	15.172	1.821	1.170
Canavieiras	8.939	11.442	1.373	882
Esplanada	6.750	8.640	1.037	666
Santa Cruz Cabrália	6.677	8.547	1.026	659

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

Mapa 5.7 / *Map 5.7*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS DO COCO-DA-BAÍA (CASCA) (MWh/ANO)

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM COCONUT RESIDUES (HUSK) (MWh/YEAR)



ELETRICIDADE
ELECTRICITY

Figura 5.11 Resíduos de coco-da-baía (casca)
Figure 5.11 *Coconut residues (husk).*



Foto / *Photo:* Ndaru Anuradha / stock.adobe.com

Several barriers need to be overcome to enable the energy use of coconut residues, with collection logistics being one of the most important. In 2023, it is estimated that more than 59,500 t of coconut husks will have been generated in Bahia (Table 5.10), making it urgent to implement an efficient collection system to avoid overloading public sanitation services. Furthermore, green coconut husks have a decomposition time of eight to ten years and are largely discarded in dumps or landfills. This process not only generates significant costs for public services but also contributes to greenhouse gas emissions such as methane and carbon dioxide [44].

High transportation costs and a lack of adequate infrastructure, such as collection points and appropriate vehicles, compromise the economic viability of reuse, especially when there are long distances between the generation and processing sites. Therefore, it is essential to develop an efficient reverse logistics system capable of collecting and transporting residues before it deteriorates.

In this context, the Environment and Sustainable Development Committee of the Chamber of Deputies approved Law No. 616/24, which proposes the inclusion of selective waste collection and reverse logistics for green coconuts in the National Solid Waste Policy (PNRS). The measure requires manufacturers, distributors, and retailers of the product to implement systems independent of public services for the collection, transportation, recycling, and treatment of waste, seeking to mitigate the environmental impact caused by inadequate disposal. The project also includes environmental education initiatives and encourages partnerships with waste picker cooperatives. The proposal is currently awaiting approval from the Urban Development Commission [45]. The new legislation could represent an important step toward promoting sustainable management and contributing to reducing the environmental impacts caused by improper disposal of green coconuts.

Cooperation between nearby municipalities with high production potential could facilitate the formation of regional hubs for processing husks, with centralized units to produce briquettes or pellets. Partnerships with cooperatives, government incentives, and investment in innovative technologies are essential to overcoming logistical barriers and expanding the sustainable use of these residues.

Diversas barreiras precisam ser superadas para viabilizar o aproveitamento energético dos resíduos do coco-da-baía, sendo a logística de recolhimento uma das mais relevantes. Em 2023, estima-se que mais de 59,5 mil t de cascas de coco tenham sido geradas na Bahia (*Tabela 5.10*), o que torna urgente a implementação de um sistema de coleta eficiente para evitar o sobrecarregamento dos serviços de limpeza pública. Além disso, a casca do coco verde possui um tempo de decomposição que varia de oito a dez anos, e é em grande parte descartada em lixões ou aterros sanitários. Esse processo não apenas gera custos significativos para os serviços públicos, mas também contribui para emissões de gases de efeito estufa, como metano e gás carbônico [44].

Os altos custos de transporte e a falta de infraestrutura adequada, como pontos de coleta e veículos apropriados, comprometem a viabilidade econômica do reaproveitamento, especialmente quando há longas distâncias entre o local de geração e o de processamento. Por isso, é essencial estruturar um sistema de logística reversa eficiente, capaz de coletar e transportar os resíduos antes de sua deterioração.

Nesse contexto, a Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Câmara dos Deputados aprovou o *Projeto de Lei 616/24*, que propõe a inclusão da coleta seletiva e da logística reversa para o coco verde na *Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)*. A medida exige que fabricantes, distribuidores e comerciantes do produto implementem sistemas independentes do serviço público para coleta, transporte, reciclagem e tratamento de resíduos, buscando mitigar o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado. O projeto também prevê ações de educação ambiental e incentivo a parcerias com cooperativas de catadores. Atualmente, a proposta aguarda parecer na Comissão de Desenvolvimento Urbano [45]. A nova legislação pode representar um importante passo para promover o manejo sustentável e contribuir para a redução dos impactos ambientais causados pelo descarte inadequado do coco verde.

A cooperação entre municípios próximos com alto potencial de geração pode facilitar a formação de polos regionais para o beneficiamento das cascas, com unidades centralizadas para produção de briquetes ou *pellets*. Parcerias com cooperativas, incentivos governamentais e investimento em tecnologias inovadoras são fundamentais para superar barreiras logísticas e ampliar o uso sustentável desse resíduo.

5.5.8 PALM OIL BUNCHES AND ENERGY GENERATION: THE LOWER SOUTH AS A PROMISING REGION

Palm oil production in the State of Bahia totaled BRL 14.868 million in 2023, with a harvest of 39,154 t. This production was obtained from a harvested area of 12,696 hectares, resulting in an average yield of 3,084 kg/ha. The municipality of Jaguaripe stood out as the largest producer in Bahia in 2023, with a production of 14,419 t of palm oil bunches [9].

The results indicate that total palm oil production in 2023 generated approximately 11,084 t of empty palm bunches that could be used for energy conversion. This residual biomass has an estimated generation capacity of 11,408.66 MWh of electricity. Only seven municipalities in the state have the potential to utilize this residues (Table 5.11). The municipalities of Jaguaripe, Valença, Ituberá, Taperoá, Igrapiúna, Camamu, and Cairu (all located in the Baixo Sul Identity Territory in Bahia) stand out not only for their importance in oil palm production but also for the energy potential associated with the residues from this activity. Together, these seven municipalities account for more than 37,300 t of processed oil palm bunches, resulting in approximately 10,572 t of residue. This volume could generate approximately 11,408 MWh of electricity per year, with Jaguaripe alone accounting for more than half of this potential, with 6,355 MWh/year.

5.5.8 CACHOS DE DENDÊ E GERAÇÃO DE ENERGIA: O BAIXO SUL COMO TERRITÓRIO PROMISSOR

A produção de dendê no Estado da Bahia apresentou, em 2023, um valor total de R$ 14,868 milhões, com uma quantidade colhida de 39.154 t da cultura. Essa produção foi obtida a partir de uma área colhida de 12.696 ha, resultando em um rendimento médio de 3.084 kg/ha. O município de Jaguaripe destacou-se como o maior produtor baiano no ano de 2023, com a produção de 14,4 mil t de dendê em cacho [9].

Os resultados apontam que com a produção total de dendê em 2023, geraram-se, aproximadamente, 11.084 t de cachos vazios que poderiam ser aproveitados para conversão energética. Essa biomassa residual tem capacidade estimada de geração de 11.408,66 MWh de energia elétrica. Apenas sete municípios no Estado possuem potencial para aproveitamento desses resíduos *(Tabela 5.11)*.

Os municípios de Jaguaripe, Valença, Ituberá, Taperoá, Igrapiúna, Camamu e Cairu (todos localizados no Território de Identidade do Baixo Sul da Bahia) se destacam não apenas pela relevância na produção de dendê, mas também pelo potencial energético associado aos resíduos dessa atividade. Juntos, esses sete municípios somam mais de 37,3 mil t de cachos de coco de dendê processados, resultando em, aproximadamente, 10.572 t de resíduos. Esse volume poderia gerar cerca de 11.408 MWh de energia elétrica por ano, com destaque para Jaguaripe, que sozinho representa mais da metade desse potencial, com 6.355 MWh/ano.

Tabela 5.11 Dez municípios com maior potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos do cultivo do dendê (cacho de frutas vazio).
Table 5.11 *Ten municipalities with the highest electricity generation potential from oil palm cultivation residues (empty fruit bunch)*

Munícipio *Municipality*	Dendê (Cacho de coco) (t/ano) *Oil palm (fruit bunch) (t/year)*	Resíduo (t/ano) *Residue (t/year)*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*
Total	**39.154,00**	**11.084,50**	**11.408,66**
Total 7+	**37.346,00**	**10.572,65**	**11.408,66**
Jaguaripe	14.419,00	4.082,02	6.355,70
Valença	5.889,00	1.667,18	1.297,90
Ituberá	4.509,00	1.276,50	993,75
Taperoá	4.080,00	1.155,05	899,20
Igrapiúna	3.800,00	1.075,78	837,49
Camamu	3.449,00	976,41	760,14
Cairu	1.200,00	339,72	264,47

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

Figura 5.12 Cachos de frutos de dendê prontos para processamento.
Figure 5.12 *Oil palm fruit bunches ready for processing.*

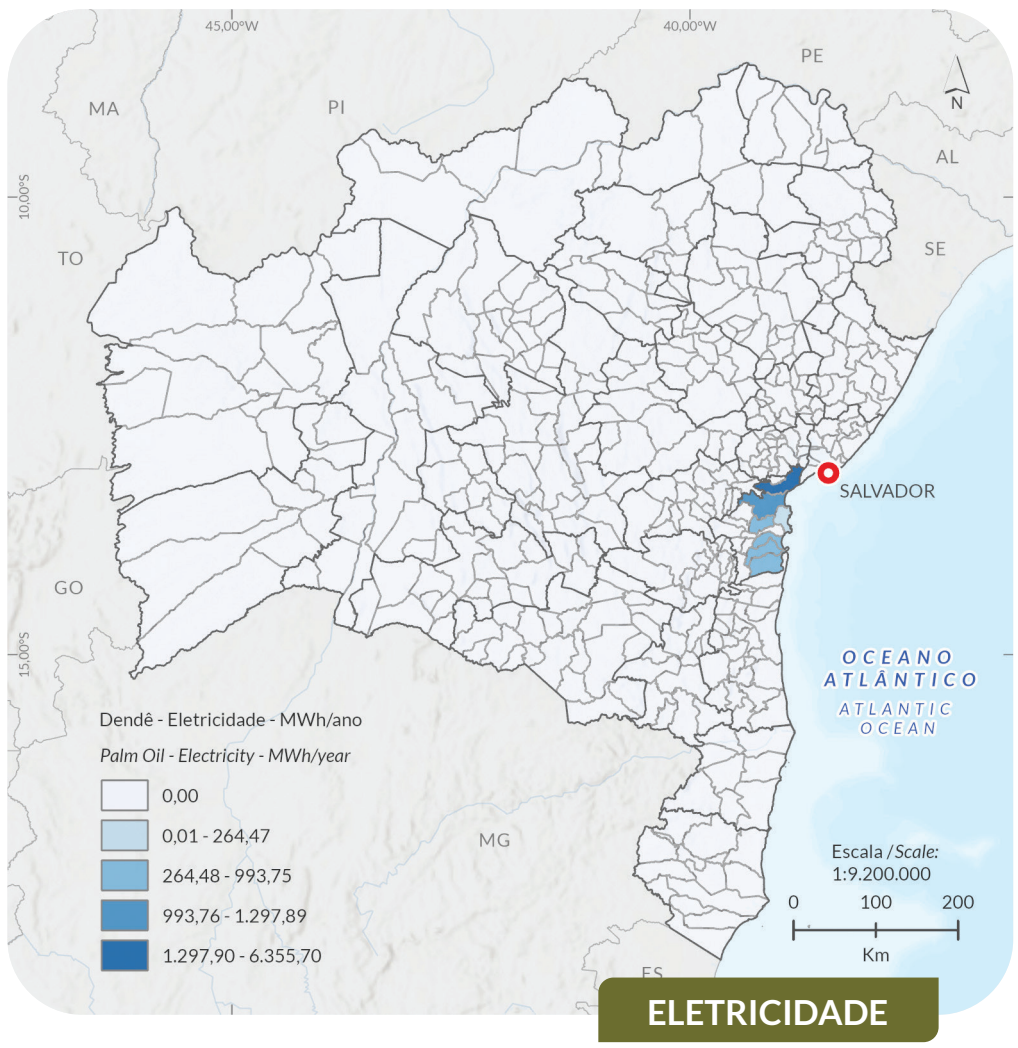


Foto / *Photo:* Chanyanuch / stock.adobe.com

Mapa 5.8 / *Map 5.8*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO ELETRICIDADE PELO APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DO CULTIVO DO DENDÊ (CACHO DE FRUTAS VAZIO) (MWh/ANO)

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM PALM OIL CULTIVATION RESIDUES (EMPTY FRUIT BUNCH) (MWh/YEAR)



ELETRICIDADE
ELECTRICITY

Figura 5.13 Colheita mecanizada de feijão.
Figure 5.13 *Mechanized bean harvesting.*



Foto / *Photo:* Rodrigo / stock.adobe.com

5.5.9 BEAN STRAW AS AN ENERGY ALTERNATIVE IN THE WESTERN AND SEMI-ARID REGIONS OF BAHIA

In 2023, Bahia accounted for 6% of national bean production, with a total of 174,572 t harvested across a vast area of 325,953 hectares. The average yield was 536 kg/ha, reflecting the crop's productive characteristics in the state. Production is distributed across different territories, with emphasis on the regions of the Bacia do Rio Grande and the Bacia do Rio Corrente, where the main producing municipalities are concentrated [9].

The results indicate that, with a total production of 174,572 t of beans, approximately 81,001 t of bean straw capable of energy conversion are estimated to be generated, resulting in a production potential of approximately 57,893 MWh/year.. Among the municipalities with the greatest potential are Formosa do Rio Preto, São Desidério, and Barreiras, which together account for more than 31,000 t of residues and a potential for electricity generation of 22,349 MWh/year (Table 5.12).

An analysis of the potential for electricity generation from bean straw in Bahia shows that the main producing municipalities are primarily concentrated in Western Bahia and in the Semiárido Nordeste II Identity Territory. Together, the ten municipalities with the highest production represent approximately 61% of the state's total and have a combined annual generation potential of over 50,900 MWh.

Western Bahia stands out as the main production hub, with municipalities such as Formosa do Rio Preto (11,494 MWh/year), São Desidério (10,855 MWh/year), Barreiras (9,353 MWh/year), Luís Eduardo Magalhães (4,780 MWh/year), and Riachão das Neves (2,045 MWh/year), highlighting the region's agricultural strength and its potential for bioenergy initiatives. In the Semiárido Nordeste II Identity Territory, Euclides da Cunha municipality appears with a significant estimated generation of 8,020 MWh/year, followed by Adustina with 1,134 MWh/year. Other municipalities such as Jaborandi, Barra do Choça, and Serra do Ramalho also contribute to this promising scenario, reinforcing the importance of territorial strategies for the sustainable use of agro-industrial residues in the state.

5.5.9 A PALHA DO FEIJÃO COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA NO OESTE E SEMIÁRIDO BAIANOS

Em 2023, a Bahia foi responsável por 6% da produção nacional de feijão, com um total de 174.572 t colhidas em uma extensa área de 325.953 ha. O rendimento médio foi de 536 kg/ha, refletindo as particularidades produtivas da cultura no Estado. A produção está distribuída em diferentes territórios, com destaque para as regiões da Bacia do Rio Grande e da Bacia do Rio Corrente, onde se concentram os principais municípios produtores [9].

Os resultados apontam que, com uma produção total de 174.572 t de feijão, estima-se a geração de cerca de 81.001 t de resíduos agrícolas passíveis de conversão energética, resultando em um potencial de produção de, aproximadamente, 57.893 MWh/ano. Entre os municípios com maior potencial, destacam-se Formosa do Rio Preto, São Desidério e Barreiras, que juntos respondem por mais de 31 mil t de resíduos e cpotencial de geração de eletricidade de 22.349 MWh/ano (*Tabela 5.12*).

A análise do potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos da cultura do feijão na Bahia revela que os principais municípios produtores se concentram, majoritariamente, no Oeste baiano e no Território de Identidade Semiárido Nordeste II. Juntos, os dez municípios com maior produção representam cerca de 61% do total estadual e somam um potencial de geração elétrica superior a 50.900 MWh por ano.

O Oeste baiano se destaca como o principal polo produtivo, com municípios como Formosa do Rio Preto (11.494 MWh/ano), São Desidério (10.855 MWh/ano), Barreiras (9.353 MWh/ano), Luís Eduardo Magalhães (4.780 MWh/ano) e Riachão das Neves (2.045 MWh/ano), evidenciando a força agrícola da região e seu potencial para iniciativas de bioenergia. Já no Semiárido Nordeste II, Euclides da Cunha aparece com expressiva geração estimada de 8.020 MWh/ano, seguido por Adustina com MWh/ano. Outros municípios como Jaborandi, Barra do Choça e Serra do Ramalho também contribuem para esse cenário promissor, reforçando a importância de estratégias territoriais para o aproveitamento sustentável dos resíduos agroindustriais no Estado.

Tabela 5.12 Dez municípios com maior potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos do cultivo de feijão (palha).
Table 5.12 *Ten municipalities with the highest electricity generation potential from bean crop residues (straw).*

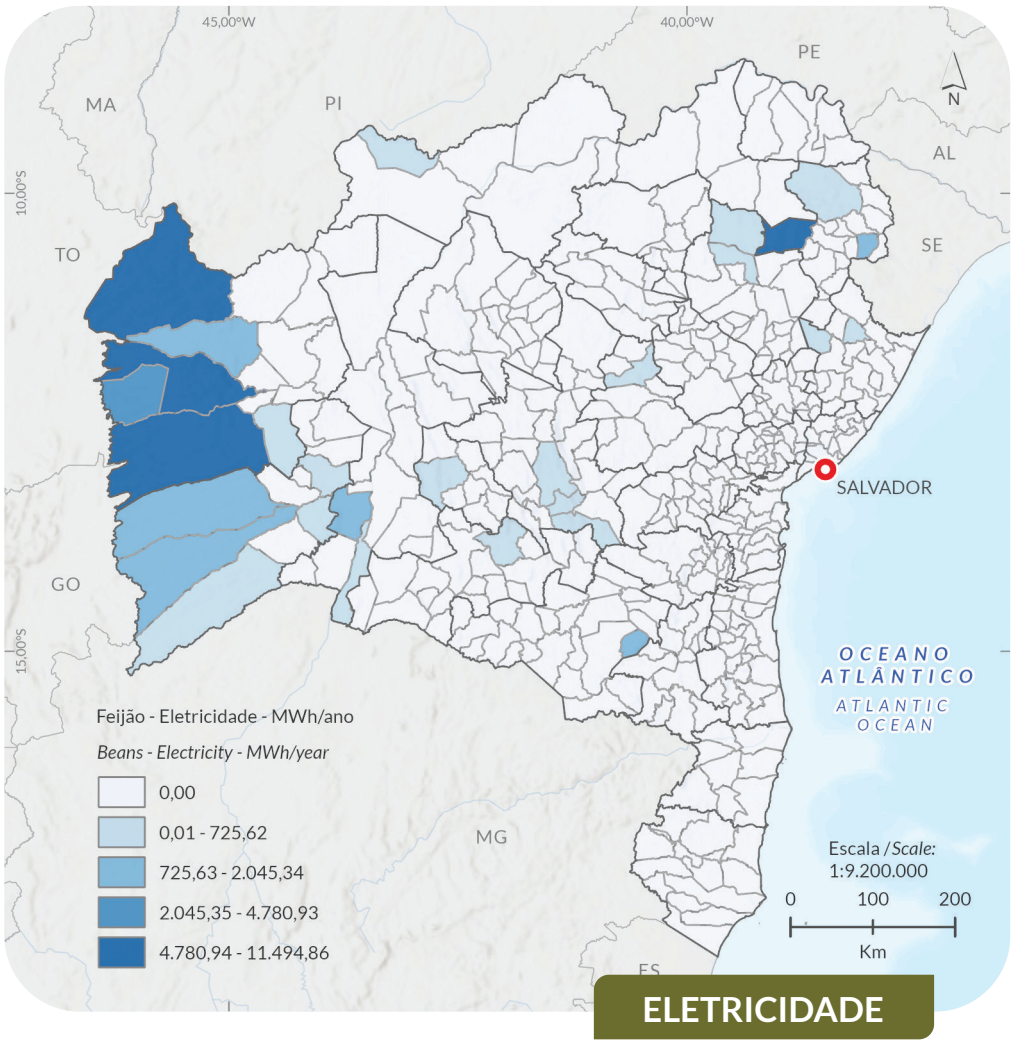
Munícipio *Municipality*	Feijão produzido (t/ano) *Beans produced (t/year)*	Resíduo (t/ano) *Residue (t/year)*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*
Total	**174.572,00**	**81.001,41**	**57.892,62**
Total 10+	**106.178,00**	**49.266,59**	**50.925,65**
Formosa do Rio Preto	21.283,00	9.875,31	11.494,86
São Desidério	20.099,00	9.325,94	10.855,39
Barreiras	17.318,00	8.035,55	9.353,38
Euclides da Cunha	14.850,00	6.890,40	8.020,43
Luís Eduardo Magalhães	8.852,00	4.107,33	4.780,93
Riachão das Neves	7.574,00	3.514,34	2.045,34
Adustina	4.200,00	1.948,80	1.134,20
Jaborandi	4.173,00	1.936,27	1.126,91
Barra do Choça	3.985,00	1.849,04	1.076,14
Serra do Ramalho	3.844,00	1.783,62	1.038,06

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

Mapa 5.9 / *Map 5.9*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS DO FEIJÃO (PALHA) (MWh/ANO)

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM BEAN CROP RESIDUES (STRAW) (MWh/YEAR)



Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

ELETRICIDADE

ELECTRICITY

5.5.10 MANDIOCA: APROVEITAMENTO DAS RAMAS EM DIFERENTES TERRITÓRIOS

Em 2023, a Bahia produziu 808.028 t de mandioca, o que correspondeu a 4,4% da produção nacional. Essa quantidade foi colhida em 102.902 ha, com um rendimento médio de 7.852 kg/ha. A cultura está amplamente distribuída pelo território baiano, sendo cultivada em mais de 125 mil estabelecimentos, segundo dados de 2017. O município de Laje foi o maior produtor do Estado no ano, com 57.100 t. Ainda, em 2023, o valor total da produção de mandioca na Bahia foi estimado em R$ 627 milhões [9].

Com uma produção total de 808.028 t de mandioca, estima-se a geração de cerca de 210.087 t de resíduos que podem ser convertidos em energia, resultando em um potencial de geração de, aproximadamente, 185.790 MWh/ano. Dentre os municípios com

5.5.10 CASSAVA: UTILIZATION OF STEMS IN DIFFERENT TERRITORIES

In 2023, Bahia produced 808,028 t of cassava, representing 4.4% of national production. This amount was harvested on 102,902 hectares, with an average yield of 7,852 kg/ha. The crop is widely distributed throughout Bahia, cultivated in over 125,000 establishments, according to 2017 data. The municipality of Laje was the state's largest producer that year, with 57,100 t. Furthermore, in 2023, the total value of cassava production in Bahia was estimated at BRL 627 million [9].

With a total production of 808,028 t of cassava, it is estimated that approximately 210,087 t of cassava residues could be generated, which can be converted into energy, resulting in a generation potential of approximately 185,790 MWh/year. Among the most promi-



Foto / *Photo:* naynon / Freepik

Figura 5.14 Área de cultivo de mandioca durante a colheita.
Figure 5.14 *Cassava field during harvesting.*

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS NA BAHIA

Tabela 5.13 Dez municípios com maior potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos do cultivo de mandioca (ramas).
Table 5.13 *Ten municipalities with the highest electricity generation potential from cassava cultivation residues (stems).*

Munícipio *Municipality*	Mandioca produzida (t/ano) *Cassava produced (t/year)*	Resíduo (t/ano) *Residue (t/year)*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*
Total	**808.028,00**	**210.087,28**	**185.790,29**
Total 10+	**256.763,00**	**66.758,38**	**94.529,87**
Laje	57.145,00	14.857,70	21.038,50
Itapicuru	52.686,00	13.698,36	19.396,88
Vitória da Conquista	23.412,00	6.087,12	8.619,36
Maragogipe	21.184,00	5.507,84	7.799,10
Euclides da Cunha	19.133,00	4.974,58	7.044,01
Crisópolis	18.241,00	4.742,66	6.715,61
Eunápolis	16.919,00	4.398,94	6.228,90
Belo Campo	16.500,00	4.290,00	6.074,64
Jaguaripe	16.009,00	4.162,34	5.893,87
Alcobaça	15.534,00	4.038,84	5.719,00

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

maior destaque, Laje e Itapicuru lideram o potencial energético, com capacidade para gerar juntos mais de 40 mil MWh/ano, seguidos por Vitória da Conquista, Maragogipe e Euclides da Cunha (*Tabela 5.13*)

O potencial de aproveitamento energético dos resíduos da mandioca pode ser observado em diversas regiões da Bahia, abrangendo diferentes Territórios de Identidade. Essa diversidade territorial evidencia a amplitude da cadeia da mandioca no estado e o papel estratégico que a valorização energética de seus resíduos pode exercer. Ao transformar um subproduto agrícola em fonte renovável de energia, esses municípios têm a oportunidade de fortalecer suas economias locais, gerar emprego e renda, e ainda contribuir para a transição energética e a sustentabilidade no campo.

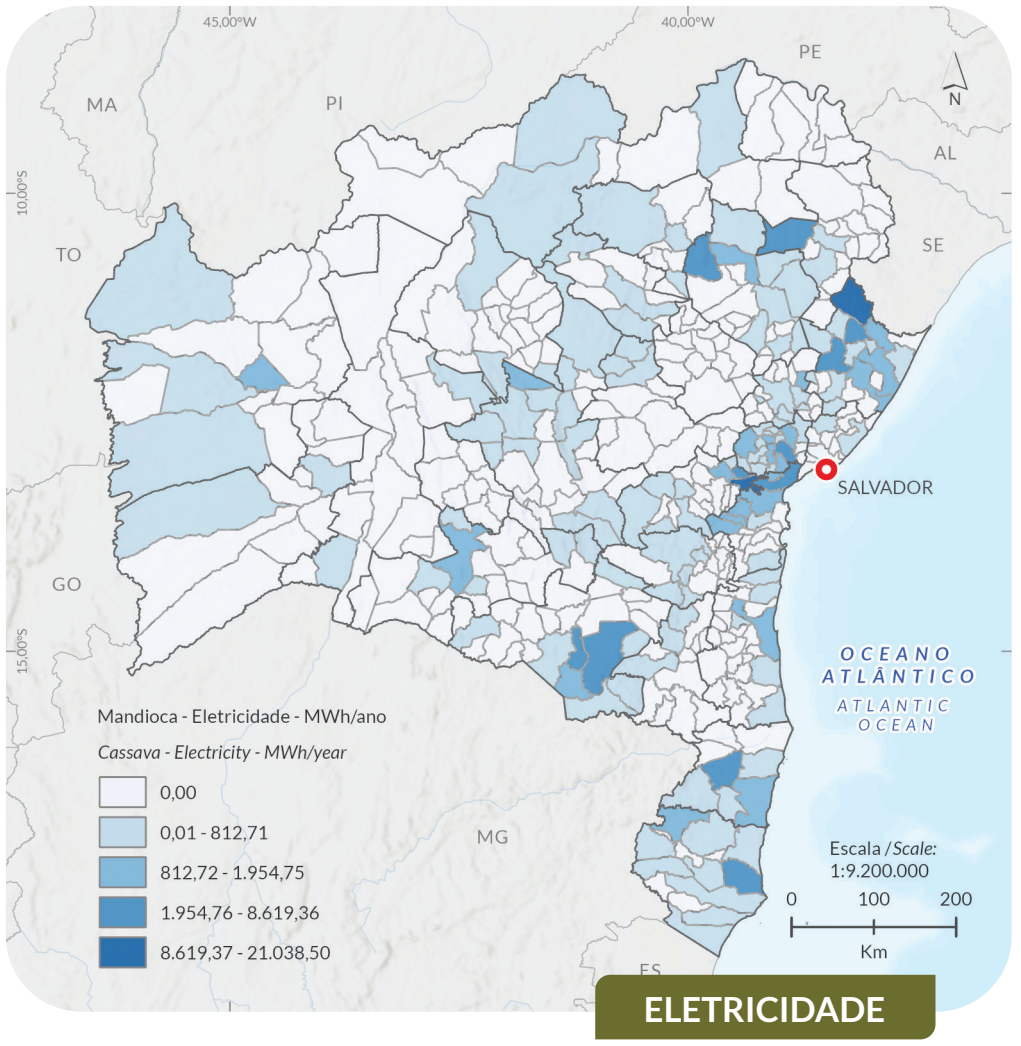
nent municipalities, Laje and Itapicuru lead in energy potential, with a combined capacity to generate over 40,000 MWh/year, followed by Vitória da Conquista, Maragogipe, and Euclides da Cunha (Table 5.13)

The potential for energy use of cassava residues can be observed in several regions of Bahia, spanning different Identity Territories. This territorial diversity highlights the breadth of the cassava supply chain in the state and the strategic role that the energy recovery of its residues can play. By transforming an agricultural byproduct into a renewable energy source, these municipalities have the opportunity to strengthen their local economies, generate jobs and income, and contribute to the energy transition and sustainability in the countryside.

Mapa 5.10 / *Map 5.10*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS DO CULTIVO DE MANDIOCA (RAMAS) (MWh/ANO)

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM CASSAVA CULTIVATION RESIDUES (STEMS) (MWh/YEAR)



Salvador / *State Capital*
Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*
Limite municipal / *Municipal boundary*
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

ELETRICIDADE
ELECTRICITY

5.5.11 RESÍDUOS DO MILHO: POTENCIAL ENERGÉTICO EM ESCALA ESTADUAL

O milho é uma das culturas agrícolas mais relevantes para o Estado da Bahia. Em 2023, a produção estadual alcançou 3,1 milhões de t, representando 2,3% da produção nacional. No mesmo período, a produtividade média no Estado foi de 4,75 t/ha, abaixo da média nacional, que foi de 5,9 t/ha. A área colhida totalizou 651 mil ha, movimentando cerca de R$ 2,94 bilhões em valor de produção [9].

Diante da expressiva produção do grão no Estado, torna-se pertinente avaliar o potencial de aproveitamento energético de seus resíduos agrícolas. A colheita do milho gera considerável volume de biomassa residual, como palha e sabugo, que possuem características adequadas para aproveitamento energético, seja na forma de biocombustíveis sólidos, produção de biogás ou cogeração de energia elétrica e térmica. Embora a produção esteja distribuída por diversas regiões do Estado, observa-se maior concentração nos territórios de identidade da Bacia do Rio Grande, Bacia do Rio Corrente, Semiárido Nordeste II.

Estimou-se que, com uma produção total de mais de 3 milhões de t de milho em grão em 2023, a região produz cerca de 2,08 milhões de t de resíduos anualmente que podem ser convertidas em energia, resultando em um potencial de geração estimado em quase 3 milhões de MWh. São Desidério lidera com o maior potencial, com mais de 375 mil toneladas de resíduos e capacidade para produzir 553 GWh/ano de energia elétrica *(Tabela 5.14)*.

Em 2024 foi anunciada a construção de uma biorrefinaria na cidade de Luiz Eduardo Magalhães, um local estratégico, que irá processar o milho para produção de etanol (anidro, hidratado e neutro). Essa biorrefinaria prevê a produção de 460 milhões de litros por ano de etanol, 230 mil t de grãos com potencial de uso na alimentação animal, 23 mil t de óleo vegetal e 200 GWh ao ano de energia elétrica [46]. Esse empreendimento representa um marco para a valorização da cadeia produtiva do milho na Bahia e pode também estimular o aproveitamento energético de outros resíduos agrícolas associados à cultura, como a palha. A consolidação dessa infraestrutura pode servir de base para iniciativas que integrem o uso de biomassa residual, ampliando os benefícios econômicos e ambientais para a região.

Figura 5.15 Área de milho após a colheita, com palhada residual.
Figure 5.15 *Harvested corn field with remaining straw residues.*



Foto / *Photo*: Jacob Mathers / stock.adobe.com

Tabela 5.14 Dez municípios com maior potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos da colheita do milho.
Table 5.14 *Ten municipalities with the highest electricity generation potential from corn harvest residues.*

Munícipio *Municipality*	Milho em grão produzido (t/ano) *Corn grain produced (t/year)*	Resíduo de milho (colmo, folha e palha) (t/ano) *Corn residue (stalk, leaves and straw) (t/year)*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*
Total	**3.097.058,00**	**2.081.222,98**	**2.999.788,80**
Total 10+	**2.467.474,00**	**1.658.142,53**	**2.442.443,94**
São Desidério	558.649,00	375.412,13	552.982,06
Correntina	443.292,00	297.892,22	438.795,25
Formosa do Rio Preto	318.080,00	213.749,76	314.853,40
Jaborandi	239.479,00	160.929,89	237.049,73
Barreiras	205.978,00	138.417,22	203.888,56
Paripiranga	171.000,00	114.912,00	169.265,38
Luís Eduardo Magalhães	154.844,00	104.055,17	153.273,26
Cocos	135.048,00	90.752,26	133.678,07
Adustina	122.000,00	81.984,00	120.762,43
Riachão das Neves	119.104,00	80.037,89	117.895,81

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

5.5.11 CORN RESIDUES: ENERGY POTENTIAL AT THE STATE LEVEL

Corn is one of the most important agricultural crops for the State of Bahia. In 2023, state production reached 3.1 million t, representing 2.3% of national production. In the same period, the average productivity in the state was 4.75 t/ha, below the national average of 5.9 t/ha. The harvested area totaled 651,000 hectares, generating approximately BRL 2.94 billion in production value [9].

Given the state's significant corn production, it is important to assess the energy potential of its agricultural residues. Corn harvesting generates a considerable volume of residual biomass, such as straw and cob, which have characteristics suitable for energy use, whether in the form of solid biofuels, biogas production, or CHP. Although production is distributed across several regions of the state, the greatest concentration is observed in the identity territories of the Bacia do Rio Grande, Bacia do Rio Corrente and Semiárido Nordeste II.

It was estimated that, with a total production of over 3 million t of corn grain in 2023, the region produces approximately 2.08 million t of residues annually which can be converted into energy, resulting in a generation potential of nearly 3 million MWh. The municipality of São Desidério leads with the greatest potential, with more than 375,000 t of residue and capacity to produce 553 GWh/year of electrical energy (Table 5.14).

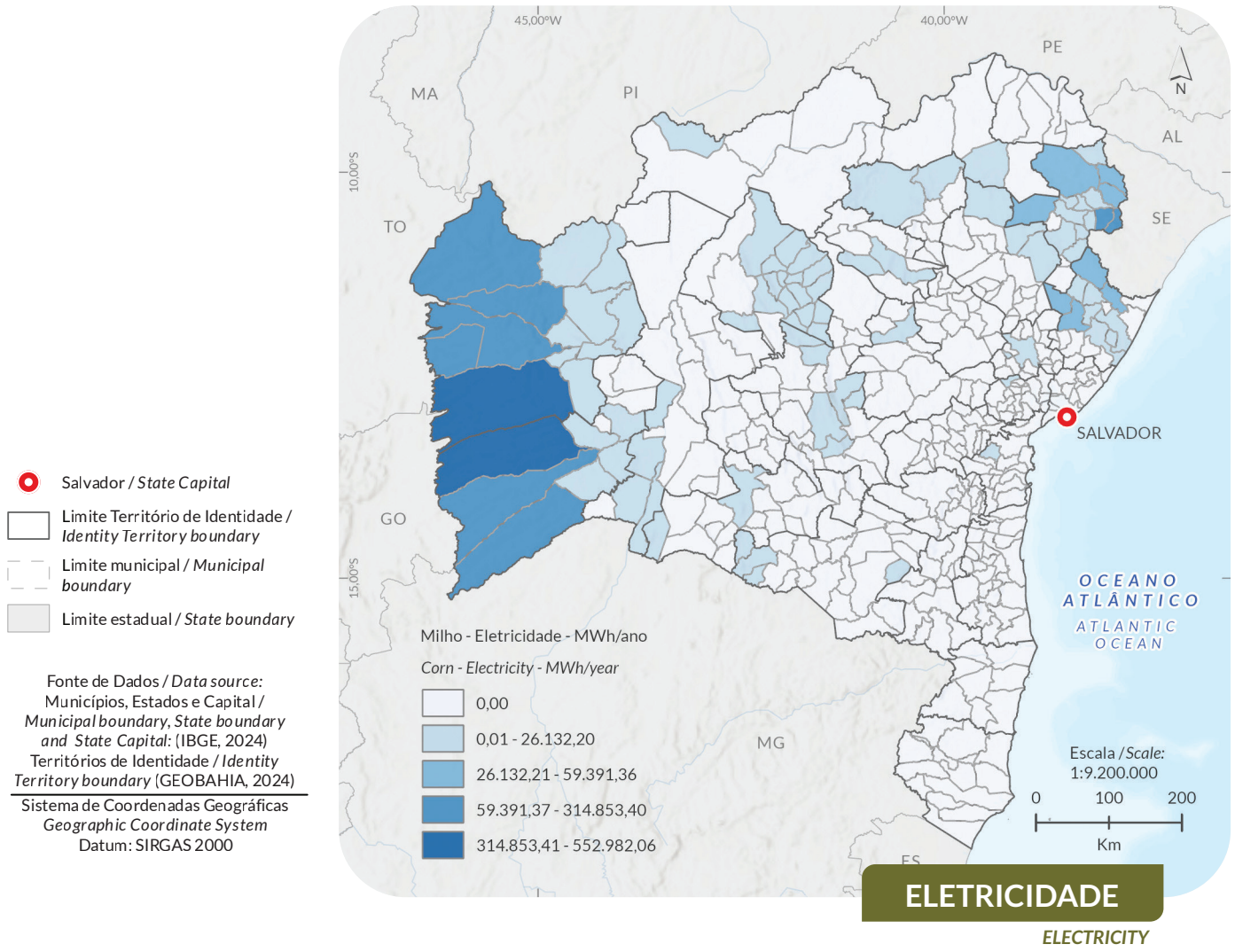
The municipalities with the highest potential for electricity generation from corn crop residues are predominantly located in western Bahia and in the Semiárido Nordeste II and Litoral Norte Identity Territories.

In 2024, the construction of a biorefinery was announced in the city of Luiz Eduardo Magalhães, a strategic location from processing corn into ethanol (anhydrous, hydrated, and neutral). This biorefinery is expected to produce 460 million liters of ethanol per year, 230,000 t of grains suitable for animal feed, 23,000 t of vegetable oil, and 200 GWh of electricity per year [46]. This project represents a milestone for the valorization of the corn production chain in Bahia and may also stimulate the energy use of other agricultural residues associated with the crop, such as straw. The consolidation of this infrastructure can serve as a foundation for initiatives that integrate the use of residual biomass, expanding the economic and environmental benefits for the region.

Mapa 5.11 / *Map 5.11*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DOS RESÍDUOS DA COLHEITA DE MILHO (MWh/ANO)

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM CORN HARVEST RESIDUES (MWh/YEAR)



5.5.12 SOYBEAN STRAW: ENERGY RECOVERY FROM AGRICULTURAL RESIDUES

In 2023, Bahia produced 7.78 million t of soybeans, accounting for 5.1% of national production. This output was harvested from an area of 1.92 million hectares, with an average yield of 4,043 kg per hectare, generating BRL 17.04 billion [9]. Soybeans are among the most important crops in Bahia's agribusiness, supported by a highly mechanized and productive system. The municipality of São Desidério was the state's largest producer, with 2.02 million t, equivalent to 26% of total state production.

Bahia stands out in Brazil for soybean production, driven by the favorable conditions of the Cerrado Biome. Approximately 40% of soybean production is destined for local industries, while 60% is exported to the European Union, China, Thailand, and Vietnam. This sector has boosted the regional economy, bringing benefits to the population. In addition, the Médio São Francisco region has great potential for irrigated soybean production, due to the water availability of the São Francisco and Grande rivers combined with the area's fertile soils. [47].

According to this study, 17 municipalities in the state have the potential to generate electricity from soybean residues. The municipalities with the greatest potential are São Desidério (885 GWh/year), Formosa do Rio Preto (827 GWh/year), and Luís Eduardo Magalhães (414 GWh/year) (Table 5.15).

5.5.12 PALHA DA SOJA: APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO RESÍDUO AGRÍCOLA

Em 2023, a Bahia produziu 7,78 milhões de t de soja, o que correspondeu a 5,1% da produção nacional. Essa quantidade foi colhida em uma área de 1,92 milhão de ha, com rendimento médio de 4.043 kg por ha e acabou movimentando de R$ 17,04 bilhões [9]. A soja representa uma das culturas mais relevantes do agronegócio baiano, com elevado grau de mecanização e produtividade. O município de São Desidério foi o maior produtor do estado, com 2,02 milhões de t, o equivalente a 26% da produção estadual.

A Bahia se destaca na produção de soja no Brasil, impulsionada pelas condições favoráveis do Bioma Cerrado. Aproximadamente, 40% da produção de soja é destinada às indústrias locais, enquanto 60% são exportados para a União Europeia, China, Tailândia e Vietnã. O setor tem impulsionado a economia regional, trazendo melhorias para a população. Além disso, a Região do Médio São Francisco apresenta grande potencial para a produção de soja irrigada, devido à disponibilidade hídrica dos rios São Francisco e Grande, aliada às terras férteis [47].

De acordo com este estudo, dezessete municípios no Estado possuem potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos da soja. As cidades com maior potencial de aproveitamento são São Desidério (885 GWh/ano), Formosa do Rio Preto (827 GWh/ano) e Luís Eduardo Magalhães (414 GWh/ano) (*Tabela 5.15*).

Os principais municípios produtivos verificados estão relativamente próximos uns dos outros, especialmente São Desidério, Luís Eduardo Magalhães, Barreiras e Correntina, que formam um eixo produtivo na Região Oeste da Bahia. Essa proximidade poderia facilitar a logística de transporte dos resíduos agrícolas até uma possível unidade de processamento. Formosa do Rio Preto, apesar de também ter um grande potencial, está um pouco mais afastado, mas ainda pode estar dentro de uma zona viável para integração logística (cabe aqui um estudo específico para verificar a viabilidade logística do transporte desses resíduos).

Os municípios de Luís Eduardo Magalhães e Barreiras se destacam como locais estratégicos para a instalação de uma usina centralizada, devido à infraestrutura agrícola consolidada, boas conexões rodoviárias e localização privilegiada no eixo produtivo regional. Um polo único nessas cidades poderia permitir o escoamento eficiente da biomassa dos municípios vizinhos, reduzindo custos operacionais e maximizando o aproveitamento energético.

Tabela 5.15 Dez municípios com maior potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos da colheita da soja (palha).
Table 5.15 *Ten municipalities with the highest electricity generation potential from soybean harvest residues (straw).*

Munícipio *Municipality*	Soja produzida (t/ano) *Soybean produced (t/year)*	Resíduo (t/ano) *Residue (t/year)*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*
Total	**7.775.189,00**	**2.799.068,04**	**3.396.606,08**
Total 10+	**7.747.080,00**	**2.788.948,80**	**3.388.572,79**
São Desidério	2.023.920,00	728.611,20	885.262,61
Formosa do Rio Preto	1.891.742,00	681.027,12	827.447,95
Luís Eduardo Magalhães	946.721,00	340.819,56	414.095,77
Barreiras	890.175,00	320.463,00	389.362,55
Correntina	828.248,00	298.169,28	362.275,68
Riachão das Neves	549.626,00	197.865,36	240.406,41
Jaborandi	440.838,00	158.701,68	192.822,54
Cocos	94.802,00	34.128,72	41.466,39
Baianópolis	65.360,00	23.529,60	28.588,46
Serra do Ramalho	15.648,00	5.633,28	6.844,44

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

The main productive municipalities identified are relatively close to each other, particularly São Desidério, Luís Eduardo Magalhães, Barreiras, and Correntina, which together form a production hub in western Bahia. This proximity could facilitate the logistics of transporting agricultural residues to a potential processing plant. Formosa do Rio Preto, while also having significant potential, is a little further away but may still be within a viable area for logistical integration (a specific study is warranted here to assess the logistical feasibility for transporting this residue).

The municipalities of Luís Eduardo Magalhães and Barreiras stand out as strategic locations for a centralized plant, due to their established agricultural infrastructure, good road connections, and central position within the regional production hub. Establishing a single hub in these cities could enable the efficient flow of biomass from neighboring municipalities, reducing operating costs and maximizing energy use.

Figura 5.16 Colheita mecanizada de soja.
Figure 5.16 *Mechanized soybean harvesting.*

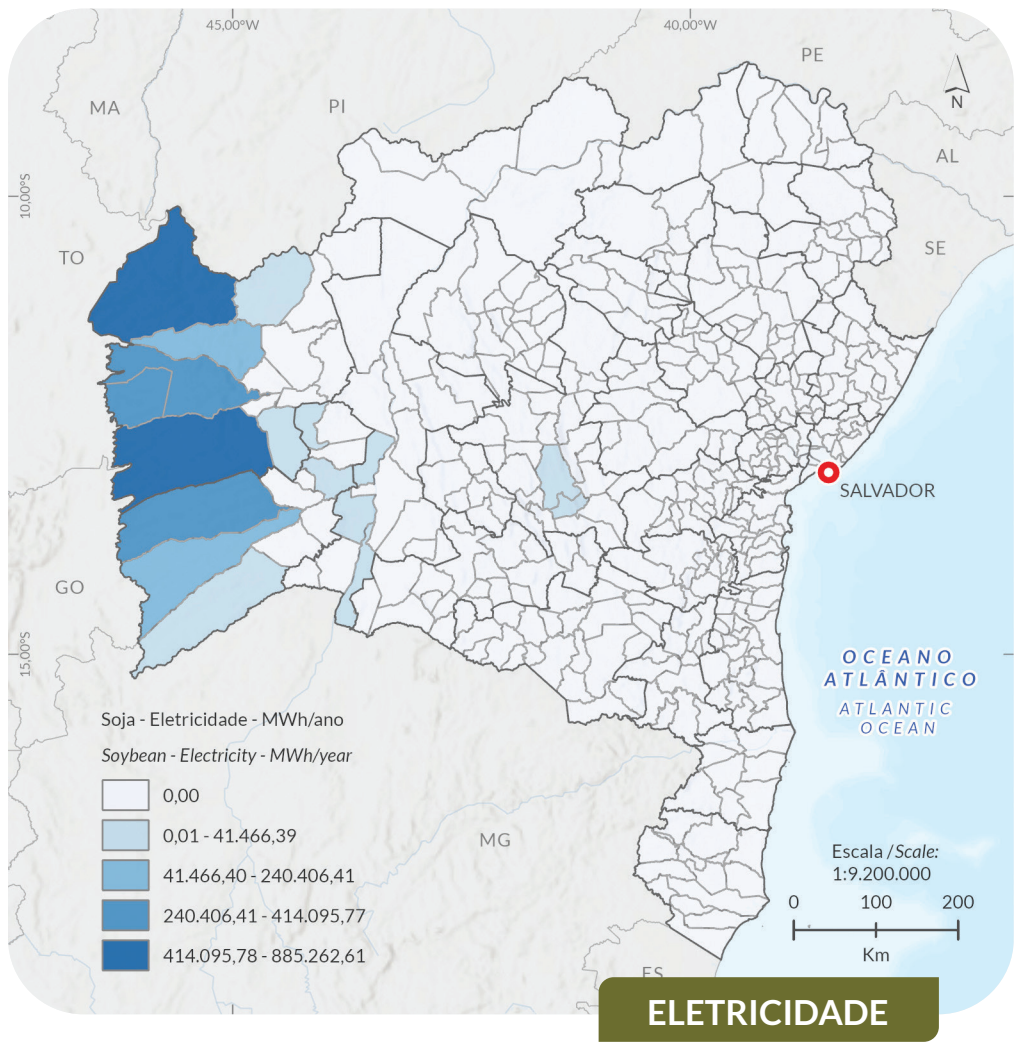


Foto / *Photo:* Patricio / stock.adobe.com

Mapa 5.12 / *Map 5.12*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS DA SOJA (PALHA) (MWh/ANO)

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM SOYBEAN AGRICULTURAL RESIDUES (STRAW) (MWh/YEAR)



ELETRICIDADE
ELECTRICITY

5.6 ANALYSIS OF THE TECHNICAL POTENTIAL AND IMPLICATIONS FOR BIOENERGY FROM AGRICULTURAL RESIDUES IN BAHIA

The results demonstrate a strong concentration of the technical potential electricity generation from agricultural residues in municipalities of western Bahia (when considering all crops within the scope of this document), particularly in the Bacia do Rio Grande and Bacia do Rio Corrente Identity Territories. These territories, characterized by high agricultural productivity and intensive mechanization, are notable for the large-scale cultivation of soybeans and corn, which constitute the main sources of biomass with energy potential in the region.

The municipality of São Desidério has the highest estimated potential (2.1 million MWh/year), followed by Formosa do Rio Preto and Correntina, with 1.4 million and 1 million MWh/year, respectively. These values reflect not only the volume of agricultural production but also the territorial concentration of activity, which enhances the logistical viability of energy utilization projects. In addition to the major agricultural hubs of western Bahia, other municipalities such as Juazeiro in the Sertão do São Francisco Identity Territory, and Paripiranga and Adustina in the Semiárido Nordeste II Identity Territory, also stand out (Table 5.16)

The combined potential for electricity generation from agricultural residues analyzed in this study is estimated at 9,465.52 GWh/year for the State of Bahia. The ten municipalities with the largest potentials, listed in Table 5.16, account for 7,634.24 GWh/year, representing 80% of the estimated total. Although the greatest potential is concentrated in areas with established agribusiness, significant opportunities exist in other regions, especially when considering the diversification of agricultural residue sources.

Overall, the results reinforce Bahia's significant potential for energy recovery from agricultural residues, especially in regions with concentrated production and proximity between municipalities. This scenario supports the adoption of shared solutions, such as the establishment of regional energy conversion hubs, capable of optimizing logistics, reducing costs, and increasing the technical and economic viability of projects. Utilizing these agricultural residues not only contributes to the diversification of the state's energy mix but also promotes sustainable development, income generation, and strengthening local production chains.

Mapping municipal technical potential provides a solid foundation for formulating public policies, attracting investment, and developing projects focused on decentralized energy generation, agricultural residue utilization, and the sustainability of Bahia's energy mix.

It is important to emphasize that the values presented represent technical potential, estimated based on the specific methodological assumptions adopted in this study. The practical feasibility of implementing generation units requires detailed technical studies that take into account variables such as production seasonality, continuous availability of agricultural residues, implementation and operating costs, environmental impacts, social acceptance, and the regulatory framework.

Furthermore, the formation of local cooperatives for the collection, management, and commercialization of agricultural residues emerge as a promising strategy to strengthen the regional economy, promote productive inclusion, and ensure the sustainability of the process. These cooperatives can work in partnership with rural producers, textile industries, and municipal governments, enabling innovative business models based on the bioeconomy.

It is also recommended to promote the development of public policies aimed at the energy recovery of agro-industrial residues, including tax incentives, dedicated financing lines, and technical assistance. Coordination among the public sector, private enterprises, and research institutions will be essential to turn the identified potential into a tangible reality for distributed generation, with positive impacts on the energy mix, the environment, and the socioeconomic development of the semi-arid region.

Although residues from crops such as sisal, castor bean, sorghum, and various fruits and legumes present energy potential and socioeconomic relevance, this study did not estimate their electricity generation due to the scarcity or insufficiency of technical data, uncertainties in residue characterization, and the production scale of by-products. Nevertheless, the importance of these crops for bioenergy is emphasized, along with the need for future studies supported by more detailed data.

5.6 ANÁLISE DO POTENCIAL TÉCNICO E IMPLICAÇÕES PARA A BIOENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS NA BAHIA

Os resultados evidenciam uma forte concentração do potencial técnico de geração de eletricidade a partir de resíduos agrícolas em municípios localizados no Oeste da Bahia (quando consideradas todas as culturas dentro do escopo deste documento), especialmente nos Territórios de Identidade Bacia do Rio Grande e Bacia do Rio Corrente. Esses territórios, caracterizados por alta produtividade agrícola e uso intensivo de mecanização, destacam-se pelo cultivo em larga escala de soja e milho, que são também as principais fontes de resíduos com potencial energético na região.

São Desidério é o município com maior potencial estimado (2,1 milhões de MWh/ano), seguido por Formosa do Rio Preto e Correntina, com 1,4 milhão e 1 milhão de MWh/ano, respectivamente. Esses valores refletem não apenas o volume de produção agrícola, mas também a concentração territorial da atividade, o que favorece a viabilidade logística para projetos de aproveitamento energético. Além dos grandes polos agrícolas do Oeste baiano, outros municípios como Juazeiro, no Sertão do São Francisco, e Paripiranga e Adustina, no Semiárido Nordeste II, também se destacam (*Tabela 5.16*).

A soma dos potenciais de geração de eletricidade a partir dos resíduos analisados neste estudo indica um total de 9.465,52 GWh/ano para o Estado da Bahia. Apenas os dez maiores potenciais, listados na *Tabela 5.16* correspondem a 7.634,24 GWh/ano, o que representa 80% do total estimado. Embora o maior potencial esteja concentrado em áreas de agronegócio consolidado, há oportunidades relevantes em outras regiões, especialmente quando se considera a diversificação das fontes de resíduos.

De maneira geral, os resultados obtidos reforçam o alto potencial da Bahia para o aproveitamento energético de resíduos agrícolas, especialmente em regiões em que há concentração produtiva e proximidade entre municípios. Esse cenário favorece a adoção de soluções compartilhadas, como a instalação de polos regionais para conversão energética, capazes de otimizar a logística, reduzir custos e ampliar a viabilidade técnica e econômica dos projetos. A valorização desses resíduos não apenas contribui para a diversificação da matriz energética estadual, como também promove desenvolvimento sustentável, geração de renda e fortalecimento das cadeias produtivas locais.

O mapeamento do potencial técnico municipal oferece uma base sólida para a formulação de políticas públicas, atração de investimentos e desenvolvimento de projetos voltados à geração descentralizada de energia, à valorização de resíduos e à sustentabilidade da matriz energética baiana.

É importante destacar que os valores apresentados representam um potencial técnico, estimado com base em premissas metodológicas específicas adotadas neste estudo. A viabilização prática da instalação de unidades geradoras exige a realização de estudos técnicos aprofundados, que considerem variáveis como sazonalidade da produção, disponibilidade contínua dos resíduos, custos de implementação e operação, impacto ambiental, aceitação social e enquadramento regulatório.

Além disso, a formação de cooperativas locais para a coleta, gestão e comercialização dos resíduos surge como uma estratégia promissora para fortalecer a economia regional, promover a inclusão produtiva e garantir a sustentabilidade do processo. Essas cooperativas podem atuar em parceria com produtores rurais, indústrias têxteis e prefeituras, viabilizando modelos de negócio inovadores baseados na bioeconomia.

Recomenda-se também o estímulo à elaboração de políticas públicas voltadas ao aproveitamento energético de resíduos agroindustriais, com incentivos fiscais, linhas de financiamento específicas e assistência técnica. A articulação entre o poder público, setor privado e instituições de pesquisa será essencial para transformar o potencial identificado em realidade concreta de ge-

Tabela 5.16 Municípios com maior potencial técnico de geração de eletricidade a partir de resíduos (MWh/ano) considerando o total de todas as culturas e principal fonte de resíduos do município.
Table 5.16 *Municipalities with the highest technical potential for electricity generation (MWh/year), considering all crops and the municipality's main residue source.*

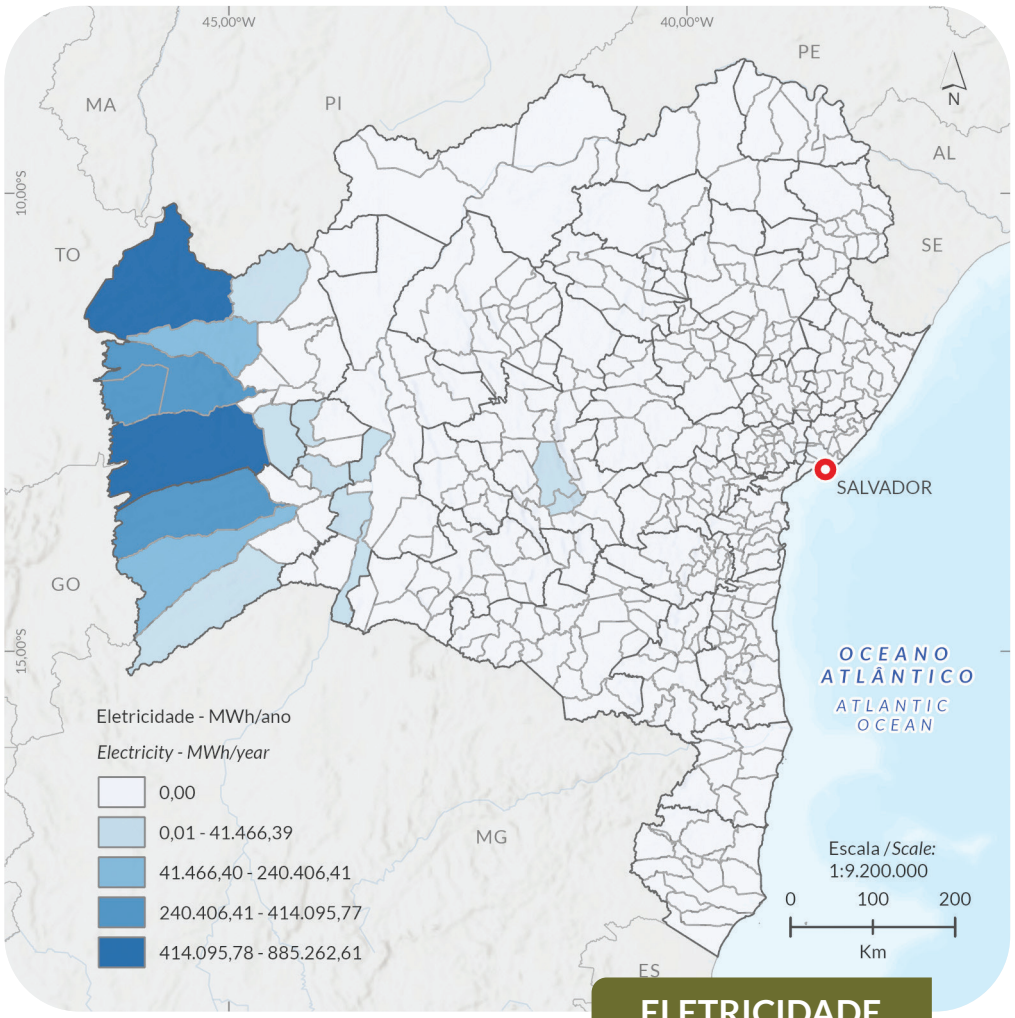
Munícipio *Municipality*	Território de Identidade *Identity Territory*	Potencial de geração de eletricidade (MWh/ano) *Potential for electricity generation (MWh/year)*	Principal cultura fonte de resíduos do município *Main crop source of residues in the municipali*
São Desidério	Bacia do Rio Grande	2.129.749,73	Soja / *Soybean*
Formosa do Rio Preto	Bacia do Rio Grande	1.437.562,65	Soja / *Soybean*
Correntina	Bacia do Rio Corrente	1.039.300,99	Milho / *Corn*
Barreiras	Bacia do Rio Grande	753.098,59	Soja / *Soybean*
Luís Eduardo Magalhães	Bacia do Rio Grande	671.348,05	Soja / *Soybean*
Riachão das Neves	Bacia do Rio Grande	544.706,73	Soja / *Soybean*
Jaborandi	Bacia do Rio Corrente	532.174,38	Milho / *Corn*
Cocos	Bacia do Rio Corrente	207.831,18	Milho / *Corn*
Paripiranga	Semiárido Nordeste II	169.265,38	Milho / *Corn*
Juazeiro	Sertão do São Francisco	162.806,55	Cana-de-açúcar / *Sugarcane*
Adustina	Semiárido Nordeste II	121.896,63	Milho / *Corn*

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

Mapa 5.13 / *Map 5.13*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE CONSIDERANDO TODOS OS RESÍDUOS AGRÍCOLAS INCLUÍDOS NO ESTUDO (MWh/ANO)

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM ALL AGRICULTURAL RESIDUES INCLUDED IN THE STUDY (MWh/YEAR)



Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

ELETRICIDADE

ELECTRICITY

Figura 5.17 Área de produção colhida com palhada residual e armazéns de grãos ao fundo.
Figure 5.17 *Harvested crop area with straw residues and grain storage structures in the background.*

ração distribuída, com impactos positivos na matriz energética, no meio ambiente e no desenvolvimento socioeconômico do semiárido baiano.

Embora resíduos de culturas como sisal, mamona, sorgo e diversas frutas e leguminosas apresentem potencial energético e importância socioeconômica, este estudo não estimou sua geração de energia elétrica devido à escassez ou insuficiência de dados técnicos, incertezas na caracterização dos resíduos e na escala de produção dos subprodutos. Ainda assim, destaca-se a relevância dessas culturas para a bioenergia e a necessidade de estudos futuros com dados mais detalhados.



Foto / *Photo*: songwut / stock.adobe.com

RESÍDUOS DA COLHEITA NA FRUTICULTURA BAIANA: VOLUME ESTIMADO E CONCENTRAÇÃO REGIONAL

HARVEST RESIDUES IN STATE FRUIT FARMING: ESTIMATED VOLUME AND REGIONAL CONCENTRATION

Apesar de ser um dos maiores produtores de frutas, o Brasil enfrenta grandes perdas pós-colheita por falhas no transporte, tratamento e refrigeração, resultando no descarte de toneladas de alimentos [48]. Estima-se que de 20% a 40% da produção se percam entre a colheita e o consumo [49].

Ao considerarmos que cerca de 10% do peso total produzido das frutas analisadas correspondem a resíduos gerados durante a colheita (valor que pode variar conforme o tipo de fruta, práticas de manejo e condições de produção), verifica-se que, entre as frutas e leguminosas, a banana apresenta o maior volume estimado de resíduos (86.256 t/ano), embora apenas 52% desse total esteja concentrado nos dez maiores municípios produtores *(Tabela 5.17)*. Em contraste, culturas como a batata-inglesa e a uva apresentam uma concentração total (100%) nos principais polos produtores, indicando uma maior centralização da produção. A manga também se destaca, com um alto volume de resíduos (70.417 t/ano), sendo 92% desse total gerado por apenas dez municípios.

A análise da estimativa de resíduos da colheita de frutas por município na Bahia revela forte concentração em determinadas regiões produtoras. Juazeiro lidera com 50.700 t de resíduos, representando 12,5% do total estadual, impulsionado principalmente pela produção de manga *(Tabela 5.18)*. Em seguida, destacam-se os municípios da Chapada Diamantina, como Mucugê e Ibicoara, com foco na batata-inglesa, responsáveis por 7,4% e 7,0% dos resíduos, respectivamente. Outros polos importantes incluem Rio Real, com destaque para a laranja, e Bom Jesus da Lapa, onde a banana é a principal fonte de resíduos.

Os dez municípios com maior potencial de geração de resíduos de frutas respondem por 52% do total estimado no Estado da Bahia. A grande maioria dos municípios (347) apresenta uma produção inferior a 1.000 t anuais de resíduos, enquanto 56 municípios estão na faixa entre 1.000 e 5 mil t; 6 municípios, entre 5 mil e 10 mil t; 4 municípios, entre 10 mil e 25 mil t; e apenas 4 superam a marca de 25 mil t anuais. Entre esses últimos, destacam-se Juazeiro, com o maior volume estimado do Estado (50.700 t/ano), seguido por Mucugê (29.900 t/ano), Ibicoara (28.500 t/ano) e Rio Real (26.500 t/ano).

Frutas descartadas ao longo da cadeia produtiva apresentam características físico-químicas favoráveis à produção de biogás, tornando-se uma matéria-prima promissora para a valorização energética. Além da ampla disponibilidade de frutas perdidas na colheita ou rejeitadas pelo comércio, destaca-se o potencial de gerar benefícios ambientais, como a mitigação das emissões de metano em aterros e a produção de biofertilizantes por meio da biodigestão [50,51]. Nesse contexto, biodigestores de pequeno porte

Tabela 5.17 Estimativa da geração de resíduos da colheita de frutas no Estado da Bahia e concentração nos dez maiores produtores.
Table 5.17 *Estimated generation of fruit harvest residues in the State of Bahia and concentration in the ten largest producers.*

Cultura *Crop*	Total estimado de resíduos (10% da produção) (t/ano) *Estimated total residues (10% of production) (t/year)*	Total estimado para os dez municípios com maior geração de resíduos (t/ano) *Estimated total for the 10 largest producers (t/year)*	Participação dos 10 maiores produtores na geração total do estado *Share of the 10 largest producers in the State's total generation*
Banana	86.256,80	44.965,40	52%
Manga / *Mango*	70.417,30	65.054,50	92%
Laranja / *Orange*	61.008,40	52.329,40	86%
Batata-inglesa / *Potato*	38.938,50	38.938,50	100%
Mamão / *Papaya*	35.452,50	23.146,60	65%
Tomate / *Tomato*	34.319,50	27.039,20	79%
Maracujá / *Passion fruit*	25.385,70	16.863,90	66%
Melancia / *Watermelon*	23.000,60	12.079,30	53%
Melão / *Melon*	8.534,10	8.298,10	97%
Limão / *Lemon*	8.046,70	6.178,00	77%
Uva / *Grape*	7.297,60	7.292,30	100%
Goiaba / *Guava*	4.513,50	4.020,70	89%
Tangerina / *Tangerine*	1.399,80	1.053,90	75%

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

Tabela 5.18 Municípios baianos com maior geração estimada de resíduos da colheita de frutas e principais culturas associadas.
Table 5.18 *Bahia municipalities with the highest estimated generation of fruit harvest residues and main associated crops.*

Município *Municipality*	Território de identidade *Identity Territory*	Total estimado de resíduos (t/ano) *Estimated total residues (t/year)*	% em relação ao Estado *% in relation to the State*	Resíduo principal *Main residue*
Juazeiro	Sertão do São Francisco	50.707,60	12,5%	Manga / Mango
Mucugê	Chapada Diamantina	29.945,20	7,4%	Batata-inglesa / Potato
Ibicoara	Chapada Diamantina	28.505,50	7,0%	Batata-inglesa / Potato
Rio Real	Litoral Norte e Agreste Baiano	26.562,70	6,6%	Laranja / Orange
Bom Jesus da Lapa	Velho Chico	17.852,60	4,4%	Banana
Casa Nova	Sertão do São Francisco	17.588,50	4,3%	Manga / Mango
Inhambupe	Litoral Norte e Agreste Baiano	13.291,50	3,3%	Laranja / Orange
Livramento de Nossa Senhora	Sertão Produtivo	10.313,70	2,5%	Manga / Mango
Curaçá	Sertão do São Francisco	7.960,80	2,0%	Manga / Mango
Barra da Estiva	Chapada Diamantina	6.553,00	1,6%	Maracujá / Passion fruit

Fonte: Elaborada pelos autores (2025). / *Source: Prepared by the authors (2025).*

surgem como alternativa viável para pequenos produtores rurais na Bahia, especialmente em áreas isoladas sem acesso a sistemas de esgotamento sanitário, onde os resíduos são frequentemente descartados sem aproveitamento. A adoção desses sistemas pode promover o acesso à energia renovável e o manejo sustentável dos resíduos. A criação de linhas de crédito específicas pode viabilizar essa solução em escala, incentivando tecnologias adequadas às realidades locais e fortalecendo a agricultura familiar no processo de transição energética [52].

Despite being one of the largest fruit producers, Brazil faces significant post-harvest losses due to inefficiencies in transportation, treatment and refrigeration, resulting in the disposal of tons of fruits [48]. It is estimated that 20% to 40% of production is lost between harvest and consumption [49].

Considering that approximately 10% of the total weight of the fruits analyzed corresponds to harvest residues (a value that may vary depending on the type of fruit, management practices, and production conditions), it is observed that among fruits and legumes, bananas have the largest estimated volume of residues (86,256 t/year), although only 52% of this total is concentrated in the ten largest producing municipalities (Table 5.17). In contrast, crops such as potatoes and grapes show complete concentration (100%) in the main production centers, indicating a greater centralization of production. Mangoes also stand out, with a high volume of residues (70,417 t/year), with 92% of this total generated by just ten municipalities.

An analysis of estimated fruit harvest residues by municipality in Bahia reveals a strong concentration in specific producing regions. Juazeiro leads with 50,700 t of residues, representing 12.5% of the state total, driven primarily by mango production (Table 5.18). Next in line are the municipalities of Chapada Diamantina Identity Territory, including municipalities such as Mucugê and Ibicoara, where potato production predominates, accounting for 7.4% and 7.0% of the residues, respectively. Other important centers include Rio Real, where orange production predominates, and Bom Jesus da Lapa, where bananas are the main source of residues.

The ten municipalities with the greatest potential for generating fruit harvest residues account for 52% of the estimated total in the State of Bahia. Most municipalities (347) produce less than 1,000 t of residues annually, while 56 produce between 1,000 and 5,000 t; 6 municipalities produce between 5,000 and 10,000 t; 4 municipalities produce between 10,000 and 25,000 t; and only 4 produce more than 25,000 t annually. Among these, Juazeiro stands out, with the largest estimated residue volume in the state (50,700 t/year), followed by Mucugê (29,900 t/year), Ibicoara (28,500 t/year), and Rio Real (26,500 t/year).

Fruit discarded along the production chain has physicochemical properties favorable to biogas generation, making it a promising feedstock for energy recovery. In addition to the widespread availability of harvest residues or market-rejected fruit, these residues also have the potential to generate environmental benefits, such as mitigating methane emissions from landfills and producing biofertilizers through anaerobic digestion [50,51]. In this context, small-scale biodigesters emerge as a viable alternative for small rural producers in Bahia, especially in isolated areas without access to sewage systems, where residues are often discarded without use. The adoption of these systems can promote access to renewable energy and sustainable residue management. The creation of specific credit lines can make this solution viable at scale, encouraging technologies suited to local realities and strengthening family farming in the energy transition process [52].

5.7 OPORTUNIDADES E DESAFIOS DA BIOENERGIA NA AGRICULTURA BAIANA

O estudo apresentado demonstra que a valorização energética dos resíduos agrícolas na Bahia representa uma oportunidade estratégica para promover a sustentabilidade, diversificar a matriz energética e impulsionar o desenvolvimento socioeconômico no estado. Os resultados evidenciam um potencial técnico significativo, com estimativa de geração de, 9.465,52 GWh/ano a partir dos resíduos analisados, destacando-se as culturas de soja, milho, algodão e cana-de-açúcar como as principais fontes de biomassa residual.

A análise revelou uma forte concentração territorial desse potencial, especialmente no Oeste baiano, onde municípios como São Desidério, Formosa do Rio Preto e Correntina se destacam devido à alta produtividade agrícola e à infraestrutura consolidada. No entanto, outras regiões, como o Extremo Sul, o Recôncavo e o Semiárido, também apresentam oportunidades relevantes, especialmente para culturas como cacau, café, banana e mandioca, que possuem cadeias produtivas bem estabelecidas e volumes expressivos de resíduos.

A viabilidade econômica de empreendimentos dessa natureza depende de fatores como escala de produção, distância média de transporte, custos de coleta e processamento, preço da energia e disponibilidade de incentivos. Grandes usinas podem alcançar menores custos específicos de geração, enquanto iniciativas descentralizadas tendem a se beneficiar de menores custos logísticos e de benefícios socioeconômicos locais. Entretanto, barreiras importantes precisam ser superadas: dispersão geográfica da produção, sazonalidade acentuada de algumas culturas, limitações na infraestrutura de coleta e armazenamento e escassez de mão de obra qualificada

Além disso, políticas públicas direcionadas, como incentivos fiscais, linhas de financiamento e programas de assistência técnica, são essenciais para fomentar a adoção dessas práticas. A integração entre pesquisa, extensão rural e iniciativas locais também é fundamental para desenvolver tecnologias adaptadas às realidades regionais e garantir a inclusão de pequenos e médios produtores.

A valorização energética dos resíduos agrícolas na Bahia alinha-se aos princípios da economia circular, contribuindo para a redução de emissões de gases de efeito estufa, a melhoria da gestão de resíduos e a geração de energia limpa e descentralizada. Para transformar esse potencial em realidade, é necessária uma abordagem integrada, envolvendo todos os atores da cadeia produtiva, com o objetivo de construir um modelo de desenvolvimento rural mais sustentável e resiliente. Este estudo serve como base para futuras investigações e ações práticas, reforçando o papel da Bahia como protagonista na transição para uma bioeconomia de baixo carbono. Por fim, com investimentos direcionados, articulação entre setores e planejamento regional, a Bahia tem potencial para se tornar referência nacional no uso de resíduos agroindustriais como fonte renovável de energia, promovendo desenvolvimento sustentável e inclusão socioeconômica.

5.7 OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF BIOENERGY IN STATE AGRICULTURE

The study demonstrates that energy recovery from agricultural residues in Bahia represents a strategic opportunity to foster sustainability, diversify the energy mix, and promote the state's socioeconomic development. The results demonstrate significant technical potential, with an estimated generation of 9,465.52 GWh/year from the agricultural residues analyzed, with soybean, corn, cotton, and sugarcane crops standing out as the main sources of residual biomass.

The analysis revealed a strong territorial concentration of this potential, especially in western Bahia, where municipalities such as São Desidério, Formosa do Rio Preto, and Correntina stand out due to their high agricultural productivity and consolidated infrastructure. However, some the Identity Territories, such as the Extremo Sul, Recôncavo and Semiárido Nordeste II, also present significant opportunities, especially for crops such as cocoa, coffee, bananas, and cassava, which have well-established production chains and significant volumes of residues.

The economic viability of such projects depends on factors such as production scale, average transportation distance, collection and processing costs, energy prices, and the availability of incentives. Large plants can achieve lower specific generation costs, while decentralized initiatives tend to benefit from lower logistical costs and local socioeconomic benefits. However, significant barriers must be overcome, including the geographic dispersion of production, the pronounced seasonality of some crops, limitations in collection and storage infrastructure, and a shortage of skilled labor.

Furthermore, targeted public policies, such as tax incentives, financing lines, and technical assistance programs, are essential to foster the adoption of these practices. Integration between research, rural extension, and local initiatives is also crucial to develop technologies adapted to regional realities and ensure the inclusion of small and medium-sized producers.

The energy recovery of agricultural residues in Bahia aligns with the principles of the circular economy, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions, the improvement of residues management, and the generation of clean, decentralized energy. Turning this potential into reality requires an integrated approach involving all stakeholders in the production chain, with the goal of building a more sustainable and resilient rural development model. This study serves as a basis for future research and practical actions, reinforcing Bahia's role as a protagonist in the transition to a low-carbon bioeconomy. Finally, with targeted investments, cross-sector coordination, and regional planning, Bahia has the potential to become a national reference for the use of agro-industrial residues as a renewable energy source, promoting sustainable development and socioeconomic inclusion.

Atlas Bioenergia Bahia

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DO SETOR FLORESTAL NA BAHIA

ENERGY RECOVERY FROM FORESTRY RESIDUES IN BAHIA

6.1 INTRODUÇÃO

O setor florestal exerce um papel fundamental na economia brasileira, destacando-se principalmente na produção de celulose, papel, carvão vegetal e madeira oriunda de florestas cultivadas, com ênfase nas espécies eucalipto e pinus. Além dos produtos madeireiros, o segmento também abrange itens não madeireiros, como resinas e frutos, que complementam a diversidade econômica do setor. No Estado da Bahia, a produção de celulose a partir do eucalipto destaca-se como um dos principais polos nacionais, acompanhada pela geração significativa de carvão vegetal e pela exploração de produtos regionais como licuri (*Syagrus coronata)* e piaçava (*Attalea funifera)*, que possuem grande importância socioeconômica para as comunidades locais. Dessa forma, o setor florestal regional representa uma importante interface entre desenvolvimento econômico e conservação ambiental.

Paralelamente, as atividades florestais no Estado geram diversos resíduos com potencial energético ao longo de toda a cadeia produtiva, desde a silvicultura até o processamento industrial. Entretanto, os resíduos oriundos das atividades silviculturais não são aproveitados energeticamente neste estudo, pois, por questões ambientais e técnicas, esses materiais são normalmente deixados em campo para promover a conservação do solo e a ciclagem de nutrientes.

Além disso, a conversão de áreas do bioma Cerrado para expansão agrícola, especialmente no Oeste baiano, contribui para a geração de subprodutos que podem ser aproveitados como fontes alternativas de energia. O aproveitamento energético desses resíduos representa uma oportunidade estratégica para agregar valor às atividades do setor florestal, promovendo a sustentabilidade e a diversificação das matrizes energéticas locais. Ressalte-se, entretanto, que este estudo não contempla o aproveitamento dos resíduos provenientes da alteração do uso do solo, especialmente aqueles gerados na supressão da vegetação para expansão agrícola, devido à ausência de dados consolidados sobre o volume produzido e o destino final desses materiais.

6.2 CENÁRIO NACIONAL DO SETOR FLORESTAL: PRODUÇÃO, SUSTENTABILIDADE E IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS

O setor florestal brasileiro é uma das principais forças econômicas e ambientais do País, destacando-se pela sua capacidade de integrar produção industrial, conservação ambiental e desenvolvimento social. Em 2023, o Brasil ultrapassou a marca de 10,2 milhões de ha de florestas plantadas, consolidando-se como referência mundial na produção sustentável de madeira e produtos derivados. Além disso, o setor também contribui para a conservação de 6,91 milhões de ha de vegetação nativa, reforçando o compromisso com práticas que aliam produtividade e preservação ambiental [(1)].

A relevância econômica do setor florestal brasileiro é inegável. Em 2023, o Brasil se consolidou como o maior exportador mundial de celulose, com mais de 18 milhões de t exportadas, gerando uma receita de US$ 12,7 bilhões. Além disso, o setor produz uma vasta gama de itens, como papel, painéis de madeira, pisos laminados e carvão vegetal, que atendem tanto ao mercado interno quanto ao externo. Esse desempenho é sustentado por práticas

6.1 INTRODUCTION

The forestry sector plays a fundamental role in the Brazilian economy, particularly in the production of pulp, paper, charcoal, and timber from cultivated forests, with an emphasis on eucalyptus and pine species. In addition to timber products, the segment also encompasses non-timber products such as resins and fruits, which complement the sector's economic diversity. In the State of Bahia, pulp production from eucalyptus stands out as one of the main national hubs, accompanied by significant charcoal production and the exploitation of regional products such as licuri (Syagrus coronata) *and piassava* (Attalea funifera)*, which are of great socioeconomic importance to local communities. Thus, the regional forestry sector represents an important interface between economic development and environmental conservation.*

At the same time, forestry activities in Bahia generate various residues with energy potential throughout the entire production chain, from silviculture to industrial processing. However, the residues from silvicultural activities are not utilized for energy purposes in this study because, for environmental and technical reasons, these materials are typically left in the field to promote soil conservation and nutrient cycling.

Furthermore, the conversion of Cerrado biome areas for agricultural expansion, especially in western Bahia, contributes to the generation of byproducts that can be used as alternative energy sources. Harnessing the energy potential of these residues offers a strategic opportunity to add value to forestry sector activities while promoting sustainability and diversification of the local energy. It should be noted, however, that this study does not consider the use of residues from land use change, particularly those produced during vegetation clearing for agricultural expansion, due to the lack of consolidated data on their volume produced and the final disposition.

Figura 6.1 Plantios florestais de eucaliptos. residual e armazéns de grãos ao fundo.
Figure 6.1 *Eucalyptus forest plantations.*



Foto / *Photo*: Paulo Nabas / stock.adobe.com

6.2 NATIONAL FORESTRY SECTOR OVERVIEW: PRODUCTION, SUSTAINABILITY, AND SOCIOECONOMIC IMPACTS

The Brazilian Forest sector is a major economic and environmental driver, distinguished by its capacity to integrate industrial production, environmental conservation, and social development. In 2023, Brazil surpassed 10.2 million hectares of planted forests, consolidating its position as a global benchmark in sustainably produced wood and wood-based products. The sector also contributes to the conservation of 6.91 million hectares of native vegetation, reinforcing its commitment to practices that combine productivity and environmental preservation [(1)].

The economic relevance of the Brazilian forestry sector is undeniable. In 2023, the country became the world's largest exporter of pulp, shipping over 18 million tons and generating USD 12.7 billion in revenue. Furthermore, the sector produces a wide range of products, such as paper, wood panels, laminate flooring, and charcoal, which serve both the domestic and international markets. This performance is supported by efficient management practices, which ensure an average productivity of 33.7 m^3/ha/year for eucalyptus and 30.8 m^3/ha/year for pine, rates that are among the highest in the world. These results reflect the sector's adoption of advanced technologies and ongoing investment in research and innovation [(1)].

Sustainability is one of the pillars of the Brazilian forestry sector, which adopts integrated production and conservation practices. Managed areas act as significant carbon reservoirs, storing 4.92 billion tons of CO_2 equivalent and contributing substantially to climate change mitigation. In addition, the use of mosaic planting, which intersperses productive and conservation areas, enhances landscape connectivity, protecting biodiversity and ecosystem services (Figure 6.2). Forest certification is another highlight: in 2023, Brazil reached 10.6 million hectares of certified forests, ensuring that the practices adopted by the sector are environmentally responsible, socially equitable, and economically viable [(1)].

The forestry sector also plays a crucial socioeconomic role, creating 2.69 million direct and indirect jobs. Its presence is especially significant in municipalities with low economic dynamism, acting as a growth and quality of life driver. In 2023, the sector invested BRL 39.5 million in socio-environmental projects benefiting 918,000 people, including education, health, environmental conservation, and social inclusion programs. Moreover, municipalities with strong sector activity exhibit per capita GDP above the national average, evidencing economic and social benefits of this industry [(1)].

Despite robust performance, challenges remain regarding sustainable expansion and climate adaptation. Integrated Crop-Livestock-Forestry (ICLF) systems have proven efficient to enhance productivity and diversify planted area uses, promoting environmental and economic benefits. The investment portfolio projected by 2028 exceeds BRL 105 billion, indicating sustainable growth prospects. These investments position Brazil to further consolidate as a global leader in sustainable forestry [(1)].

6.3 FOREST DEVELOPMENT IN BAHIA: CHARACTERISTICS, CHALLENGES, AND OPPORTUNITIES

Bahia's forest sector plays a strategic role in the state's economic, social, and environmental development, consolidating itself as one of the primary production chains of the state economy. With a trajectory marked by growth, innovation, and sustainability, the sector spans from the production of pulp, paper, charcoal, and timber for various purposes to the generation of non-timber products such as resins and fruits [(2)].

Covering approximately 667,000 hectares of planted forests, equivalent to 9% of the national total, Bahia ranks fourth in eucalyptus cultivation in Brazil, behind only Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, and São Paulo. This area, representing just 1.2% of the state, supplies 98% of timber for industry, with high productivity averaging 30 m^3/ha/year and reaching up to 34 m^3/ha/year [(2)].

Production is distributed in five main hubs: South and Far South, Southwest, West, North Coast, and the emerging Maracás region (Figure 6.3). This regional structure stimulates local economies, fosters social development, and drives commerce, services, and industrialization in plantation areas [(2)].

Figura 6.2 Plantios florestais em mosaico formando corredores ecológicos no Sul da Bahia.
Figure 6.2 *Mosaic forest plantations forming ecological corridors in southern Bahia.*



Foto / *Photo:* Daniela Higgin (2024)

de manejo eficientes, que garantem uma produtividade média de 33,7 m^3/ha/ano para o eucalipto e 30,8 m^3/ha/ano para o pinus, índices que estão entre os mais altos do mundo. Esses resultados evidenciam a aplicação de tecnologias avançadas e o investimento contínuo em pesquisa e inovação no setor [(1)].

A sustentabilidade é um dos pilares do setor florestal brasileiro, que adota práticas integradas de produção e preservação. As áreas manejadas pelo setor atuam como importantes reservatórios de carbono, armazenando 4,92 bilhões de t de CO_2 equivalente, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, o uso do plantio em mosaico, que intercala áreas produtivas com áreas de conservação, promove a conectividade da paisagem, protegendo a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos *(Figura 6.2)*. A certificação florestal é outro destaque: em 2023, o Brasil alcançou 10,6 milhões de ha certificados, assegurando que as práticas adotadas pelo setor sejam ambientalmente responsáveis, socialmente justas e economicamente viáveis [(1)].

O setor florestal também desempenha um papel crucial no desenvolvimento socioeconômico do Brasil, gerando 2,69 milhões de empregos diretos e indiretos. Sua presença é especialmente significativa em municípios de baixo dinamismo econômico, onde atua como motor de crescimento e melhoria da qualidade de vida. Em 2023, o setor investiu R$ 39,5 milhões em projetos socioambientais que beneficiaram 918 mil pessoas. Essas iniciativas incluem programas voltados para educação, saúde, conservação ambiental e inclusão social. Além disso, os municípios com forte atuação do setor apresentam PIB per capita superior ao da média nacional, evidenciando os benefícios econômicos e sociais dessa atividade [(1)].

Apesar do desempenho robusto, o setor florestal brasileiro enfrenta desafios relacionados à expansão sustentável e à adaptação às mudanças climáticas. A adoção de sistemas como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) tem se mostrado uma estratégia eficiente para ampliar a produtividade e diversificar os usos das áreas plantadas, promovendo benefícios ambientais e econômicos. Outro ponto importante é a carteira de investimentos prevista até 2028, que ultrapassa R$ 105 bilhões, indicando um horizonte de crescimento sustentável para o setor. Com esses investimentos, o Brasil tem potencial para se consolidar ainda mais como líder global em práticas florestais sustentáveis [(1)].

6.3 DESENVOLVIMENTO FLORESTAL NA BAHIA: CARACTERÍSTICAS, DESAFIOS E OPORTUNIDADES

O setor florestal baiano desempenha um papel estratégico no desenvolvimento econômico, social e ambiental do Estado, con-

solidando-se como uma das principais cadeias produtivas da economia estadual. Com uma trajetória marcada por crescimento, inovação e sustentabilidade, o setor integra desde a produção de celulose, papel, carvão vegetal e madeira para diversos fins, até a geração de produtos não madeireiros, como resinas e frutos [2].

Com, aproximadamente, 667 mil ha de florestas plantadas, o equivalente a 9% do total nacional, a Bahia ocupa o 4º lugar no Brasil em cultivo de eucalipto, atrás apenas de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e São Paulo. Embora essa área represente apenas 1,2% do território baiano, ela é responsável por 98% da madeira destinada à indústria, destacando-se pela alta eficiência produtiva, com rendimentos médios de 30 m^3/ha/ano e podendo alcançar até 34 m^3/ha/ano [2].

A produção está distribuída em cinco polos principais: Sul e Extremo Sul, Sudoeste, Oeste, Litoral Norte e, mais recentemente, a região de Maracás, que desponta como novo centro de desenvolvimento (*Figura 6.3)*. Essa estrutura regionalizada dinamiza economias locais, promove a transformação social e impulsiona o comércio, os serviços e a industrialização nas áreas onde os plantios estão inseridos [2].

Do ponto de vista ambiental, o setor se destaca por práticas sustentáveis consolidadas. Os plantios industriais são realizados em áreas antropizadas, com zero desmatamento e, para cada ha cultivado, preserva-se voluntariamente 0,8 ha de mata nativa, superando as exigências do *Código Florestal*. Atualmente, as empresas associadas à Associação Baiana das Empresas de Base Florestal (Abaf) conservam mais de 380 mil ha de vegetação nativa em suas propriedades. Em 2022, essas ações contribuíram para a absorção de 258 milhões de t de CO_2 equivalente, reforçando a relevância do setor na mitigação das mudanças climáticas [2].

Os impactos econômicos também são expressivos. Em 2022, o setor gerou R$ 25,3 bilhões em valor agregado, representando 6,3% do PIB estadual, além de R$ 6 bilhões em arrecadação de impostos. As exportações de produtos florestais, com destaque para a celulose, responderam por 13% das exportações da Bahia, com saldo positivo de US$ 1,78 bilhão [2].

No campo social, foram gerados mais de 226 mil postos de trabalho diretos, indiretos e por efeito-renda, com salários médios três vezes superiores ao da média estadual. Pequenos e médios produtores participam ativamente da cadeia produtiva por meio de contratos de fomento florestal, sendo responsáveis por 16% da área plantada. Regiões com cadeias florestais consolidadas apresentam melhores indicadores de desenvolvimento humano, evidenciando os benefícios sociais dessa atividade [2].

Entre os principais desafios, destacam-se a ampliação das áreas plantadas, a integração com comunidades locais e o manejo sustentável de biomas como o Cerrado e a Caatinga. O Plano Bahia Florestal 2033 propõe dobrar a área plantada, diversificar as cadeias produtivas e expandir práticas como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), promovendo um crescimento sustentável e descentralizado [2].

Com investimentos superiores a R$ 2,1 bilhões em 2022, o setor florestal baiano demonstra seu compromisso com a modernização, a inovação e a responsabilidade socioambiental. Infraestruturas estratégicas como a Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL) e o Porto Sul devem ampliar ainda mais a competitividade e a logística nos próximos anos. O equilíbrio entre produção, conservação e desenvolvimento social posiciona a Bahia como referência nacional e internacional em economia florestal sustentável [2].

From an environmental standpoint, the sector stands out for its well-established sustainable practices. Industrial plantations are carried out in anthropogenic areas, with zero deforestation, and for every hectare cultivated, 0.8 hectares of native forest are voluntarily preserved, exceeding the requirements of the Forest Code. Currently, companies affiliated with the Bahia Association of Forest-Based Companies (ABAF) conserve over 380,000 hectares of native vegetation on their properties. In 2022, these actions contributed to the absorption of 258 million tons of CO_2 equivalent, underscoring the sector's role in climate change mitigation [2].

Economic impacts are also significant. In 2022, the sector generated BRL 25.3 billion in added value, representing 6.3% of the state GDP, along with BRL 6 billion in tax revenues. Exports of forest products, particularly pulp, accounted for 13% of Bahia's exports, resulting in a positive trade balance of USD 1.78 billion [2].

Socially, the sector created over 226,000 direct, indirect, and income-effect jobs were created, with average wages three times higher than the state average. Small and medium producers actively participate in the value chain through forestry development contracts, managing 16% of the planted area. Regions with consolidated forestry chains show better human development indicators, evidencing the social benefits of this activity [2].

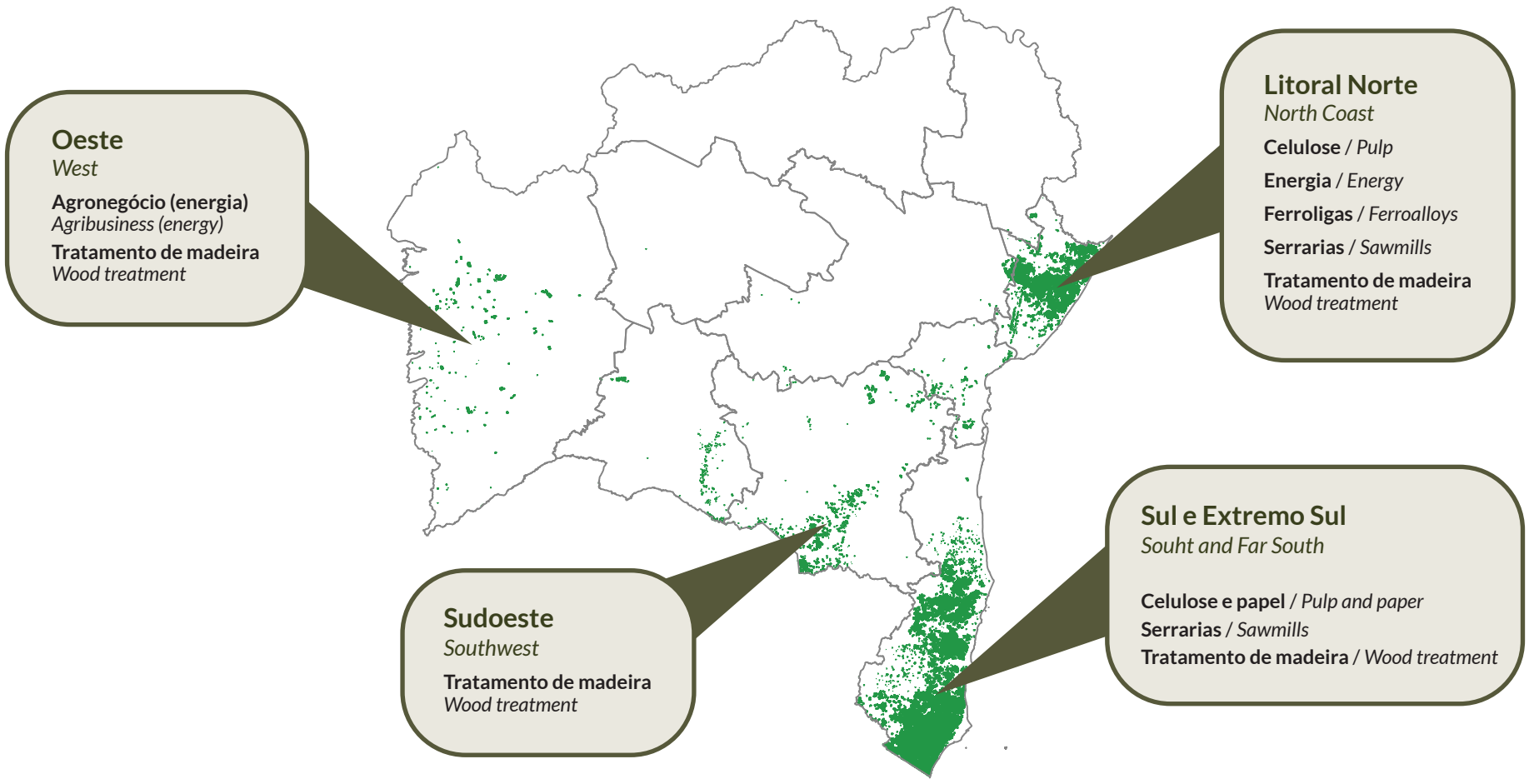
Key challenges include expanding planted areas, integrating local communities, and sustainably managing biomes such as the Cerrado and Caatinga. The Bahia Forest Plan 2033 seeks to double planted areas, diversify production chains, and expand Crop-Livestock-Forest Integration practices, promoting sustainable, decentralized growth [2].

With investments exceeding BRL 2.1 billion in 2022, strategic infrastructures like the West-East Integration Railway (FIOL) and Porto Sul will further enhance competitiveness and logistics. By balancing production, conservation, and social development, Bahia stands out as a national and international reference in sustainable forestry [2].

6.4 ENERGY VALORIZATION OF FORESTRY RESIDUES: POTENTIAL AND SUSTAINABLE PRACTICES

The forestry chain in Bahia also generates a significant amount of wood processing residues and forest harvesting residues, whose energy valorization represents a strategic opportunity to diversify the state's energy mix and reduce environmental liabilities.

Figura 6.3 Polos de produção e processamento de madeira do Estado da Bahia.
Figure 6.3 *Timber production and processing hubs in the State of Bahia.*



Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [2]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [2].

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DO SETOR FLORESTAL NA BAHIA

Residues from wood processing, such as sawdust, wood chips, and shavings, have high potential for energy utilization (Figure 6.4). These materials, often underutilized, can be transformed into biomass for thermal and electrical energy generation through direct combustion, chip production, or densification into pellets and briquettes, the latter having high energy density and low moisture content [3,4].

In addition to energy generation, these residues are used in the manufacture of substrates for gardening, compost, and as inputs in industries such as pulp and paper, adding value to the production chain and contributing to more sustainable practices. In sawmills, the volume of residues can reach up to 80% of the original log volume, depending on the technology employed [5,6]. *The volumetric yield of sawn timber can reach around 60%, especially for species like pine and eucalyptus* [7].

On the other hand, residues generated in the field after forest harvesting, such as leaves, fine branches, bark, stumps, and roots, are not energetically utilized in Bahia. This practice is associated with technical and environmental guidelines that direct the maintenance of these residues on the soil to protect the organic cover, preserve soil moisture and physicochemical properties, promote nutrient cycling, and reduce chemical input requirements [8,9,10]. *This leads to cost reductions in fertilization and indirectly contributes to mitigating greenhouse gas (GHG) emissions.*

In the Cerrado and Caatinga biomes, where soil and climate conditions are more severe, this strategy is even more relevant, favoring the adaptation of forestry to local conditions and reducing environmental impacts. Furthermore, Proper leaf litter management also contributes to biodiversity conservation and water quality protection, reduces agrochemical use, and allows native understory species to coexist. Thus, leaving silvicultural residues on the soil aligns with sustainable management and environmental conservation best practices [11,12].

The energy use of residues from industrial wood processing reduces dependency on fossil fuels at different production stages, from planting to processing, contributing to the forestry sector's energy self-sufficiency and GHG emissions reduction.

Sustainable management of forestry residues, whether by energy valorizations of industrial residues or the retention of silvicultural residues on the soil, reinforces the sustainability of forestry production, expands value generation, stimulates technological innovation, strengthens the regional economy, and contributes to the Sustainable Development Goals (SDGs).

6.4 VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS FLORESTAIS: POTENCIAL E PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS

A cadeia florestal baiana também gera uma significativa quantidade de resíduos madeireiros e silviculturais, cuja valorização energética representa uma oportunidade estratégica para diversificar a matriz energética estadual e reduzir passivos ambientais.

Os resíduos oriundos do processamento da madeira, como serragem, cavacos e aparas, apresentam elevado potencial de aproveitamento energético (*Figura 6.4)*. Esses materiais, frequentemente subutilizados, podem ser transformados em biomassa para geração de energia térmica e elétrica, por meio de combustão direta, produção de cavacos, ou densificação em pellets e briquetes, estes últimos com alta densidade energética e baixo teor de umidade [3,4].

Além da geração de energia, esses resíduos são utilizados na fabricação de substratos para jardinagem, compostagem e como insumos em indústrias como papel e celulose, agregando valor à cadeia produtiva e contribuindo para práticas mais sustentáveis. Em serrarias, o volume de resíduos pode chegar a até 80% do volume original das toras, a depender da tecnologia utilizada [5,6]. Já o rendimento volumétrico da madeira serrada pode alcançar cerca de 60%, especialmente em espécies como pinus e eucalipto [7].

Por outro lado, os resíduos gerados no campo após a colheita florestal, como folhas, galhos finos, cascas, tocos e raízes, não são aproveitados energeticamente no Estado da Bahia. Essa prática está associada a diretrizes técnicas e ambientais que orientam a manutenção desses resíduos no solo, com o objetivo de proteger a cobertura orgânica, preservar a umidade e as características físico-químicas do solo, favorecer a ciclagem de nutrientes e reduzir a necessidade de insumos químicos [28,9,10]. Com isso, há redução de custos com fertilização e uma contribuição indireta à mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Nos biomas Cerrado e Caatinga, onde as condições edafoclimáticas são mais severas, essa estratégia é ainda mais relevante, favorecendo a adaptação da silvicultura às condições locais e reduzindo os impactos ambientais. Além disso, o manejo adequado da serapilheira contribui para a preservação da biodiversidade e da qualidade dos recursos hídricos, evitando o uso excessivo de agrotóxicos e permitindo a coexistência de espécies nativas no sub-bosque. Assim, a manutenção dos resíduos silviculturais no solo está alinhada às boas práticas de manejo sustentável e conservação ambiental [11,12].

O uso energético dos resíduos provenientes do processamento industrial da madeira reduz a dependência de combustíveis fósseis em diferentes etapas do processo produtivo, do plantio ao beneficiamento, contribuindo para a autossuficiência energética do setor florestal e para a redução das emissões de GEE.

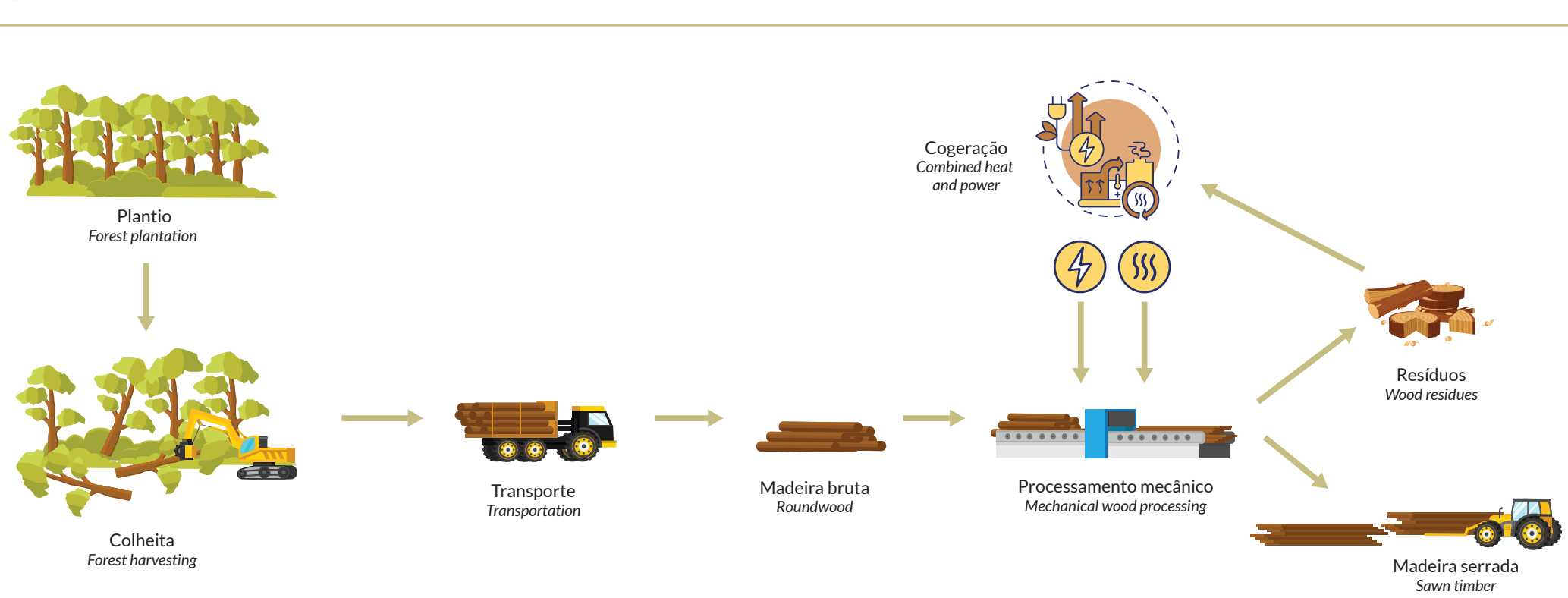
O manejo sustentável dos resíduos florestais, seja pela valorização energética dos resíduos industriais, seja pela permanência dos resíduos silviculturais no solo, reforça a sustentabilidade da produção florestal, amplia a geração de valor, estimula a inovação tecnológica, fortalece a economia regional e contribui para os *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).*

6.5 SETOR DE PAPEL E CELULOSE

O setor de papel e celulose destaca-se como um dos principais segmentos industriais do Brasil, tanto pelo seu desempenho econômico quanto pela sua relevância na agenda de sustentabilidade. Fortemente baseado no uso de florestas plantadas, sobretudo de eucalipto, o setor alia alta produtividade a práticas reconhecidas de manejo ambiental, gerando milhões de toneladas de produtos anualmente e mantendo o País entre os maiores exportadores globais de celulose *(Figura 6.5)*.

Essa cadeia produtiva, no entanto, também se caracteriza por um elevado consumo de recursos naturais e pela geração significativa de resíduos sólidos e líquidos, muitos dos quais apresentam elevado potencial de reaproveitamento energético. Dentre esses, destacam-se os efluentes líquidos com alta carga orgânica e os

Figura 6.4 Processo de produção de madeira com cogeração de energia.
Figure 6.4 *Wood production process with energy cogeneration.*



Fonte: elaborada pelos autores (2024). / *Source: prepared by the authors (2024).*

Figura 6.5 Pátio de estocagem de madeira.
Figure 6.5 *Eucalyptus forest plantations.*



Foto / *Photo*: RNL Fotografia / stock.adobe.com

subprodutos do processo industrial, que podem ser valorizados por meio de tecnologias como a digestão anaeróbia e a cogeração com biomassa.

No contexto da transição para uma economia de baixo carbono, o aproveitamento energético desses resíduos torna-se uma estratégia relevante para reduzir a pegada ambiental da indústria, aumentar sua autossuficiência energética e contribuir para o desenvolvimento da bioeconomia no País. A análise a seguir foca nos potenciais energéticos associados ao setor, com ênfase no contexto baiano, onde grandes plantas industriais já operam com significativa capacidade produtiva e oportunidades para inovação em energia renovável.

6.5.1 PRODUÇÃO NACIONAL DE PAPEL E CELULOSE

O setor de papel e celulose tem se destacado nos últimos anos pelo crescimento contínuo, consolidando-se como um dos mais relevantes dentro da indústria de materiais e desempenhando papel estratégico na economia brasileira. Graças à ampla disponibilidade de recursos naturais, clima favorável e tecnologia de ponta em manejo florestal, o Brasil figura entre os principais produtores mundiais de celulose de fibra curta, exportando amplamente para países da América do Norte, Europa e Ásia. Além disso, o País é referência em manejo sustentável, possuindo extensas áreas de florestas plantadas certificadas, que garantem suprimento contínuo de matéria-prima e reduzem pressões sobre florestas nativas.

Essa indústria é diversificada e abrange diferentes subsegmentos. A celulose, matéria-prima essencial para a fabricação de papel, pode ser classificada em dois tipos: fibra curta, geralmente proveniente do eucalipto, que proporciona papéis mais macios e com boa formação, utilizados em itens como papéis para impressão, higiene e embalagens leves; e fibra longa, obtida do pinus, que confere maior resistência e é aplicada em papéis especiais, como papel moeda, filtros e etiquetas.

O Brasil, ao lado do Chile, é um dos maiores exportadores de celulose de fibra curta da América Latina, sendo responsável por cerca de um terço da celulose comercializada globalmente. Empresas como a Suzano, maior produtora mundial de celulose de eucalipto, e outras como Klabin e Eldorado Brasil, têm papel central nesse cenário, operando com forte presença internacional e contribuindo para o superávit da balança comercial brasileira.

Segundo a *Indústria Brasileira de Árvores* [1], em 2022 o setor foi responsável por gerar 2,6 milhões de empregos diretos e indiretos, produzir 25 milhões de t de celulose e 11 milhões de t de papel, com uma receita bruta de R$ 260 bilhões. O segmento de embalagens, impulsionado pelo crescimento do comércio eletrônico e pela substituição de plásticos, vem apresentando maior dinamismo no consumo interno, enquanto a celulose mantém o protagonismo no mercado externo.

O processo kraft, principal método utilizado na produção de celulose no Brasil, consiste no cozimento da madeira para extração da polpa, gerando como subproduto o licor negro, um líquido concentrado em compostos orgânicos e de sódio. Esse material é aproveitado energeticamente em caldeiras, onde ocorre a recuperação dos reagentes químicos e a produção de vapor e eletricidade. A indústria também opera sistemas de cogeração com caldeiras de biomassa, o que, somado à crescente adoção de biorrefinarias capazes de produzir hidrogênio verde, metanol e lignina, confere ao setor um índice de renovabilidade superior a 85% e elevada autossuficiência energética [13,14].

Além da energia, o setor de celulose e papel gera diversos resíduos, como cascas de eucalipto, cinzas das caldeiras, lama de cal, lodo orgânico dos tratamentos de efluentes e os resíduos inorgânicos conhecidos como *dregs e grits* [14]. No que se refere ao uso da água, a eficiência hídrica nas fábricas aumentou significativamente ao longo das últimas décadas, reduzindo a captação de 180 a 200 m^3/t de celulose para uma média de 22 a 40 m^3/t. Cerca de 82% da água captada retorna aos corpos hídricos após tratamento, 0,3% é efetivamente consumida no produto final, e o restante evapora durante os processos industriais. Com tecnologias de reuso, a mesma água pode passar por até cinco ciclos antes de retornar ao ambiente, ampliando a disponibilidade para outros [1,15].

Apesar dos avanços, o processo produtivo também gera desafios ambientais significativos. A produção de celulose gera cerca de 48 t de resíduos para cada 100 t produzidas [16]. Se não forem adequadamente tratados, esses resíduos podem causar danos ambientais e sociais.

6.5 PULP AND PAPER SECTOR

The pulp and paper sector stands out as one of Brazil's main industrial segments, both for its economic performance and its relevance in sustainability agendas. Heavily based on the use of planted forests, especially eucalyptus, the sector combines high productivity with recognized environmental management practices, generating millions of tons of products annually and maintaining the country among the largest global pulp exporters (Figure 6.5).

However, this production chain is also characterized by high consumption of natural resources and significant generations of solid and liquid wastes, many of which have considerable potential for energy recovery. Among these, effluents with high organic load and industrial by-products stand out, which can be valorized through technologies such as anaerobic digestion and biomass cogeneration.

In the context of the transition to a low-carbon economy, the energy recovery of these residues becomes a relevant strategy to reduce the industry's environmental footprint, increase its energy self-sufficiency, and contribute to the development of the bioeconomy in the country. The following analysis focuses on the energy potentials associated with the sector, emphasizing the context of Bahia, where large industrial plants already operate with significant production capacity and opportunities for innovation in renewable energy.

6.5.1 NATIONAL PULP AND PAPER PRODUCTION

The pulp and paper sector has stood out in recent years for continuous growth, consolidating itself as one of the most relevant within the materials industry and playing a strategic role in the Brazilian economy. Due to abundant natural resources, favorable climate, and advanced forest management technology, Brazil ranks among the world's leading producers of short-fiber pulp, exporting extensively to North America, Europe, and Asia. Additionally, the country is a reference in sustainable management, with extensive areas of certified planted forests that ensure a continuous supply of raw material and reduce pressure on native forests.

This industry is diverse and includes several subsegments. Pulp, an essential raw material for papermaking, can be classified into two types: short fiber, usually derived from eucalyptus, which produces softer, well-formed papers used in items like printing, hygiene, and lightweight packaging; and long fiber, obtained from pinus, which provides greater strength and is applied in specialties such as currency, filters, and labels.

Brazil, alongside Chile, is one of the largest exporters of short-fiber pulp in Latin America, accounting for about one-third of global pulp trade. Companies such as Suzano, the world's largest producer of eucalyptus pulp, along with Klabin and Eldorado Brasil, play a central role in this scenario, operating with a strong international presence and contributing to Brazil's trade surplus.

According to the Brazilian Tree Industry [1], in 2022 the sector generated 2.6 million direct and indirect jobs, producing 25 million tons of pulp and 11 million tons of paper, with gross revenues of BRL 260 billion. The packaging segment, driven by e-commerce growth and plastic substitution, has shown greater dynamism in domestic consumption, while pulp maintains leadership in export markets.

The kraft process, the main method used for pulp production in Brazil, involves cooking wood to extract pulp, generating black liquor as a by-product, a liquid concentrated in organic and sodium compounds. This material is energetically utilized in boilers, where chemical reagents are recovered, creating steam and electricity. The industry also operates CHP systems with biomass boilers, which, combined with the growing use of biorefineries capable of producing green hydrogen, methanol, and lignin, gives the sector a renewability rate exceeding 85% and high energy self-sufficiency [13,14].

Besides energy, the pulp and paper sector generates various residues, including eucalyptus bark, boiler ash, lime sludge, organic sludge from effluent treatment, and inorganic residues known as dregs and grits [14]. Regarding water use, efficiency in mills has significantly improved over past decades, reducing abstraction from 180 - 200 m^3/t of pulp to an average of 22 - 40 m^3/t. About 82% of the water withdrawn is returned to water bodies after treatment, 0.3% is effectively consumed in the final product, and the remainder evaporates during industrial processes. With reuse technologies, the same water can undergo up to

five cycles before being discharged into the environment, increasing availability for other uses [1,15].

Despite these advances, the production process also generates significant environmental challenges. Pulp production generates approximately 48 tons of residues per 100 tons produced [16]. If not properly treated, these residues can cause environmental and social damage.

Effluent treatment is essential to mitigate environmental impacts, with technologies such as anaerobic digestion standing out by enabling biogas generation, a renewable energy source, unlike aerobic systems which do not produce useful energy [17].

Finally, it is worth noting that the sector has increasingly invested in innovation and sustainability, seeking alternatives to reduce GHG emissions, increase resource use efficiency, and expand bioenergy and bioproduct production. These strategies position the pulp and paper sector as a key player not only in the economy but also in the transition to a low-carbon economy.

6.5.2 THE PULP AND PAPER INDUSTRY IN BAHIA

The pulp and paper sector in Bahia is driven by the operations of major companies such as Veracel Celulose and Suzano, which play a strategic role both in the state and national economy. Veracel, located in the municipality of Eunápolis in the southern part of the state, is recognized as one of the most modern industries in the world in its field and stands out for its strong environmental commitment, being responsible for the largest private Atlantic Forest reserve in northeastern Brazil, the Private Natural Heritage Reserve (RPPN) Estação Veracel, which protects over 6,000 hectares of native forest [18]. Suzano, operating in the municipality of Mucuri in the far south of Bahia, maintains the largest integrated pulp and paper plant in Brazil, combining large-scale production with reforestation and environmental conservation programs [19].

According to [20], Bahia offers ideal conditions for forest plantations aimed at pulp production, particularly due to its favorable climate, suitable soils, and water availability. Plantations in the state reach a productivity of up to 41 m^3/ha, well above the national average of approximately 33 m^3/ha, ensuring more efficient land use and reduced need for territorial expansion [1]. This high productivity, combined with sustainable management practices, contributes to the production of high-quality short-fiber pulp, widely used in printing papers, hygiene products, and light packaging, with strong acceptance in international markets. As a result, the sector has expanded its share of Bahia's exports, becoming one of the main contributors to the state's trade surplus [20].

Beyond industrial production, the pulp and paper sector in Bahia generates significant socioeconomic impacts, creating thousands of direct and indirect jobs and supporting local supply chains related to transport, maintenance, and raw material supply. Companies operating in the state also invest in social projects, community training, and the promotion of sustainable agricultural practices, strengthening regional development [1].

The future of the industry in the state is promising, supported by the competitiveness of planted forests, the adoption of modern management technologies for species such as pine and eucalyptus, the digitalization of production processes, and the growing global demand for writing papers, tissue papers, and sustainable packaging, particularly as alternatives to single-use plastics. Furthermore, there is a growing trend toward sector diversification, with research focused on the utilization of industrial residues for bioenergy, biofuels, nanocellulose, and other high value bioproducts.

These prospects reinforce Bahia's role as a hub of excellence in the pulp and paper sector, combining economic competitiveness, technological innovation, and environmental commitment, consolidating its position as an important driver of the bioeconomy in Brazil (Figure 6.6).

6.5.3 ENERGY RECOVERY FROM INDUSTRIAL EFFLUENT: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES IN THE PULP SECTOR

The pulp and paper sector is one of the pillars of the Brazilian economy, standing out both for its production of short-fiber pulp, primarily derived from eucalyptus, and for its significant export volume, which positions Brazil among the world leaders in this market. With high production capacity, the country can produce millions of tons of pulp and

Figura 6.6 Colheita florestal mecanizada com harvester em plantio de eucalipto no Sul da Bahia, representando o uso de tecnologias modernas de manejo e produção florestal.
Figure 6.6 *Mechanized forest harvesting with a harvester in a eucalyptus plantation in Southern Bahia, illustrating the use of modern forest management and production technologies.*



Foto / *Photo*: Joa Souza / stock.adobe.com

O tratamento desses efluentes é fundamental para evitar impactos ambientais, e tecnologias como a biodigestão anaeróbia se destacam, pois, além de tratar os resíduos, possibilitam a geração de biogás, uma fonte renovável de energia, ao contrário dos sistemas aeróbios que não produzem energia útil [17].

Por fim, destaque-se que o setor tem investido cada vez mais em inovação e sustentabilidade, buscando alternativas para reduzir emissões de gases de efeito estufa, aumentar a eficiência no uso de recursos naturais e ampliar a produção de bioenergia e bioprodutos. Essas estratégias posicionam o setor de papel e celulose como protagonista não apenas na economia, mas também na transição para uma economia de baixo carbono.

6.5.2 A INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE NA BAHIA

O setor de papel e celulose na Bahia é impulsionado pela atuação de grandes empresas, como a Veracel Celulose e a Suzano, que desempenham papel estratégico tanto na economia estadual quanto nacional. A Veracel, localizada em Eunápolis, no Sul do Estado, é reconhecida como uma das indústrias mais modernas do mundo em sua área e se destaca pelo forte compromisso ambiental, sendo responsável pela maior reserva privada de Mata Atlântica do Nordeste, a RPPN Estação Veracel, que protege mais de 6 mil ha de floresta nativa [18]. Já a Suzano, operando em Mucuri, no Extremo Sul baiano, mantém a maior planta integrada de papel e celulose do Brasil, combinando produção em larga escala com programas de reflorestamento e conservação ambiental [19].

Segundo [20], a Bahia apresenta condições ideais para o cultivo de florestas destinadas à produção de celulose, especialmente devido ao seu clima favorável, solos adequados e disponibilidade hídrica. Os plantios no Estado atingem uma produtividade de até 41 m^3/ha, muito superior à média nacional de cerca de 33 m^3/ha, o que garante maior eficiência no uso da terra e menor necessidade de expansão territorial [1]. Essa alta produtividade, aliada a práticas de manejo sustentável, contribui para a fabricação de celulose de fibra curta de alta qualidade, amplamente utilizada em papéis para impressão, higiene e embalagens leves, com grande aceitação no mercado internacional. Como consequência, o setor tem ampliado sua participação nas exportações baianas, tornando-se um dos principais responsáveis pelo superávit da balança comercial Estadual [20].

Além da produção industrial, o setor de papel e celulose na Bahia tem gerado impactos socioeconômicos significativos, com a criação de milhares de empregos diretos e indiretos, e fomentado cadeias produtivas locais ligadas ao transporte, manutenção e fornecimento de insumos. As empresas atuantes no Estado também investem em projetos sociais, capacitação de comunidades e promoção de práticas agrícolas sustentáveis, fortalecendo o desenvolvimento regional [1].

O futuro da atividade no Estado é promissor, sustentado pela competitividade das florestas plantadas, pela adoção de tecnologias modernas de manejo de espécies como pinus e eucalipto, pela digitalização de processos produtivos e pela crescente demanda global por papéis de escrita, papéis *tissue* e embalagens sustentáveis, especialmente em substituição aos plásticos de uso único. Além disso, há uma tendência crescente de diversificação do setor, com pesquisas voltadas para o aproveitamento de resíduos industriais na geração de bioenergia, biocombustíveis, nanocelulose e outros bioprodutos de alto valor agregado.

Essas perspectivas reforçam o papel da Bahia como um polo de excelência no setor de papel e celulose, combinando competitividade econômica, inovação tecnológica e compromisso ambiental, consolidando-se como um importante vetor da bioeconomia no Brasil (figura 6.6).

6.5.3 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS: OPORTUNIDADES E DESAFIOS NO SETOR DE CELULOSE

O setor de papel e celulose é um dos pilares da economia brasileira, destacando-se tanto pela produção de celulose de fibra curta, principalmente a partir do eucalipto, quanto pelo volume expressivo de exportações, que posicionam o Brasil entre os líderes mundiais desse mercado. Com capacidade produtiva elevada, o País é capaz de produzir milhões de toneladas de celulose e de papel, além de proporcionar milhões de empregos diretos e indiretos. No Estado da Bahia, a atividade é igualmente estratégica, impulsionada por

empresas de grande porte, como a Suzano, que opera a maior planta integrada de papel e celulose do Brasil, em Mucuri, e a Veracel Celulose, localizada em Eunápolis, reconhecida pela modernidade de suas operações *(Figura 6.7)* e pela gestão ambiental, incluindo a preservação da RPPN Estação Veracel. A produtividade florestal no Estado é uma das mais altas do País, favorecida por condições climáticas e manejo eficiente, o que torna a Bahia uma região competitiva e com grande potencial de expansão no mercado.

Apesar de seu papel econômico relevante, a indústria de papel e celulose é intensiva no consumo de água e na geração de efluentes líquidos, que contêm elevada carga orgânica. No Brasil e na Bahia, a gestão desses efluentes é essencial para reduzir impactos ambientais e garantir a sustentabilidade do setor. Nesse contexto, o aproveitamento energético dos efluentes, especialmente por meio de tecnologias como a digestão anaeróbia, surge como uma solução viável para transformar resíduos em energia renovável.

O tratamento anaeróbio dos efluentes industriais permite a redução significativa da poluição hídrica, minimizando a carga orgânica antes do descarte e evitando a degradação de ecossistemas aquáticos. Além disso, o processo gera biogás, rico em metano, que pode ser utilizado como fonte de energia térmica ou elétrica, substituindo combustíveis fósseis e contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Essa abordagem ainda possibilita o reaproveitamento do lodo tratado como fertilizante, promovendo a economia circular.

O aproveitamento energético do efluente do setor de papel e celulose pode gerar benefícios sociais, como a criação de empregos qualificados nas áreas de operação, manutenção e monitoramento de sistemas de biodigestão e geração de energia. Ademais, práticas sustentáveis fortalecem a imagem corporativa e aumentam a aceitação das empresas junto às comunidades locais. Na Bahia, onde a atividade tem grande presença no Extremo Sul, iniciativas ambientais alinhadas a projetos de desenvolvimento social podem fortalecer a relação entre indústria e sociedade.

Do ponto de vista econômico, a geração de energia a partir do biogás contribui para a autossuficiência energética das fábricas, reduzindo custos operacionais e aumentando a competitividade no mercado global. Empresas que adotam tecnologias de valorização energética também podem se beneficiar da comercialização de créditos de carbono e, eventualmente, da venda de excedentes energéticos para a rede. No Estado da Bahia, a presença de grandes plantas industriais e a alta produtividade florestal criam um cenário favorável para investimentos em sistemas que integrem gestão de resíduos e geração de energia renovável.

A principal vantagem do aproveitamento energético é a conversão de um passivo ambiental em um ativo econômico. Além de reduzir impactos ambientais e emissões de carbono, a tecnologia contribui para a diversificação da matriz energética, atendendo às demandas de sustentabilidade e às metas globais de descarbonização. No contexto baiano, onde há elevada disponibilidade de biomassa e efluentes industriais, essa estratégia reforça o protagonismo do Estado na transição para uma economia de baixo carbono.

Entre os principais desafios, destacam-se os custos de instalação de biodigestores e sistemas de geração de energia – que podem ser elevados, principalmente se forem de grande porte –, a necessidade de controle rigoroso da qualidade do efluente para garantir eficiência no processo e a falta de incentivos específicos para projetos de valorização energética. Barreiras regulatórias, ausência de linhas de financiamento adequadas e carência de mão de obra especializada também podem limitar a expansão dessa tecnologia.

Em síntese, o aproveitamento energético do efluente do setor de papel e celulose representa uma oportunidade estratégica para integrar sustentabilidade ambiental, desenvolvimento social e competitividade econômica. A adoção de políticas públicas de incentivo, aliada a investimentos em inovação tecnológica e gestão eficiente, pode consolidar o setor como referência na geração de energia limpa e na economia circular, ampliando os benefícios para a indústria, para as comunidades e para o meio ambiente.

6.5.4 POTENCIAIS ENERGÉTICOS ESTIMADOS A PARTIR DE EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS

6.5.4.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO

O potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do efluente líquido gerado pelo setor de papel e celulose foi estimado com base na metodologia aplicada para o esgoto sanitário, descrita no *Capítulo 4* deste documento. Entretanto, foram realizadas adaptações nas premissas originais e incorporadas considerações específicas para refletir as características particulares dos resíduos desse segmento industrial.

O cálculo baseou-se em dados primários disponibilizados pelo Senai/Cimatec e pelas empresas Suzano Papel e Celulose e Bracell – Bahia Specialty Cellulose S.A., combinados com dados secundários de bases governamentais e de referências bibliográficas,

Figura 6.7 Vista aérea da fábrica da Veracel Celulose, localizada no município de Eunápolis.
Figure 6.7 *Aerial view of the Veracel Cellulose, located in the municipality of Eunápolis.*



Foto / *Photo*: Zig Koch / stock.adobe.com

paper, in addition to providing millions of direct and indirect jobs. In the State of Bahia, the activity is equally strategic, driven by large companies such as Suzano, operating the largest integrated pulp and paper plant in Brazil, in Mucuri municipality, and Veracel Celulose, located in Eunápolis municipality, recognized for the modernity of their operations (Figure 6.7) and environmental management, including the preservation of the Private Natural Heritage Reserve (RPPN) Estação Veracel. Forest productivity in the state is among the highest nationwide, favored by climate conditions and efficient management, making Bahia a competitive region with great potential for market expansion.

Despite its economic relevance, the pulp and paper industry is highly water-intensive and generates large volumes of effluents with high organic loads. In Brazil and in Bahia, the proper management of these effluents is essential to minimize environmental damage and ensure the sector's sustainability. In this context, energy recovery from industrial effluents, particularly through anaerobic digestion technologies, emerges as a viable solution to convert residues into renewable energy.

Anaerobic treatment of industrial effluents significantly reduces water pollution by decreasing organic load prior to discharge, thus preventing the degradation of aquatic ecosystems. In addition, the process generates biogas, rich in methane, which can be used as a thermal or electrical energy source, replacing fossil fuels and contributing to the mitigation of GHG emissions. This approach also allows for the reuse of treated sludge as fertilizer, promoting circular economy practices.

Energy recovery from effluents of the pulp and paper sector can generate social benefits such as the creation of skilled jobs in in the operation, maintenance, and monitoring of biogas generation systems. Furthermore, sustainable practices strengthen corporate reputation and enhance companies' social acceptance within local communities. In Bahia, where industrial activity is concentrated in the southern region, integrating environmental initiatives with social development projects can further reinforce the relationship between industry and society.

Economically, biogas-based energy generation contributes to the energy self-sufficiency of pulp and paper mills, reducing operational costs and enhancing competitiveness in global markets. Companies adopting energy recovery technologies may also benefit from carbon credit trading and, in some cases, the sale of surplus energy to the grid. In the State of Bahia, the combination of large-scale industrial plants and high forest productivity provides favorable conditions for investments in integrated waste management and renewable energy systems.

The main advantage of energy recovery is converting environmental liability into an economic asset. Beyond reducing environmental damage and carbon emissions, this technology supports the diversification of the energy mix, aligning with global decarbonization goals and the transition to a low-carbon economy. In the context of Bahia, where biomass and industrial effluents are abundant, this strategy reinforces the state's leadership in the transition to a low-carbon economy.

Key challenges include the high costs of biodigester and energy generation system installation, especially for large-scale units, the need for strict effluent quality control to ensure process efficiency, and a lack of specific incentives for energy recovery projects. Regulatory barriers, absence of adequate financing lines, and shortage of specialized labor may also limit technology expansion.

In summary, energy recovery from industrial effluents in the pulp and paper sector represents a strategic opportunity to integrate environmental sustainability, social development, and economic competitiveness. Public policies that promote investment in technological innovation and efficient resource management could consolidate the sector as a reference in renewable energy generation and circular economy, expanding the benefits for industry, communities, and the environment alike.

6.5.4 ESTIMATED ENERGY POTENTIALS FROM INDUSTRIAL EFFLUENT

5.5.4.1 CALCULATION METHODOLOGY

The potential for electricity generation from biogas produced by effluent from the pulp and paper sector was estimated using the same methodology applied to sanitary swage, described in Chapter 4 of this document. However, adaptations were made to the original assumptions, incorporating specific considerations to reflect the particular characteristics of residues from this industrial segment.

The calculation was based on primary data provided by Senai/Cimatec and the companies Suzano Papel e Celulose and Bracell – Bahia Specialty Cellulose S.A., combined with secondary data from government databases and bibliographic references, such as biogas generation coefficients and conversion factors for biomethane, electricity, and hydrogen. This approach allowed us to quantify not only the biogas production potential but also its possible energy applications, considering the specific conditions of Bahia's pulp and paper industry.

6.5.4.2 QUANTIFICATION OF INDUSTRIAL EFFLUENTS

The estimation of electricity generation potential from pulp and paper industry effluents in Bahia is directly linked to the volume of effluents generated by the mills located in the respective municipalities. This analysis used data provided by Senai/Cimatec and the companies Suzano Papel e Celulose and Bracell – Bahia Specialty Cellulose S.A. It is important to note that data from Veracel Celulose were not made available, preventing the inclusion of the municipality where the company is located in the calculated energy potential estimates.

6.5.4.3 METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE BIOGAS GENERATION POTENTIAL FROM ANAEROBIC DIGESTION

Methane (CH^4) generated from the anaerobic treatment of effluents from the pulp and paper sector was estimated using the same methodology applied to sanitary sewage, as described in [56,57]. Factors used in calculations were obtained from Senai/Cimatec and the companies Suzano Papel e Celulose and Bracell – Bahia Specialty Cellulose S.A., as well as bibliographic references. Methane generation potential considered the production factor and the chemical oxygen demand (COD) removal efficiency, both taken from [58]. To estimate the total biogas volume, the methane percentage in the biogas composition was applied. The mathematical model used is described in the Appendices of this atlas.

6.5.4.4 METHODOLOGY FOR ESTIMATING BIOMETHANE GENERATION POTENTIAL

To estimate the available biomethane volume, a methane content is assumed in the produced biomethane to comply with existing standards set by Resolution ANP 886/2022 of the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP), that is, a fuel with at least 90% purity [59]. This value includes methane losses and residual impurities. The mathematical model used is described in the Appendices of this atlas.

6.5.4.5 METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE ELECTRICITY GENERATION POTENTIAL FROM BIOGAS

The calculation of the electrical potential of the liquid effluent from the pulp and paper sector is based on the volume of biogas generated and on the use of Otto-cycle engines, a technology widely adopted in Brazil, although of foreign origin [57]. For this calculation, the lower heating value (LHV) of methane, obtained from technical references, is combined with the typical energy conversion efficiency of these engines, according to data from available commercial equipment. Performance and efficiency information was provided by [56] and corroborated by the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo [57], ensuring the methodological consistency of the results. The mathematical model used is described in the Appendices of this atlas.

6.5.4.6 METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE HYDROGEN GENERATION POTENTIAL VIA BIOMETHANE REFORMING

The estimation of hydrogen production from biomethane was refined using calculations based on mass and energy balances, considering the typical operational conditions of conventional industrial steam

como coeficientes de geração de biogás e fatores de conversão para biometano, eletricidade e hidrogênio. Essa abordagem permitiu quantificar não apenas o potencial de produção de biogás, mas também suas possíveis aplicações energéticas, considerando as especificidades do setor de papel e celulose baiano.

6.5.4.2 QUANTIFICAÇÃO DOS EFLUENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS

O cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir do efluente do setor de papel e celulose na Bahia está diretamente vinculado ao volume de efluentes gerados pelas indústrias do setor nos municípios onde estão instaladas. Para essa análise, foram utilizados dados fornecidos pelo Senai/Cimatec e pelas empresas Suzano Papel e Celulose e Bracell – Bahia Specialty Cellulose S.A. Cabe destacar que os dados referentes à Veracel Celulose não foram disponibilizados, impossibilitando a inclusão do município em que a empresa está localizada nas estimativas de potencial energético calculadas.

6.5.4.3 METODOLOGIA PARA A ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

A quantificação do metano (CH^4) gerado a partir do tratamento anaeróbio do efluente líquido produzido no setor de papel e celulose foi realizada a partir da mesma metodologia utilizada para o esgoto sanitário, conforme [56,57]. Os fatores considerados nos cálculos foram obtidos do Senai/Cimatec e das empresas Suzano Papel e Celulose e Bracell – Bahia Specialty Cellulose S.A., bem como de referências bibliográficas. O potencial de geração de metano considerou o fator de produção e uma eficiência de remoção da DQO, ambos valores a partir de [58]. Para estimar o volume total de biogás, foi adotado o percentual de metano na composição do biogás. O modelo matemático utilizado está descrito no *Apêndice* deste atlas.

6.5.4.4 METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOMETANO

Para a estimativa do volume de biometano disponível, assume-se um teor de metano no biometano produzido, considerando a necessidade de seguir os padrões existentes estabelecidos pela *Resolução ANP 886/2022* que estipula a qualidade do biometano para essas finalidades, ou seja, um combustível com, no mínimo, 90% de pureza [59]. Esse valor já inclui perdas de metano e impurezas residuais. O modelo matemático utilizado está descrito no *Apêndice* deste atlas.

6.5.4.5 METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DO BIOGÁS

O cálculo do potencial elétrico do efluente líquido do setor de papel e celulose baseia-se no volume de biogás produzido e na aplicação de motores de ciclo Otto, tecnologia amplamente utilizada no Brasil, ainda que de origem importada [57]. Para esse cálculo, utiliza-se o PCI do metano, obtido em referências técnicas, aliado à eficiência de conversão energética típica desses motores, conforme dados de equipamentos comerciais disponíveis. As informações sobre desempenho e eficiência foram fornecidas pela [56] e corroboradas pelo *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [57], garantindo a consistência metodológica dos resultados. O modelo matemático utilizado está descrito no *Apêndice* deste atlas.

6.5.4.6 METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO VIA REFORMA DO BIOMETANO

A estimativa da produção de hidrogênio a partir do biometano foi aprimorada por meio de cálculos baseados em balanços de massa e energia, levando em conta as condições operacionais típicas de plantas industriais de reforma a vapor convencionais. Como o biometano tem o metano como principal componente, foram adotadas as mesmas condições de operação utilizadas para a reforma a vapor do gás natural. A eficiência de conversão dos processos foi determinada considerando a produção de 1 kg de hidrogênio, utilizando o poder calorífico inferior (PCI) do hidrogênio e do biometano, a densidade do biometano e a demanda energética do processo. Além disso, o conteúdo térmico do hidrogênio produzido *(Thermal Content of the Hydrogen Product – TP)* foi calculado a partir da eficiência do gás, do conteúdo térmico do hidrogênio e da entrada térmica no sistema. Por fim, o potencial de produção de hidrogênio via reforma a vapor do biometano foi obtido considerando o fluxo mássico, o conteúdo térmico e o PCI do hidrogênio, garantindo maior precisão na avaliação do aproveitamento energético. O modelo matemático utilizado está descrito no *Apêndice* deste atlas.

6.5.5 RESULTADOS E REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS POTENCIAIS

A *Tabela 6.1* apresenta os potenciais técnicos energéticos provenientes do tratamento anaeróbio do efluente líquido proveniente do setor e papel e celulose disponível no Estado da Bahia. São exibidos os seguintes indicadores: volume de biogás produzido, quantidade de biometano gerado a partir da purificação do biogás, potencial de geração elétrica por meio de grupo motogerador operando com biogás, e produção estimada de hidrogênio a partir do biometano.

A análise dos dados apresenta os potenciais energéticos a partir do tratamento anaeróbio dos efluentes líquidos provenientes do setor de papel e celulose nos municípios de Mucuri e Camaçari, dois dos maiores polos industriais da Bahia. É importante ressaltar que os potenciais energéticos do município de Eunápolis, onde se encontra a indústria Veracel Celulose, não puderam ser estimados em função da indisponibilidade de dados.

O município de Mucuri é responsável por, aproximadamente, 77% do efluente líquido total apresentado na *Tabela 6.1*, o que originaria pouco mais de 55% do biogás, do biometano e da eletricidade gerada no setor de papel e celulose no Estado da Bahia, considerando apenas as duas indústrias analisadas no estudo. Isso reflete o grande porte industrial do município, especialmente devido à presença da planta da Suzano, que é a maior unidade integrada de papel e celulose do Brasil.

O município de Camaçari, embora produza apenas cerca de 23% do volume de efluente, apresenta uma eficiência energética proporcionalmente maior. Com menos efluente que Mucuri, gera quase 45% do biogás e eletricidade total apresentado na *Tabela*

6.1, o que sugere uma melhor característica físico-química do efluente, conforme dados fornecidos pelas indústrias.

Diante dos dados apresentados na Tabela 6.2, pode-se observar que o município de Camaçari é muito mais eficiente na conversão energética por unidade de efluente líquido. Isso pode estar ligado à natureza dos resíduos, com maior concentração de matéria orgânica, conforme dados fornecidos pelas indústrias.

O potencial energético combinado dos dois municípios é relevante: 21.428 MWh/ano de eletricidade; 5,7 milhões de Nm^3/ano de biometano; e 1,56 milhão Nm^3/ano de hidrogênio, o que equivale, por exemplo, à energia anual consumida por milhares de residências ou ao abastecimento de uma frota de veículos movidos a H_2 ou biometano como substituto ou complementação ao gás natural.

Considerando o consumo de gás natural na Bahia, de 6,89 milhões de m^3/dia [24], foi possível observar que a produção de biometano a partir do biogás proveniente do tratamento anaeróbio dos efluentes líquidos gerados no setor de papel e celulose de, aproximadamente, 15.577 Nm^3/dia, poderia suprir 0,23% da demanda total de gás natural do Estado.

A produção de hidrogênio a partir dos efluentes se alinha com a *Lei nº14.948/2024*, que regulamenta o hidrogênio de baixo carbono [25]. Isso reforça a oportunidade de integrar a geração com certificações ambientais e mercados voluntários de carbono.

Diante dos resultados obtidos o potencial energético do setor de papel e celulose disponível no Estado da Bahia, pode-se salientar:

- O município de Mucuri se destaca pelo volume absoluto de efluente e geração energética, em razão de seu parque industrial;
- O município de Camaçari, por sua vez, apresenta melhor aproveitamento energético por m^3 de efluente, mostrando potencial para expansão estratégica da recuperação energética;
- A soma desses dois polos demonstra que os efluentes industriais provenientes do setor de papel e celulose na Bahia são fontes significativas de energia renovável, podendo gerar benefícios ambientais e econômicos se tratados adequadamente.
- Essa produção energética poderia ser integrada à política de geração distribuída (*Lei nº 14.300/2022*), reduzindo custos operacionais e contribuindo para a descarbonização da matriz energética industrial.

reforming plants. As biomethane is predominantly composed of methane, the operational conditions used in natural gas steam reforming were adopted. Process conversion efficiency was determined considering the production of 1 kg of hydrogen, using the lower heating value (LHV) of hydrogen and biomethane, the density of biomethane, and the process energy demand. Additionally, the thermal content of the hydrogen produced (Thermal Content of the Hydrogen Product – TP) was calculated based on gas efficiency, hydrogen thermal content, and system thermal input. Finally, the potential for hydrogen production via biomethane steam reforming was obtained by considering the mass flow, thermal content, and LHV of hydrogen, ensuring greater precision in the assessment of energy recovery. The mathematical model used is described in the Appendix of this Atlas.

6.5.5. RESULTS AND SPATIAL REPRESENTATION OF POTENTIAL

Table 6.1 presents the technical energy potential from the anaerobic treatment of effluent from the pulp and paper sector available in the State of Bahia. The following indicators are shown: volume of biogas produced, amount of biomethane produced via biogas upgrading, electricity-generation potential through a motor-generator set operating on biogas and estimated hydrogen production from biomethane.

The analysis highlights the energy potential of anaerobic treatment of liquid effluents produced by the pulp and paper sector in the municipalities of Mucuri and Camaçari, two of the largest industrial hubs in Bahia. It is important to note that the energy potentials for the municipality of Eunápolis, the site of Veracel Celulose, could not be estimated because of the unavailability of data.

Mucuri municipality accounts for approximately 77% of the total effluent presented in Table 6.1, which would result in just over 55% of the biogas, biomethane, and electricity generated in the pulp and paper sector in Bahia, considering only the two industries analyzed. This reflects the large industrial scale of the municipality, mainly due to the presence of Suzano's plant, the largest integrated pulp and paper facility in Brazil.

Although producing only approximately 23% of the total effluent volume, the municipality of Camaçari exhibits a proportionally higher energy efficiency. With less effluent than Mucuri municipality, it generated nearly 45% of the total biogas and electricity presented in Table 6.1, indicating better physicochemical characteristics of the effluent, according to industrial data.

Based on the data presented in Table 6.2, it can be observed that the unit located in the Municipality of Camaçari is significantly more

Tabela 6.1 Potenciais técnicos energéticos provenientes do tratamento anaeróbio do efluente líquido do setor de papel e celulose disponível no Estado da Bahia.
Table 6.1 *Technical energy potentials from the anaerobic treatment of effluent from the pulp and paper sector available in the State of Bahia.*

Município *Municipality*	Efluente líquido *Liquid effluent*	Volume de biogás produzido *Volume of biogas produced*	Quantidade de biometano gerado *Quantity of biomethane generated*	Potencial de geração de eletricidade *Potential for electricity generation*	Produção de hidrogênio a partir do biometano *Hydrogen production from biomethane*
	(m^3/ano) / *(m^3/year)*	(Nm^3/ano) / *(Nm^3/year)*	(Nm^3/ano) / *(Nm^3/year)*	(MWh/ano) / *(MWh/year)*	(Nm^3/ano) / *(Nm^3/year)*
Mucuri	43.800.000	5.001.045	3.164.550	11.926	868.899
Camaçari	13.308.638	3.984.308	2.521.182	9.502	692.248
Total Estadual ***State Total***	**57.108.638**	**8.985.353**	**5.685.732**	**21.428**	**1.561.147**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Tabela 6.2 Eficiência energética comparativa entre os municípios (energia por m^3 de efluente) no Estado da Bahia
Table 6.2 *Comparative energy efficiency among municipalities (energy per m^3 of effluent) in the State of Bahia*

Indicador *Indicator*	Mucuri	Camaçari
Eletricidade (MWh/m^3 de efluente) *Electricity (MWh/m^3 of effluent)*	0,00027	0,00071
Biometano (Nm^3/m^3 de efluente) *Biomethane (Nm^3/m^3 of effluent)*	0,072	0,189
Hidrogênio (Nm^3/m^3 de efluente) *Hydrogen (Nm^3/m^3 of effluent)*	0,020	0,052

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 6.1 / *Map 6.1*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DO EFLUENTE DO SETOR DE PAPEL E CELULOSE

GEOGRAPHICAL DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM PULP AND PAPER MILL EFFLUENTS

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

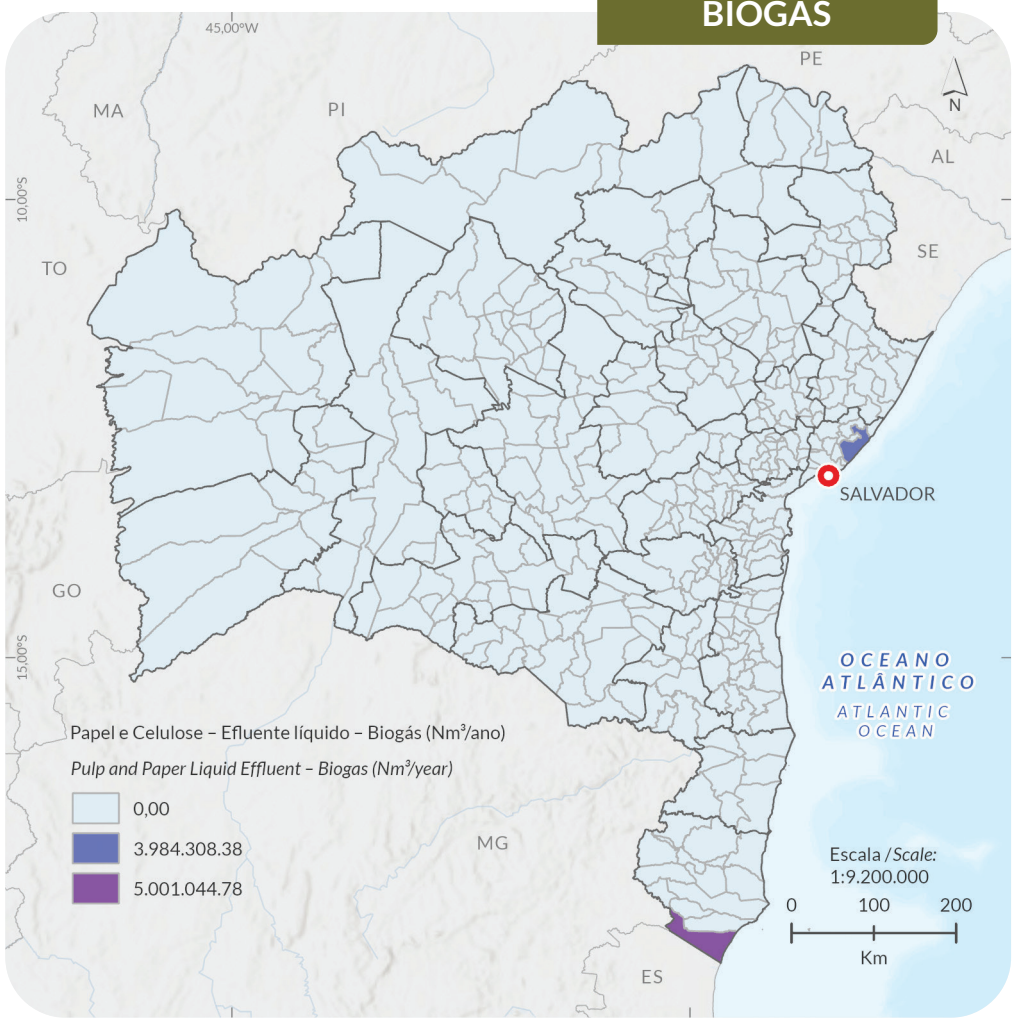
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

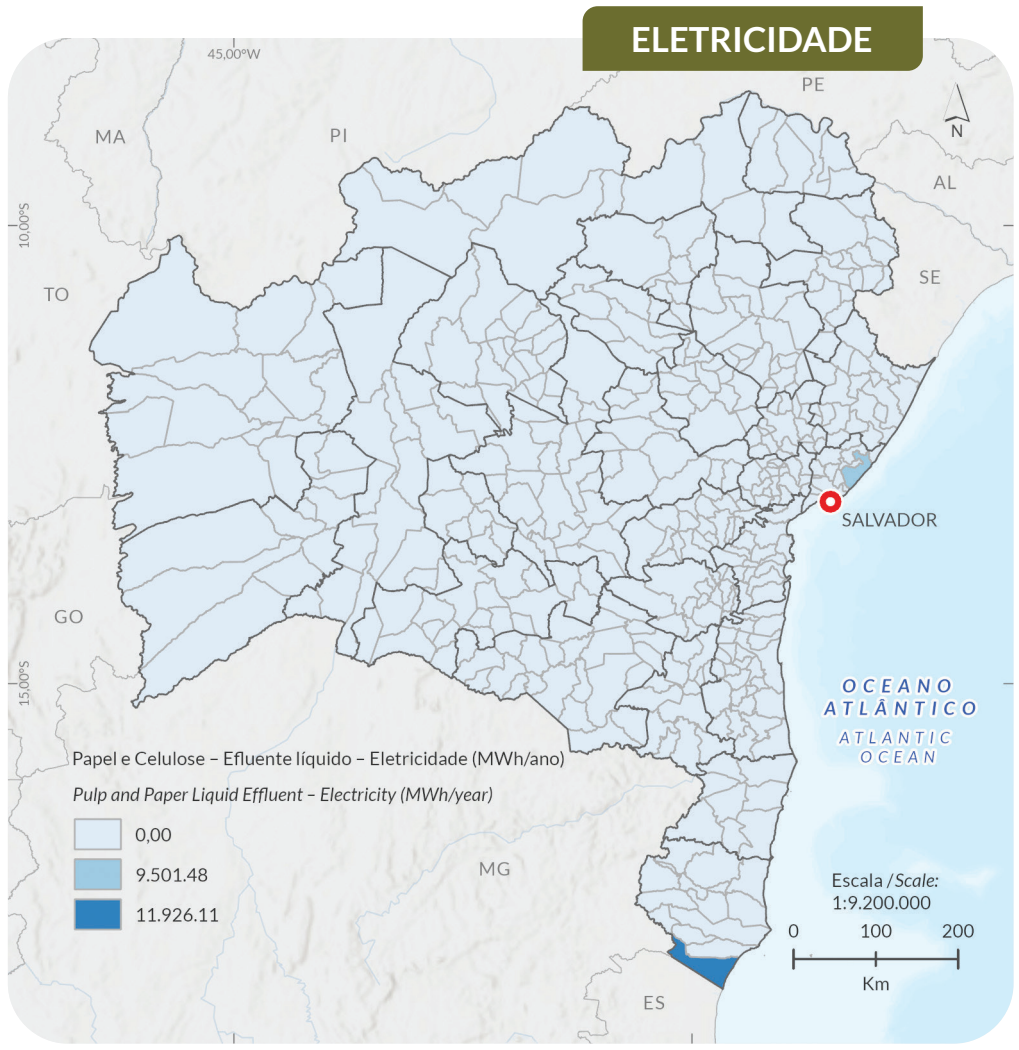
BIOGAS

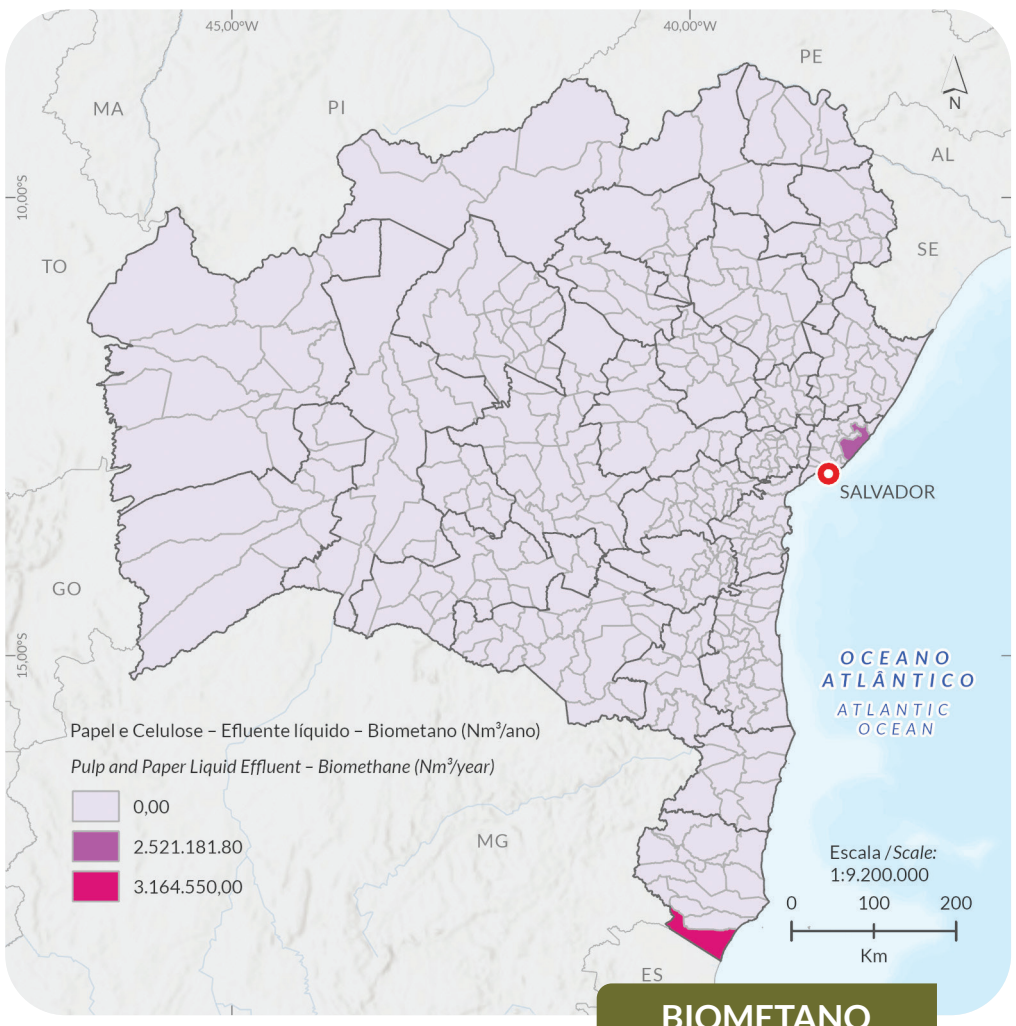
BIOGÁS



ELECTRICITY

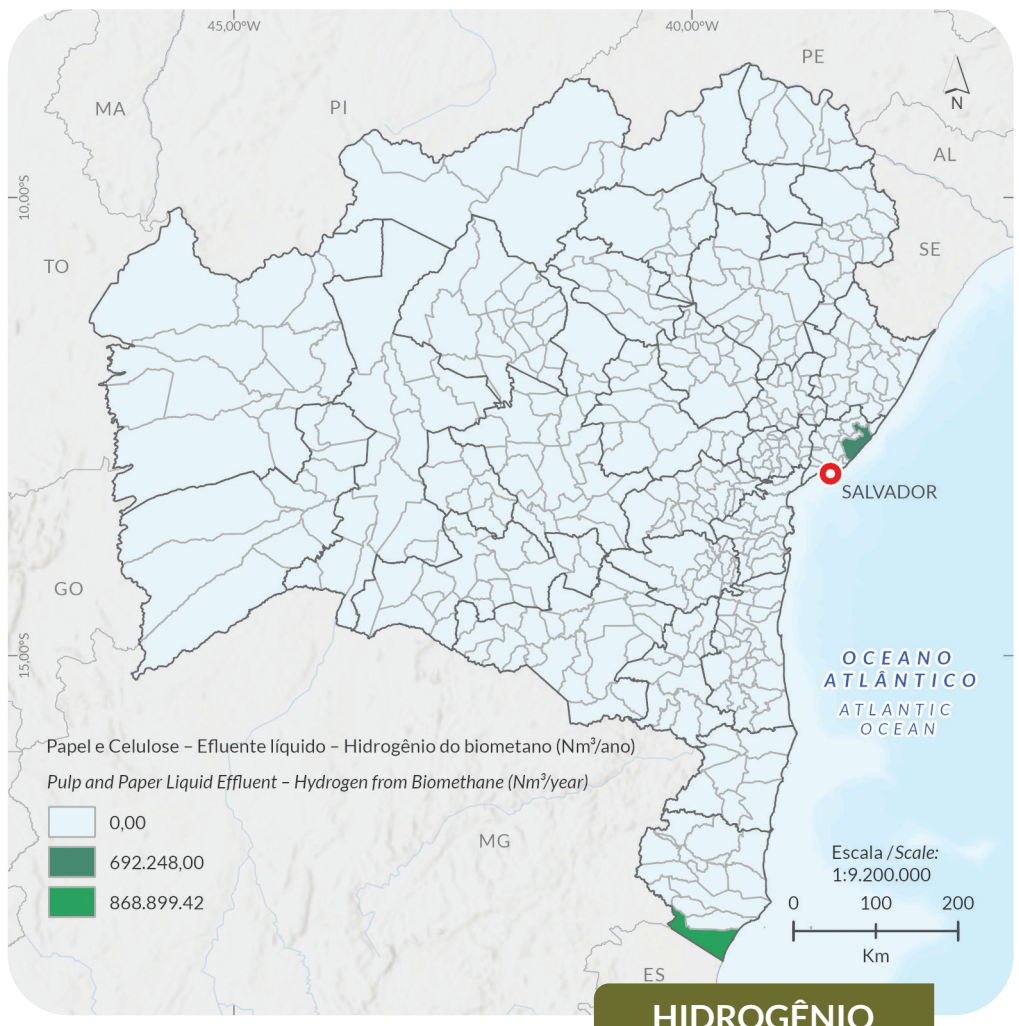
ELETRICIDADE





BIOMETANO

BIOMETHANE



HIDROGÊNIO

HYDROGEN

Ressalte-se que os potenciais energéticos do município de Eunápolis, onde está situada a planta industrial da Veracel Celulose, não foram incluídos nesta análise devido à indisponibilidade de dados técnicos e operacionais, o que impossibilitou a realização de estimativas confiáveis.

Apesar do significativo potencial energético associado ao reaproveitamento de efluentes líquidos industriais, a estimativa precisa desse potencial no setor de papel e celulose na Bahia ainda enfrenta diversas barreiras técnicas, institucionais e informacionais. Essa limitação restringe o avanço de estratégias mais sustentáveis e integradas de gestão de resíduos e energia.

A principal barreira observada é a falta de dados públicos e sistematizados por parte das empresas do setor. Além disso, há uma ausência de exigência regulatória clara quanto à transparência dos dados ambientais e energéticos relacionados ao tratamento de efluentes industriais. A maior parte dos relatórios de sustentabilidade, quando disponíveis, limita-se a indicadores agregados e não discriminam informações específicas que possibilitem a modelagem energética dos resíduos líquidos.

Outra barreira relevante refere-se às características físico-químicas dos efluentes do setor de papel e celulose, que varia significativamente conforme o tipo de matéria-prima, o processo produtivo adotado (kraft, sulfito etc.) e a etapa do processo de onde o efluente é proveniente (branqueamento, lavagem, digestão). Isso exige uma caracterização detalhada da carga orgânica e da biodegradabilidade dos resíduos, o que nem sempre é realizado pelas empresas de forma sistemática.

No contexto baiano, observa-se ainda uma concentração significativa da cadeia produtiva do setor em poucos municípios, dentre os quais se destacam Mucuri e Camaçari, que desempenham papel central na produção e processamento industrial. Essa concentração pode influenciar tanto a gestão dos resíduos quanto a implementação de políticas regionais para o aproveitamento energético dos efluentes industriais

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor florestal na Bahia desempenha um papel central na economia estadual e nacional, reunindo expressivos resultados econômicos, relevantes contribuições sociais e práticas ambientais alinhadas à sustentabilidade. A combinação de alta produtividade florestal, tecnologia de ponta e investimentos contínuos em inovação posiciona o Estado como uma referência em manejo florestal e produção de papel e celulose, com destaque para os municípios de Mucuri, Camaçari e Eunápolis.

A geração e o aproveitamento dos resíduos florestais, em especial aqueles oriundos do processamento industrial da madeira e do setor de papel e celulose, representam uma frente estratégica para a diversificação da matriz energética e a valorização da bioeconomia regional. A valorização energética desses resíduos contribui para a redução de passivos ambientais, o fortalecimento da autossuficiência energética das unidades industriais e o avanço de práticas produtivas alinhadas às metas de descarbonização.

A análise do potencial energético dos efluentes líquidos industriais evidencia a viabilidade de se gerar eletricidade, biometano e hidrogênio, transformando um passivo ambiental em ativo econômico. Os dados demonstram que há oportunidades significativas para a Bahia ampliar sua inserção na cadeia da bioenergia, especialmente a partir de resíduos industriais com elevada carga orgânica, como os oriundos da produção de celulose.

Entretanto, o estudo também evidencia entraves relevantes, como a ausência de dados públicos sistematizados, a heterogeneidade dos resíduos e a falta de políticas regulatórias específicas que incentivem a transparência e o aproveitamento energético desses subprodutos. Superar essas barreiras exige ações integradas entre setor produtivo, poder público, centros de pesquisa e sociedade civil.

Nesse contexto, a adoção de políticas públicas voltadas à valorização energética dos resíduos, a criação de instrumentos regulatórios que favoreçam a transparência dos dados e a ampliação de linhas de financiamento para tecnologias limpas são fundamentais para viabilizar uma transição energética justa e eficiente.

O fortalecimento da bioenergia a partir de resíduos florestais na Bahia reforça o papel estratégico do Estado na agenda da sustentabilidade, contribuindo para os *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)*, promovendo justiça socioambiental e consolidando uma economia de baixo carbono baseada na inovação, circularidade e uso racional dos recursos naturais.

efficient in energy conversion per unit of effluent. This may be related to the nature of the residues, with a higher concentration of organic matter, according to data provided by the industries.

The combined energy potential of the two municipalities is significant: 21,428 MWh/year of electricity, 5.7 million Nm^3/year of biomethane; and 1.56 million Nm^3/year of hydrogen. This is equivalent, for example, to the annual energy consumption of thousands of households or the supply of a fleet of vehicles fueled with H_2 or biomethane as a substitute or complement to natural gas.

Considering Bahia's natural gas consumption of 6.89 million m^3/day [24], the estimated biomethane production of approximately 15,577 Nm^3/day from biogas derived from anaerobic treatment of pulp and paper sector effluents could meet 0.23% of the state's total natural gas demand.

Hydrogen production from these effluents aligns with Law No. 14948/2024, which regulates low-carbon hydrogen [25]. This further highlights the opportunity to integrate energy generation with environmental certifications and voluntary carbon markets.

Based on the results for Bahia's pulp and paper sector, the following key aspects of its energy potential can be highlighted:

- *The municipality of Mucuri stands out for its absolute effluent volume and energy generation owing to its large industrial park.*
- *The municipality of Camaçari, on the other hand, shows higher energy efficiency per cubic metre of effluent, indicating potential for the strategic expansion of energy recovery.*
- *The combined contribution of these two hubs demonstrates that industrial effluents from the pulp and paper sector in Bahia represent significant sources of renewable energy, capable of generating both environmental and economic benefits if properly treated.*
- *This energy production could be integrated into the distributed generation policy (Law Nº. 14300/2022), reducing operational costs and contributing to the decarbonization of the industrial energy mix.*

It should be noted that the energy potentials for the municipality of Eunápolis, where the Veracel Celulose industrial plant is located, were not included in this analysis because of the unavailability of technical and operational data, which prevented reliable estimates.

Despite the considerable energy potential associated with the recovery of industrial liquid effluents, precise estimation of this potential in Bahia's pulp and paper sector still faces several technical, institutional, and informational barriers. These limitations constrain the advancement of more sustainable and integrated waste and energy management strategies.

The main barrier observed is the lack of publicly available and systematized data from companies in the sector. Furthermore, clear regulatory requirements regarding the transparency of environmental and energy data for industrial effluent treatment are absent. Most sustainability reports, when available, are limited to aggregated indicators and do not provide the detailed information needed to enable accurate energy modeling of liquid residues.

Another relevant barrier relates to the physicochemical characteristics of pulp and paper effluents, which vary significantly depending on the type of raw material, production process employed (kraft, sulfite, etc.), and the stage of the process from which the effluent originates (bleaching, washing, and digestion). This requires a detailed characterization of the organic load and biodegradability of the residues, which is not always systematically performed by companies.

In the context of Bahia, there is a significant concentration of the sector's productive chain in a few municipalities, particularly Mucuri and Camaçari, which play a central role in industrial production and processing. This concentration may affect both residue management and the implementation of regional policies for energy recovery from industrial effluents.

6.6 FINAL CONSIDERATIONS

The forest sector in Bahia plays a central role in both the state and national economy, combining strong economic performance, relevant social contributions, and environmentally responsible practices aligned with sustainability. The combination of high forest productivity, advanced technology, and continuous investment in innovation positions the state as a reference in sustainable forest management and pulp and paper production, with prominence in the municipalities of Mucuri, Camaçari, and Eunápolis.

The generation and energy utilization of forest residues, especially those originating from industrial wood processing and the pulp and paper sector, represent a strategic front for diversifying the energy mix and strengthening the regional bioeconomy. The energy recovery of these residues contributes to reducing environmental liabilities, enhancing the energy self-sufficiency of industrial plants, and advancing production practices aligned with decarbonization goals.

The analysis of the energy potential of industrial effluents demonstrates the feasibility of generating electricity, biomethane, and hydrogen, turning an environmental liability into an economic asset. The data reveal significant opportunities for Bahia to expand its participation in the bioenergy chain, particularly through industrial residues with high organic loads, such as those derived from pulp production.

However, the study also highlights relevant challenges, such as the absence of systematic public data, the heterogeneity of residues, and the lack of specific regulatory frameworks that promote transparency and energy utilization of these by-products. Overcoming these barriers requires integrated actions involving the productive sector, public authorities, research institutions, and civil society.

In this context, adopting public policies aimed at promoting energy recovery from residues, creating regulatory instruments that enhance data transparency, and expanding financing mechanisms for clean technologies are key to enabling a fair and efficient energy transition.

Strengthening bioenergy production from forest residues in Bahia reinforces the state's strategic role in the sustainability agenda, contributing to the Sustainable Development Goals (SDGs), promoting socio-environmental justice, and consolidating a low-carbon economy based on innovation, circularity, and the rational use of natural resources.

Atlas Bioenergia Bahia

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO NA BAHIA

ENERGY RECOVERY OF RESIDUES FROM THE SUGAR-ENERGY SECTOR IN BAHIA

Neste capítulo é apresentado um panorama atualizado da produção nacional de açúcar e etanol e discutido a estrutura industrial e os desafios associados à variabilidade climática e ao uso eficiente da matéria-prima (cana-de-açúcar). Também são analisadas as contribuições do segmento para o setor de energia por meio do uso dos resíduos de processo para geração de energia, como a produção de biogás decorrente da utilização da vinhaça e da torta de filtro, a produção de biometano com a purificação do biogás, a cogeração de eletricidade com a utilização do bagaço de cana e a eletricidade com o biogás produzido. Por fim, examina-se a dinâmica do setor sucroenergético na Bahia, incluindo dados de produção, níveis de mecanização da colheita e o potencial energético dos subprodutos.

7.1 PRODUÇÃO, MERCADO E GERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROENERGÉTICO BRASILEIRO

O setor sucroalcooleiro ou sucroenergético brasileiro é um dos pilares fundamentais da economia nacional e desempenha um papel estratégico no cenário global, seja pela produção de açúcar e etanol ou pela geração de energia limpa com biomassa. O segmento envolve a cadeia produtiva da cana-de-açúcar desde o seu cultivo à industrialização e à comercialização de álcool, aguardente, etanol e solventes [1].

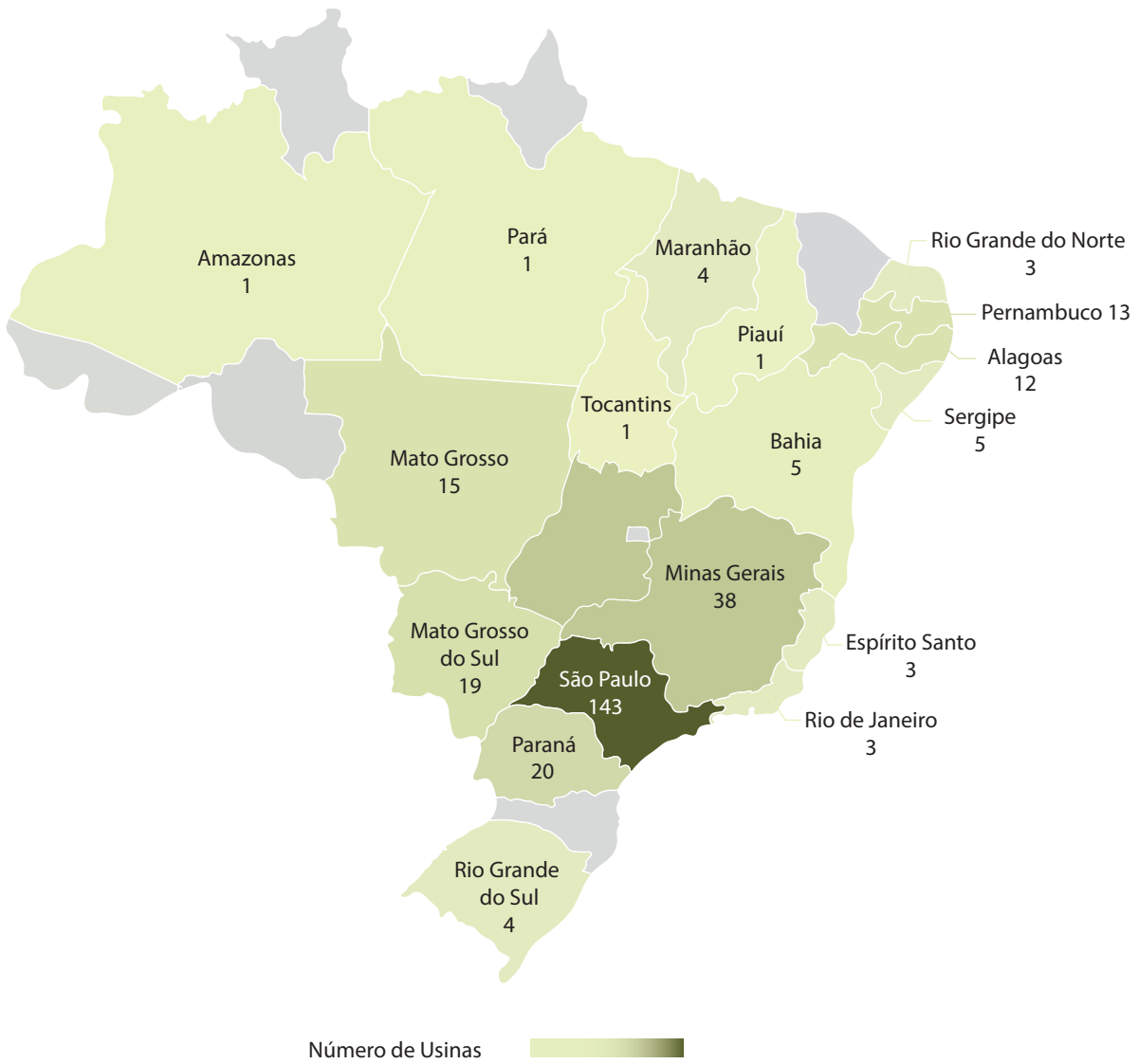
O setor é caracterizado por uma cadeia produtiva integrada, composta por produtores de cana, usinas de açúcar e etanol e empresas de logística. As unidades produtoras, muitas vezes, processam tanto açúcar quanto etanol, adaptando-se às oscilações do mercado [1].

Atualmente, a principal região produtora é o Centro-Sul, especialmente o Estado de São Paulo, responsável por cerca de 60% da produção nacional de cana-de-açúcar. Outras regiões importantes incluem Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Paraná. O Nordeste, embora tenha perdido protagonismo, ainda mantém relevante produção, sobretudo para o abastecimento do mercado interno [2]. *A Figura 7.1* ilustra a distribuição das usinas do setor sucroalcooleiro.

Quanto à produção nacional, na safra 2023/2024, foram processados 654,434 milhões de t de cana-de-açúcar, resultando numa produção expressiva de 42.425 t de açúcar. Com esse total de cana moída foram produzidos 13,10 bilhões de litros de etanol anidro e 20.489 milhões de litros de etanol hidratado, consolidando o Brasil como um dos maiores produtores globais desses energéticos [3].

Todavia, as projeções para a safra 2024/2025 apontam para uma possível redução da produtividade. Essa tendência negativa pode ser explicada, principalmente, pelas intempéries climáticas que impactaram o ciclo da cana-de-açúcar ao longo do período, conforme indica a Companhia Nacional de Abastecimento [4]. Entre os fatores

Figura 7.1 Distribuição do número de usinas de açúcar e etanol por Estado no Brasil.
Figure 7.1 *Distribution of the number of sugar and ethanol mills by state in Brazil.*



Fonte: elaborada pelos autores com dados de [2]. / *Source: prepared by the authors using data from* [2].

This chapter presents an updated overview of national sugar and ethanol production and discusses the industrial structure and challenges associated with climate variability and the efficient use of the raw material (sugarcane). It also analyzes the segment's contributions to the energy sector by means of the use of process residues for energy generation, such as biogas production from vinasse and filter cake, biomethane production from biogas upgrading, CHP from sugarcane bagasse, and electricity from the biogas produced. Finally, the dynamics of the sugarcane sector in Bahia are examined, including production data, harvest mechanization levels, and the energy potential of byproducts.

7.1 PRODUCTION, MARKET, AND ENERGY GENERATION IN THE BRAZILIAN SUGAR-ENERGY SECTOR

The Brazilian sugar-energy sector is one of the fundamental pillars of the national economy and plays a strategic role on the global stage, whether by means of the production of sugar and ethanol or the generation of clean energy from biomass. The segment encompasses the sugarcane production chain, from cultivation to industrialization and the commercialization of alcohol, spirits, ethanol, and solvents [1].

The sector is characterized by an integrated production chain, comprised of sugarcane producers, sugar and ethanol mills, and logistics companies. Production units often process both sugar and ethanol, adapting to market fluctuations [1].

Currently, the main producing region is the Center-South, especially the State of São Paulo, responsible for approximately 60% of national sugarcane production. Other important regions include Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, and Paraná. The Northeast region, although losing prominence, still maintains significant production, especially for supplying the domestic market [2]. Figure 7.1 illustrates the distribution of sugar and ethanol mills.

Regarding national production, in the 2023/2024 crop, 654 million tons of sugarcane were processed, resulting in a significant output of 42 millions tons of sugar. This total amount of crushed sugarcane produced 13billion liters of anhydrous ethanol and 20 million liters of hydrous ethanol, solidifying Brazil as one of the largest global producers of these energy sources [3].

However, projections for the 2024/2025 crop point to a possible reduction in productivity. This negative trend can be explained primarily by the adverse weather conditions that impacted the sugarcane cycle throughout the period, as reported by the National Supply Company [4]. Among the climatic factors that can affect productivity are prolonged periods of drought, excessive rainfall at critical moments in the plant's development, and extreme temperature variations.

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO NA BAHIA

Regarding the industrial structure of the sector, during the 2023/2024 crop, Brazil had 428 sugar and ethanol plants. However, only 344 of these units were actually operating, illustrating a situation of idle capacity for various reasons, such as market issues, technical or economic constraints, and internal restructuring processes within companies. Figure 7.2 illustrate sthe total number of plants in operation and distributes them by production profile for the 2023/2024 and 2024/2025 crop, allowing you to visualize changes in the industrial park over time.

According to updated information from the National Petroleum Agency (ANP) [2], in 2024, the country had 357 active plants duly authorized to produce hydrous and anhydrous ethanol. In addition to these, 7 units were under construction and 10 were undergoing processes to expand their installed capacity, demonstrating constant investments to meet the growing market demands.

The installed capacity authorized by the ANP for domestic hydrous ethanol production reached 264,486 m³/day, while that of anhydrous ethanol reached 142,517 m³/day; these figures demonstrate the robust potential of the sector to supply both the domestic and export markets.

In this scenario, the Brazilian sugar-energy is the world's largest sugar producer and the 2nd largest ethanol producer, behind only the United States. In the international market, Brazilian sugar is highly competitive thanks to its favorable climate, production scale, and mill efficiency. The country exports to over one hundred countries, with important markets including India (477,130 t); Saudi Arabia (440,150 t); Morocco (247,400 t); Algeria (206,600 t); and Malaysia (149,420 t). For many years, Brazil accounted for over 40% of global sugar trade [6].

Brazilian ethanol stands out as a biofuel with a highly favorable energy balance and low greenhouse gas emissions. The product supplies both domestic and international markets, with growing exports to countries seeking clean energy alternatives [7].

However, the sector faces the challenge of maintaining high levels of efficiency and innovation, especially in a context of climate variability and market fluctuations. The resilience of mills, combined with the adoption of new technologies and the increase in sustainable agricultural practices, is crucial to ensuring the sector's competitiveness and sustainability in future production cycles [7].

In the national economy, the sector represents approximately 2% of Brazil's Gross Domestic Product (GDP) and directly and indirectly employs nearly 1 million people, ranging from rural workers to engineers, technicians, and industrial professionals. In rural areas, sugarcane cultivation contributes to economic dynamism and social inclusion, especially in rural municipalities [8].

Furthermore, the sector has driven technological innovation, particularly in the mechanization of harvesting, the development of more productive and resilient sugarcane varieties, and the improvement of industrial processes [8].

climáticos que podem afetar a produtividade estão períodos prolongados de seca, excesso de chuvas em momentos críticos do desenvolvimento da planta e variações extremas de temperatura.

No que se refere à estrutura industrial do setor, durante a safra 2023/2024, o Brasil possuía 428 usinas de açúcar e etanol instaladas. Contudo, apenas 344 dessas unidades estavam efetivamente em operação, ilustrando um quadro de ociosidade instalado por diferentes razões, como questões de mercado, restrições técnicas ou econômicas e processos de reestruturação interna nas empresas. A *Figura 7.2* ilustra o número total de usinas em operação e as distribui por perfil de produção para as safras 2023/2024 e 2024/2025, permitindo visualizar as mudanças no parque industrial ao longo do tempo.

De acordo com informações atualizadas da Agência Nacional de Petróleo [2], no ano de 2024, o País apresentava 357 usinas ativas e devidamente autorizadas para a produção de etanol hidratado e anidro. Além dessas, 7 unidades estavam em fase de construção e 10 passavam por processos de ampliação da capacidade instalada, evidenciando investimentos constantes para atender às demandas crescentes do mercado.

A capacidade instalada autorizada pela ANP para produção nacional de etanol hidratado alcançou o patamar de 264.486 m³/dia, enquanto a de etanol anidro ficou em 142.517 m³/dia, números que demonstram o potencial robusto do segmento para abastecer tanto o mercado interno quanto às exportações.

Diante desse cenário, o setor sucroalcooleiro brasileiro é o maior produtor mundial de açúcar e o 2º maior produtor de etanol, atrás apenas dos Estados Unidos. No mercado internacional, o açúcar brasileiro é altamente competitivo graças ao clima favorável, à escala de produção e à eficiência das usinas. O País exporta para mais de cem países, sendo importantes mercados Índia (477,13 mil t); Arábia Saudita (440.150 t); Marrocos (247.400 t); Argélia (206.600 t); e Malásia (149.420 t). Em muitos anos, o Brasil responde por mais de 40% do comércio mundial de açúcar [6].

O etanol brasileiro destaca-se por ser um biocombustível com balanço energético altamente favorável e baixa emissão de gases poluentes. O produto abastece tanto o mercado interno quanto o externo, com exportações crescentes para países que buscam alternativas energéticas limpas [7].

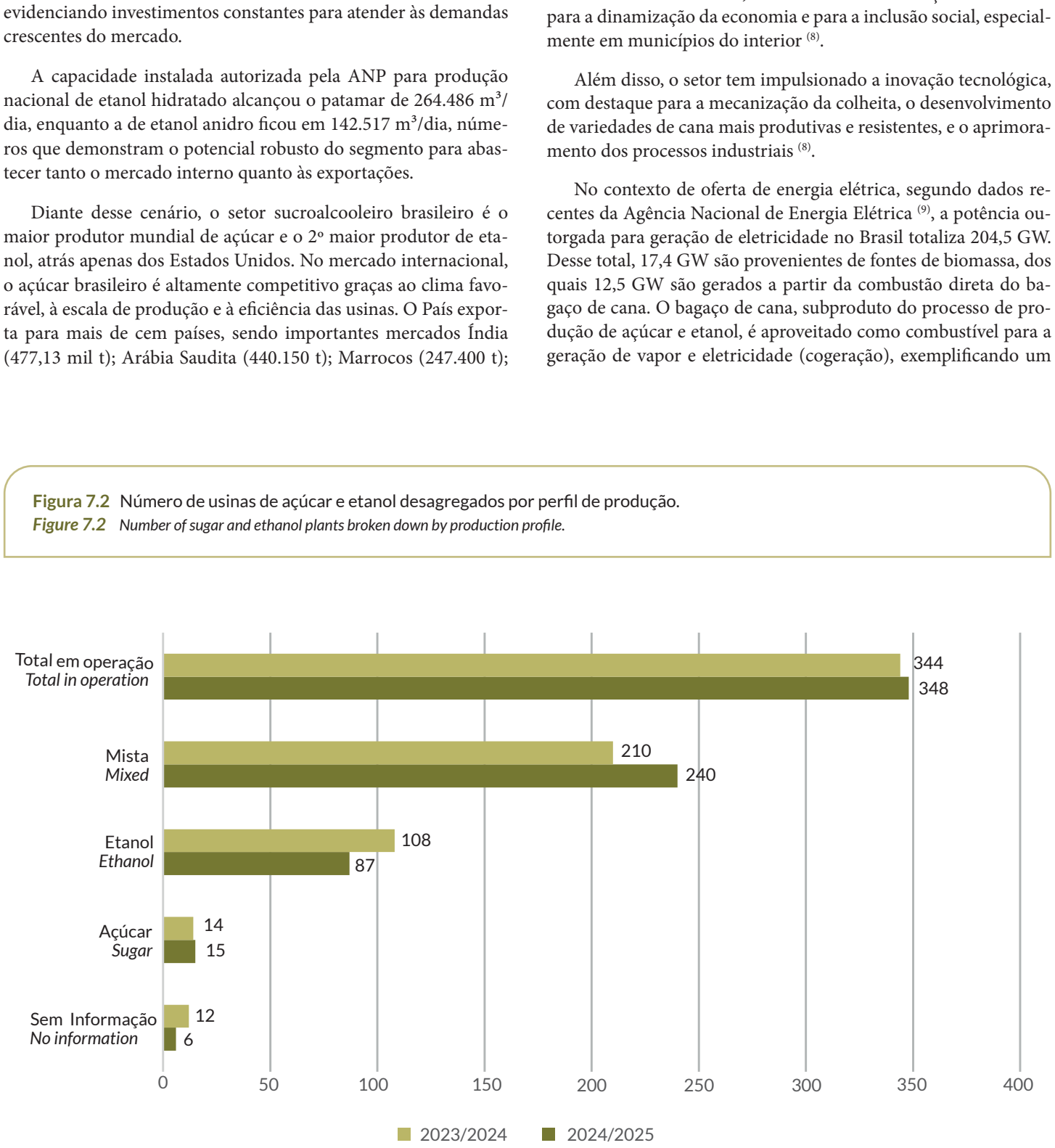
Entretanto, o setor enfrenta o desafio de manter níveis elevados de eficiência e inovação, sobretudo em um contexto de variabilidade climática e flutuações mercadológicas. A resiliência das usinas, aliada à adoção de novas tecnologias e ao incremento de práticas agrícolas sustentáveis, é determinante para garantir a competitividade e sustentabilidade do setor nos próximos ciclos produtivos [7].

Na economia nacional, o setor representa cerca de 2% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro e emprega, direta e indiretamente, próximo a 1 milhão de pessoas, abrangendo desde trabalhadores rurais até engenheiros, técnicos e profissionais da indústria. No meio rural, o cultivo da cana-de-açúcar contribui para a dinamização da economia e para a inclusão social, especialmente em municípios do interior [8].

Além disso, o setor tem impulsionado a inovação tecnológica, com destaque para a mecanização da colheita, o desenvolvimento de variedades de cana mais produtivas e resistentes, e o aprimoramento dos processos industriais [8].

No contexto de oferta de energia elétrica, segundo dados recentes da Agência Nacional de Energia Elétrica [9], a potência outorgada para geração de eletricidade no Brasil totaliza 204,5 GW. Desse total, 17,4 GW são provenientes de fontes de biomassa, dos quais 12,5 GW são gerados a partir da combustão direta do bagaço de cana. O bagaço de cana, subproduto do processo de produção de açúcar e etanol, é aproveitado como combustível para a geração de vapor e eletricidade (cogeração), exemplificando um

Figura 7.2 Número de usinas de açúcar e etanol desagregados por perfil de produção.
Figure 7.2 *Number of sugar and ethanol plants broken down by production profile.*



Fonte: elaborada pelos autores com dados de [5]. / *Source: prepared by the authors with data from* [5].

Tabela 7.1 Potência outorgada por fonte de biomassa.
Table 7.1 *Capacity granted by biomass source.*

Origem *Origin*	Potência outorgada *Granted power*	Potência física *Physical power*	Potência outorgada *Granted power*	Potência física *Physical power*
	(MW)	(MW)	(%)	(%)
Capim elefante / *Elephant grass*	20	20	0,1	0,1
Casca de arroz / *Rice husk*	59	59	0,3	0,3
Licor negro / *Black liquor*	3.335	3.325	19,1	19,7
Bagaço de cana / *Sugarcane bagasse*	12.506	11.964	71,6	70,9
Carvão vegetal e RU / *Charcoal and RW*	38	38	0,2	0,2
Lenha e resíduos florestais / *Firewood and forest residues*	1.084	1.036	6,2	6,1
Resíduos sólidos urbanos / *Municipal solid waste*	24	24	0,1	0,1
Outras biomassas / *Other biomasses*	166	166	0,9	1,0
Biogás / *Biogas*	242	233	1,4	1,4
Total	**17.474**	**16.867**	**100**	**100**

Nota: Potências considerando apenas UTEs em operação. / *Note: Power considering only operating TPPs.*
Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [9]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [9].

ciclo produtivo sustentável, que reduz resíduos e emissões, além de diversificar a matriz energética. Essa potência destaca o protagonismo da cana-de-açúcar em relação a outros insumos de biomassa (*Tabela 7.1).*

A expressiva participação do bagaço de cana na matriz elétrica brasileira decorre, essencialmente, da forte integração com a indústria sucroenergética e da significativa disponibilidade de matéria-prima ao longo de todo o território nacional. O aproveitamento do bagaço, subproduto imediato da extração de açúcar e produção de etanol, sustenta um modelo de cogeração eficiente, em que a biomassa é utilizada tanto para suprir as demandas térmicas da usina quanto de eletricidade em volumes superiores ao consumo interno [7,8].

Esse excedente é resultado de sistemas modernos de cogeração, nos quais caldeiras de alta pressão e turbinas eficientes convertem a energia química do bagaço, mesmo com alto teor de umidade (cerca de 50%), em energia elétrica [7]. Esse processo permite que as unidades produtoras sejam não apenas autossuficientes, mas também fornecedoras relevantes para o Sistema Interligado Nacional (SIN) [3,8]. Dessa forma, as usinas exportam volumes expressivos para a rede, contribuindo para a diversificação e a sustentabilidade do setor elétrico brasileiro [8]. A *Tabela 7.2* detalha o excedente *de el*etricidade de origem sucroenergética efetivamente despachado para a rede, discriminado por estado, nos anos de 2022 e 2023 (GWh).

Ressalte-se que a eletricidade gerada pelo setor sucroenergético apresenta caráter sazonal, variando conforme a região produtora [7]. Entre setembro e março, a maior produção ocorre nas regiões Norte e Nordeste, enquanto de abril a novembro predomina a geração nas regiões Centro-Sul [10]. Cabe destacar que o período de colheita da cana-de-açúcar no Centro-Sul coincide com a estação seca e crítica para o setor elétrico brasileiro, compreendida entre maio e novembro [3].

Tabela 7.2 Bioeletricidade sucroenergética para a rede, por Estado, 2022 e 2023.
Table 7.2 *Sugar-based bioelectricity to the grid, by state, 2022 e 2023.*

UF *State*	2022	2023	2022	2023
	(GWh)	(GWh)	(%)	(%)
SP	9.616	11.063	52,3	52,7
MG	2.828	3.249	15,4	15,5
GO	2.387	2.404	13,0	11,5
MS	1.874	2.096	10,2	10,0
PR	681	880	3,7	4,2
AL	146	323	0,8	1,5
MT	261	285	1,4	1,4
PE	152	167	0,8	0,8
TO	154	141	0,8	0,7
ES	143	138	0,8	0,7
PB	54	71	0,3	0,3
RN	24	67	0,1	0,3
SE	42	54	0,2	0,3
PI	16	19	0,1	0,1
BA	14	12	0,1	0,1
RJ	4	3	0,0	0,0
Total	**18.397**	**20.973**	**100,0**	**100,0**

Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [3].
Source: prepared by the authors based on data from [3].

In terms of electricity supply, according to recent data from the National Electric Energy Agency [9], the capacity authorized for electricity generation in Brazil totals 204.5 GW. Of this total, 17.4 GW comes from biomass sources, of which 12.5 GW is generated from the direct combustion of sugarcane bagasse. Sugarcane bagasse, a byproduct of the sugar and ethanol production process, is used as fuel for combined heat and power (CHP), exemplifying a sustainable production cycle that reduces residues and emissions, in addition to diversifying the energy mix. This capacity highlights the leading role of sugarcane in relation to other biomass inputs (Table 7.1).

The significant share of sugarcane bagasse in the Brazilian electricity mix is essentially due to the strong integration with the sugarcane industry and the significant availability of feedstock throughout the country. The use of bagasse, an immediate byproduct of sugar extraction and ethanol production, supports an efficient CHP model, in which biomass is used to meet both the plant's thermal demands and electricity in volumes exceeding domestic consumption [7,8].

This surplus is the result of modern CHP systems, in which high-pressure boilers and efficient turbines convert the chemical energy of bagasse, even with a high moisture content (approximately 50%), into electrical energy [7]. This process allows production units to be not only self-sufficient but also significant suppliers to the National Interconnected System (SIN) [3,8]. Thus, the plants export significant amounts to the grid, contributing to the diversification and sustainability of the Brazilian electricity sector [8]. Table 7.2 details the surplus sugar-based electricity actually dispatched to the grid, broken down by state, in 2022 and 2023 (GWh).

It should be noted that the electricity generated by the sugarcane sector is seasonal, varying according to the producing region [7]. From September to March, the highest production occurs in the North and Northeast regions, while from April to November, generation predominates in the Center-South regions [10]. It is worth noting that the sugarcane harvest period in the Center-South coincides with the dry season, which is critical for the Brazilian electricity sector, from May to November [3].

Regarding the sugarcane harvesting system, the manual system traditionally required burning the straw before harvesting, a practice adopted to facilitate harvesting and reduce the presence of venomous animals. However, it generated significant environmental impacts, such as polluting gas emissions, loss of biodiversity, and health risks to rural communities [4].

With growing environmental concerns and the need to make production more sustainable, sugarcane-producing states began adopting their own timelines for the progressive implementation of mechanized harvesting. These timelines considered not only the reduction of environmental impacts but also the socioeconomic effects of adopting this technology, including the need for workforce retraining and the specific topography of each region, as areas with rugged terrain present greater challenges for mechanization [4].

The transition was marked by a rapid growth in the number of harvesters in operation. In less than twenty years, the sector went from 1,221 machines in the 2007/08 crop to 5,002 in the 2024/2025 crop. Not only did the number increase, but harvester efficiency also improved, reflecting the sector's technological advancements [4]. The impact of this transformation is especially seen in the reduced need for straw burning, providing direct environmental benefits, such as improved air quality, reduced carbon emissions and the possibility of using straw for energy generation or for soil cover [7].

Recent data from the National Supply Company (CONAB) [4] indicate that the adoption of mechanized harvesting has reached high levels in several states, demonstrating the sector's commitment to cleaner and more efficient production practices (Table 7.3).

7.2 OVERVIEW OF THE SUGAR-ENERGY SECTOR IN BAHIA: INDUSTRIAL PRODUCTION AND POTENTIAL

Bahia has shown consistent advances in sugarcane productivity over the past few harvests. With each production cycle, an improvement in average yield is observed, resulting from efforts to adopt technologies and improve crop management. Despite these advances, it is important to highlight that Bahia's average yield remains lower than that of the states in the Center-West and Southeast regions of the country. This difference is primarily due to less favorable climate and soil conditions in Bahia, which pose additional challenges for the State's sugarcane industry.

In the 2023/2024 crop, the area planted with sugarcane in Bahia totaled 65,700 ha [4]. This area resulted in a production of 6 million tons of sugarcane, a significant figure that highlights the State's relevance in the regional context, even given the limitations imposed by the natural environment [4].

For the next cycle, a 2.7% increase in planted area is expected compared to the previous period. However, this expansion is not expected to translate into an increase in total production. On the contrary, a reduction in production is estimated, driven primarily by a 4.1% drop in average crop productivity [4]. The factor responsible for this performance is adverse weather conditions, which delayed planting management and severely affected areas planted in the second half of 2023, a typical scenario for sugarcane crops in Bahia [4].

Quanto ao sistema de corte da cana-de-açúcar, tradicionalmente, o manual demandava a queima da palha antes da colheita, prática realizada para facilitar o corte e reduzir a presença de animais peçonhentos. Entretanto gerava impactos ambientais significativos, como emissões de gases poluentes, perda de biodiversidade e riscos à saúde das comunidades rurais [4].

Com o avanço das preocupações ambientais e a necessidade de tornar a produção mais sustentável, os Estados produtores de cana-de-açúcar passaram a adotar cronogramas próprios para a implementação progressiva da colheita mecanizada. Esses cronogramas consideraram não só a redução dos impactos ambientais, mas também os efeitos socioeconômicos da adoção dessa tecnologia, incluindo a necessidade de requalificação da mão de obra e as particularidades da topografia de cada região, já que áreas com relevo acidentado apresentam maior desafio à mecanização [4].

A transição foi marcada por um crescimento acelerado no número de máquinas colhedoras em operação. Em menos de vinte anos, o setor passou de 1.221 máquinas na safra 2007/08 para 5.002 na safra 2024/2025. Não apenas o número aumentou, como também a eficiência das colhedoras evoluiu, refletindo o avanço tecnológico do setor [4]. O impacto dessa transformação é observado especialmente na diminuição da necessidade da queima da palha, proporcionando benefícios ambientais diretos, como a melhora da qualidade do ar, a redução das emissões de carbono e a possibilidade de aproveitamento da palha para geração de energia ou cobertura do solo [7].

Dados recentes da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) [4] indicam que a adoção da colheita mecanizada atingiu patamares elevados em diversos Estados, evidenciando o compromisso do setor com práticas produtivas mais limpas e eficientes *(Tabela 7.3)*.

Tabela 7.3 Percentual de colheita mecanizada de cana-de-açúcar.
Table 7.3 *Percentage of mechanized sugarcane harvesting.*

UF/ *State*	2020/21	2021/22	2022/23	2023/24	2024/25
AM	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
PA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
TO	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
MA	57,0	78,8	78,1	83,7	78,2
PI	-	-	13,0	14,0	14,0
RN	57,1	51,5	50,2	75,6	75,6
PB	25,6	24,1	8,3	34,8	38,3
PE	1,2	3,5	12,1	5,5	6,3
AL	22,2	29,2	37,2	54,8	7,9
SE	8,7	8,4	13,0	17,0	20,5
BA	15,1	13,2	21,1	22,7	42,7
MT	93,6	100,0	100,0	100,0	100,0
MS	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7
GO	98,5	97,8	98,8	97,9	97,9
MG	93,3	97,9	97,6	99,5	99,5
ES	86,0	80,9	74,1	76,6	78,6
RJ	21,0	19,8	17,6	20,2	18,1
SP	98,3	96,9	99,2	99,2	98,2
PR	94,2	95,6	98,4	97,8	98,3
Total	**89,4**	**89,4**	**90,8**	**92,4**	**92,4**

Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [4]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [4].

7.2 PANORAMA DO SETOR SUCROENERGÉTICO NA BAHIA: PRODUÇÃO E POTENCIAL INDUSTRIAL

A Bahia tem demonstrado avanços consistentes na produtividade da cana-de-açúcar ao longo das últimas safras. A cada ciclo produtivo, observa-se uma melhora no rendimento médio, resultado de esforços na adoção de tecnologias e no manejo das lavouras. Apesar desses avanços, é importante destacar que o rendimento médio baiano ainda permanece inferior ao registrado nos Estados do Centro-Oeste e Sudeste do País. Essa diferença é, sobretudo, decorrente de condições climáticas e de solo menos favoráveis no território baiano, que impõem desafios extras para o setor sucroenergético do Estado.

Na safra 2023/2024, a área plantada com cana-de-açúcar na Bahia totalizou 65.700 ha [4]. Essa extensão resultou em uma produção de 6 milhões de t de cana de açúcar, número expressivo que evidencia a relevância do Estado no contexto regional, mesmo diante das limitações impostas pelo ambiente natural [4].

Para o próximo ciclo, a expectativa é de um aumento de 2,7% na área plantada em comparação ao período anterior. No entan-

to, essa ampliação não deverá se refletir em crescimento da produção total. Ao contrário, estima-se uma redução na produção, motivada, principalmente, pela queda de 4,1% na produtividade média das lavouras [4]. O fator responsável por esse desempenho é o comportamento climático adverso, que atrasou o manejo de plantio e prejudicou, com maior intensidade, as áreas plantadas no segundo semestre de 2023, cenário típico das lavouras baianas de cana-de-açúcar [4].

A produção de cana-de-açúcar na Bahia está distribuída em diversos municípios, refletindo a importância da cultura para diferentes regiões do Estado. O *Mapa 7.1* ilustra a localização das áreas cultivadas e das usinas sucroalcooleiras instaladas, demonstrando o papel estratégico dessas unidades industriais na cadeia produtiva local.

Quanto à colheita de cana-de-açúcar, o Estado da Bahia tem registrado avanços significativos em relação à mecanização. Segundo dados da [4]. O percentual de colheita mecanizada aumentou progressivamente a cada safra: em 2022/2023, foi de 21,1%; em 2023/2024, subiu para 22,7%; e a previsão para 2024/2025 indica um salto expressivo, atingindo 42,7% da produção colhida por máquinas [4].

No contexto da produção de etanol, a Bahia destaca-se como o 2º maior produtor do Nordeste, respondendo por cerca de 20% da produção regional. Na safra 2023/2024, o Estado produziu 395,759 milhões de litros de etanol, reforçando sua importância estratégica para o setor sucroalcooleiro do Nordeste [4].

A produção de etanol na Bahia está concentrada em cinco unidades industriais. Quatro delas fabricam tanto etanol hidratado quanto anidro, enquanto uma produz exclusivamente etanol hidratado. Quanto ao perfil produtivo, apenas uma unidade se dedica exclusivamente à produção de etanol hidratado e açúcar, enquanto as demais operam com um perfil misto, combinando a produção de

Sugarcane production in Bahia is distributed across several municipalities, reflecting the importance of the crop for different regions of the State. The Map 7.1 illustrates the location of cultivated areas and installed sugarcane mills, demonstrating the strategic role of these industrial units in the local production chain.

Regarding sugarcane harvesting, the State of Bahia has seen significant advances in mechanization. According to data from [4]. The percentage of mechanized harvesting has increased progressively with each crop: in 2022/2023, it was 21.1%; in 2023/2024, it rose to 22.7%; and the forecast for 2024/2025 indicates a significant increase, reaching 42.7% of production harvested by machines [4].

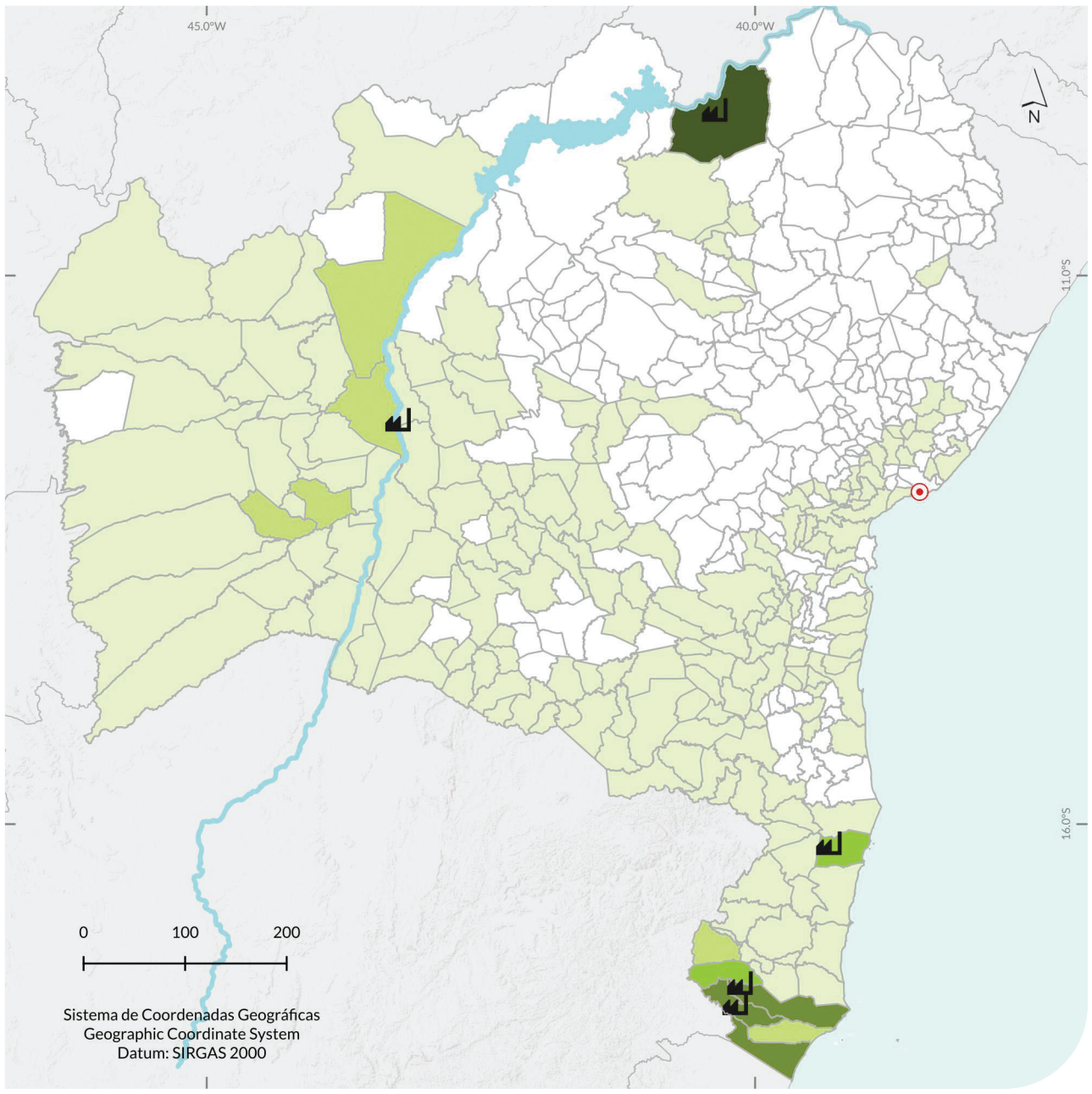
In the context of ethanol production, Bahia stands out as the 2nd largest producer in the Northeast, accounting for approximately 20% of regional production. In the 2023/2024 harvest, the State produced 395.759 million liters of ethanol, reinforcing its strategic importance for the sugar-energy and ethanol sector in the Northeast region [4].

Ethanol production in Bahia is concentrated in five industrial units. Four of them produce both hydrous and anhydrous ethanol, while one produces exclusively hydrous ethanol. Regarding the production profile, only one unit is dedicated exclusively to the production of hydrous ethanol and sugar, while the others operate with a mixed profile, combining the production of sugar, hydrous, and anhydrous ethanol, which provides greater flexibility and dynamism to the sector's production chain in the State [2].

These plants, distributed across different municipalities, have a total daily production capacity of 3,150 m³ of hydrous ethanol and 1,500 m³ of anhydrous ethanol. Usina Santa Maria Ltda., in Medeiros Neto, stands out with the largest installed capacity, producing 1,200 m³/day of hydrous ethanol and 450 m³/day of anhydrous ethanol, followed by Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A. (Agrovale),

Mapa 7.1 Distribuição espacial das áreas cultivadas com cana-de-açúcar, usinas sucroalcooleiras e produção no Estado da Bahia.

Map 7.1 *Spatial distribution of areas cultivated with sugarcane, sugar and ethanol plants and production in the State of Bahia.*



Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [11,12,13,14,15]. */ Source: prepared by the authors based on data from* [11,12,13,14,15].

in Juazeiro, with 700 m³/day of hydrous ethanol and 600 m³/day of anhydrous ethanol. Cia Agropastoril Vale da Piragiba, in Muquém de São Francisco, operates exclusively with hydrous ethanol (350 m³/day), without producing anhydrous ethanol. This distribution highlights the diversity and production potential of the sugar and alcohol sector in Bahia (Table 7.4).

It should be noted that, according to information from the Bahia State Government's Communications Secretariat (Secom), the Bioenergy and Sugarcane Development Hub is currently under construction, with a projected installation of eleven plants. This hub aims to boost Bahia's Middle São Francisco Region both economically and socially, in addition to contributing to the State's self-sufficiency in ethanol and sugar production [16].

7.3 ENERGY RECOVERY FROM SUGARCANE AND ITS BYPRODUCTS

A sugar and alcohol plant that uses sugarcane as feedstock can, depending on its production profile, produce hydrous ethanol, anhydrous ethanol, and sugar, as well as high-energy residues, such as bagasse, vinasse, and filter cake, which can be sustainably reused.

The main technology used to convert vinasse into energy is anaerobic digestion. In this process, the vinasse is sent to covered lagoon-type biodigesters in an oxygen-free environment. Specific microorganisms decompose the organic matter present in the vinasse, resulting in the production of biogas, a mixture composed primarily of methane (CH_4) and carbon dioxide (CO_2) [7].

Filter cake, resulting from sugarcane milling, can be converted into energy using various technologies, such as anaerobic digestion, gasification, direct combustion, and pyrolysis. However, this atlas will only cover anaerobic digestion, as it is the technology currently used by mills in Brazil [7]. As with vinasse, the process involves the decomposition of the filter cake by microorganisms in an oxygen-free environment, producing biogas. The difference lies in the type of biodigester used: for filter cake, the CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) model is used, characterized by a continuously agitated tank [7].

Sugarcane bagasse is used in CHP processes, where it is burned directly in boilers to generate high-pressure steam. This steam is directed to turbines, where the electricity needed to operate the mill is produced, while sell the surplus power and dispatch to the grid . Residual steam from the turbines is reused in the process itself [7].

Furthermore, biogas produced from vinasse and filter cake can be purified, resulting in biomethane, whose composition is similar to that of fossil natural gas [7]. The ethanol production process, used as a basis for estimating the energy potential of the sugarcane sector in the State of Bahia at the municipal level, is represented in Figure 7.3.

7.4 CALCULATION METHODOLOGY

The methodology developed to estimate the potential of biogas, biomethane, and electricity is based on biogas produced through the anaerobic digestion process. The calculation of energy potential considers the installed hydrous ethanol production capacity and the milling capacity of the plants. Based on these parameters, and using generation factors for vinasse, filter cake, and bagasse, the amount of each of these byproducts generated throughout the production process is estimated. Based on these estimates and technical factors related to biogas production, such as total solids and volatile solids contents, the volume of biogas produced is calculated.

Biomethane is estimated based on the volume of biogas generated, the methane concentration present, and the desired purity for the final product. In this study, a value of 90% was adopted, corresponding to the minimum requirement established by the ANP Resolution for vehicular use and network distribution [17].

When the end use of the biogas produced is electricity generation, the potential is calculated considering the volume of biogas, the Methane energy content in kWh/Nm³, the concentration of methane in the biogas and the engine efficiency.

açúcar, etanol hidratado e anidro, o que confere maior flexibilidade e dinamismo à cadeia produtiva do setor no Estado [2].

Essas usinas, distribuídas em diferentes municípios, possuem uma capacidade total diária de produção de 3.150 m³ de etanol hidratado e 1.500 m³ de etanol anidro. Destaca-se a Usina Santa Maria Ltda., em Medeiros Neto, com a maior capacidade instalada, produzindo 1.200 m³/dia de etanol hidratado e 450 m³/dia de etanol anidro, seguida pela Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A. (Agrovale), em Juazeiro, com 700 m³/dia de hidratado e 600 m³/dia de anidro. A Cia Agropastoril Vale da Piragiba, em Muquém de São Francisco, opera exclusivamente com etanol hidratado (350 m³/dia), sem produção de anidro. Essa distribuição evidencia a diversidade e o potencial produtivo do setor sucroalcooleiro na Bahia (*Tabela 7.4).*

Destaque-se que, segundo informações da Secretaria de Comunicação (Secom) do governo do Estado da Bahia, está em fase de construção o Polo de Desenvolvimento Bioenergético e Sucroalcooleiro, com previsão para a instalação de onze usinas. Esse polo tem como objetivo impulsionar, tanto economica quanto socialmente, a Região do Médio São Francisco baiano, além de contribuir para a autossuficiência do Estado na produção de etanol e açúcar [16].

Tabela 7.4 Usinas instaladas no Estado da Bahia.
Table 7.4 *Power plants installed in the State of Bahia.*

Empresa *Company*	Município *Municipality*	Capacidade de produção *Production capacity*	
		Hidratado / *Hydrous* (m³/d)	Anidro / *Anhydrous* (m³/d)
Agroindústrias do Vale do São Francisco S.A. (Agrovale)	Juazeiro	700	600
Bahia Etanol Holding S.A.	Ibirapuã	650	250
Cia Agropastoril Vale da Piragiba	Muquém de São Francisco	350	0
Santa Cruz Açúcar e Álcool Ltda.	Santa Cruz Cabrália	240	200
Usina Santa Maria Ltda.	Medeiros Neto	1.200	450
Total		**3.150**	**1.500**

Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [2]. / *Source: prepared by the authors based on data from [2].*

7.3 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA CANA-DE-AÇÚCAR E SEUS SUBPRODUTOS

Uma usina de açúcar e álcool que utiliza a cana-de-açúcar como matéria-prima pode, dependendo do seu perfil produtivo, gerar etanol hidratado, etanol anidro e açúcar, além de resíduos com alto valor energético, como bagaço, vinhaça e torta de filtro, que podem ser reaproveitados de forma sustentável.

A principal tecnologia utilizada para converter a vinhaça em energia é a biodigestão anaeróbia. Nesse processo, a vinhaça é encaminhada para biodigestores do tipo lagoa coberta, em ambiente isento de oxigênio. Micro-organismos específicos decompõem a matéria orgânica presente na vinhaça, resultando na produção de biogás, uma mistura composta majoritariamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2) [7].

A torta de filtro, resultante da moagem da cana-de-açúcar, pode ser convertida em energia por diferentes tecnologias, como digestão anaeróbia, gaseificação, queima direta e pirólise. Entretanto, neste atlas será abordada apenas a digestão anaeróbia, por ser a tecnologia atualmente empregada pelas usinas no Brasil [7]. Assim como ocorre com a vinhaça, o processo envolve a decomposição da torta de filtro por micro-organismos em ambiente sem oxigênio, produzindo biogás. A diferença está no tipo de biodigestor utilizado: para a torta de filtro, emprega-se o modelo CSTR (*Continuous Stirred Tank Reactor),* caracterizado por um tanque continuamente agitado [7].

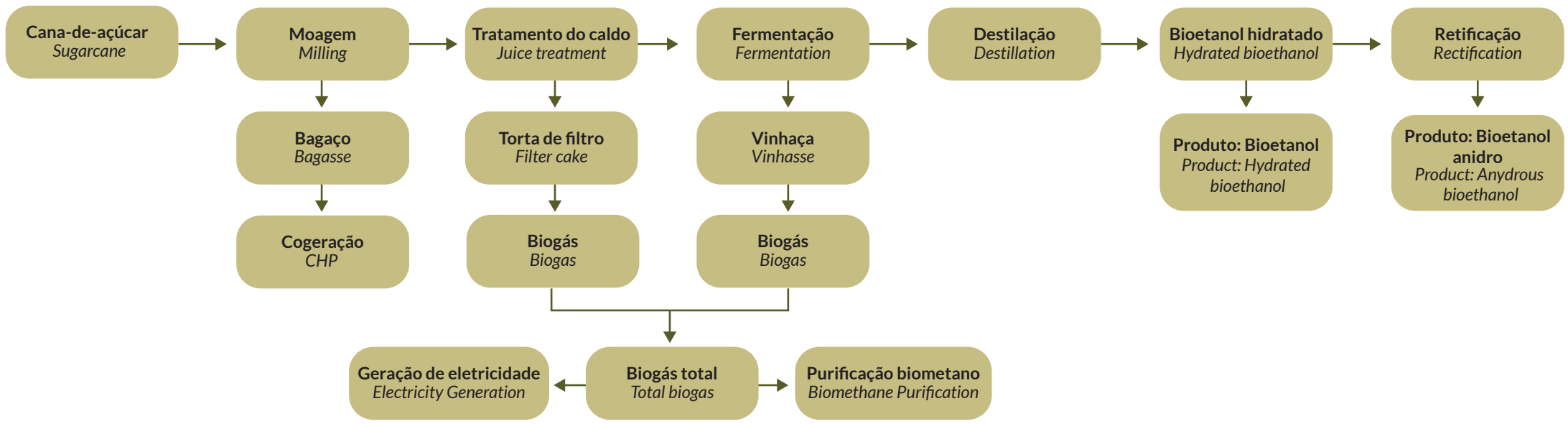
Já o bagaço de cana é aproveitado em processos de cogeração, nos quais é queimado diretamente em caldeiras para gerar vapor em alta pressão. Esse vapor é direcionado para turbinas, onde se produz a eletricidade necessária para a operação da usina, enquanto o excedente é vendido e despachado para a rede elétrica. O vapor residual das turbinas é reaproveitado no próprio processo [7].

Além disso, o biogás produzido a partir da vinhaça e da torta de filtro pode ser purificado, resultando em biometano, cuja composição é semelhante à do gás natural fóssil [7]. O processo de produção de etanol, utilizado como base para estimar o potencial energético do setor sucroenergético no estado da Bahia em âmbito municipal, está representado na *Figura 7.3.*

7.4 METODOLOGIA DE CÁLCULO

A metodologia elaborada para estimar os potenciais de biogás, biometano e eletricidade tem como base o biogás produzido por meio do processo de biodigestão anaeróbia. O cálculo do potencial energético considera a capacidade instalada de produção de etanol hidratado e a capacidade de moagem das usinas. A partir desses parâmetros, e utilizando fatores de geração de vinhaça, torta de filtro e bagaço, estima-se a quantidade gerada de cada um desses subprodutos ao longo do processo produtivo. Com base nessas estimativas e utilizando fatores técnicos relacionados à produção de biogás, como os teores de sólidos totais e sólidos voláteis, calcula-se o volume de biogás produzido.

Figura 7.3 Fluxograma de processo.
Figure 7.3 *Process flowchart.*



Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

O biometano é estimado a partir do volume de biogás gerado, da concentração de metano presente e da pureza desejada para o produto final. Neste estudo, adotou-se o valor de 90%, correspondente à exigência mínima estabelecida pela Resolução ANP para uso veicular e distribuição em rede [17].

Quando o uso final do biogás produzido é a geração de eletricidade, o potencial é calculado considerando o volume de biogás, o poder energético do metano em kWh/Nm³, a concentração de metano no biogás e a eficiência do motor.

A geração de excedentes de eletricidade para a rede elétrica no setor sucroenergético depende essencialmente da tecnologia empregada na conversão energética, além do consumo interno de vapor e energia elétrica no processo de produção de etanol e açúcar. Para avaliar esse potencial de excedentes, foi desenvolvido um modelo com três cenários tecnológicos distintos, os quais analisam a pressão das caldeiras, o tipo de turbinas utilizadas e o aproveitamento do vapor, considerando a eficiência energética ao longo da safra.

No Cenário A, utilizam-se caldeiras de 42 bar e turbinas de contrapressão para acionamento mecânico e geração de energia. O Cenário B considera caldeiras de 60 bar, mantendo o uso de turbinas de contrapressão nos turbogeradores. Já o Cenário C adota tecnologia mais avançada, com caldeiras operando a 80 bar e turbogeradores com turbinas de extração/condensação, permitindo múltiplas extrações de vapor para diferentes etapas do processo produtivo. A quantidade de excedente de eletricidade foi estimada com base no fator de excedente por tonelada de cana moída (kWh/tc) definido para cada cenário.

The generation of surplus electricity for the grid in the sugarcane industry depends essentially on the technology used in energy conversion, in addition to the internal consumption of steam and electricity in the ethanol and sugar production process. To assess this surplus potential, a model was developed with three distinct technological scenarios, which analyze boiler pressure, the type of turbines used, and steam utilization, considering energy efficiency throughout the crop.

Scenario A uses 42-bar boilers and backpressure turbines for mechanical drive and power generation. Scenario B considers 60-bar boilers, maintaining the use of backpressure turbines in the turbogenerators. Scenario C adopts more advanced technology, with boilers operating at 80 bar and turbogenerators with extraction/condensation turbines, allowing multiple steam extractions for different stages of the production process. The amount of surplus electricity was estimated based on the surplus factor per ton of crushed sugarcane (kWh/tc) defined for each scenario.



Foto / *Photo*: Clio / stock.adobe.com

Figura 7.4 Usina de açúcar e etanol.
Figure 7.4 *Sugar and ethanol plant.*

7.5 RESULTS AND SPATIAL REPRESENTATION OF THE ENERGY POTENTIAL OF RESIDUES FROM THE SUGAR-ENERGY SECTOR

The technical energy potential of municipalities with sugar and ethanol plants includes the production of biogas, biomethane obtained from biogas upgrading, electricity generation by motor-generator sets, and hydrogen production from biomethane. Table 7.5 presents the results by municipality and by Identity Territory (IT), considering vinasse and filter cake generated during sugarcane processing as energy inputs.

7.5 RESULTADOS E REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO

Os potenciais técnicos energéticos dos municípios com usinas de açúcar e álcool instaladas abrangem a produção de biogás, biometano obtido a partir da purificação do biogás, geração de eletricidade por grupos motogeradores e produção de hidrogênio a partir do biometano. A *Tabela 7.5* apresenta os resultados por município e por Território de Identidade (TI), considerando como insumos energéticos a vinhaça e a torta de filtro geradas no processamento da cana-de-açúcar.

Tabela 7.5 Potenciais energéticos produzidos a partir dos resíduos do setor sucroenergético.
Table 7.5 *Energy potential produced from waste from the sugar-energy sector.*

Município *Municipality* / **Território de identidade** *Territory of Identity*	**Unidade** *Unit*	**Medeiros Neto** / **Extremo Sul**	**Juazeiro** / **Sertão do São Francisco**	**Ibirapuã** / **Extremo Sul**	**Muquém do São Francisco** / **Velho Chico**	**Santa Cruz Cabrália** / **Costa do Descobrimento**	**Total**
Capacidade instalada de produção de etanol hidratado *Installed capacity for production of hydrous ethanol*	m^3/safra *(m^3/crop)*	288.000	168.000	156.000	84.000	57.600	**753.600**
Capacidade de moagem / *Milling capacity*	tc/safra *(tc/crop)*	3.060.000	1.549.566	1.000.000	1.000.000	500.000	**7.109.566**
Produção torta de filtro / *Filter cake production*	t/safra *(t/crop)*	70.380	35.640	23.000	23.000	11.500	**163.520**
Volume vinhaça / *Vinasse volume*	L/safra *(L/crop)*	4.320.000.000	2.520.000.000	2.340.000.000	1.260.000.000	864.000.000	**11.304.000.000**
Biogás de vinhaça / *Biogas from vinasse*	Nm^3/safra *(Nm^3/crop)*	57.883.800	33.765.550	31.353.725	16.882.775	11.576.760	**151.462.609**
Biogás de torta de filtro / *Biogas from filter cake*	Nm^3/safra (Nm^3/crop)	5.028.683	2.546.496	1.643.361	1.643.361	821.680	**11.683.580**
Biogás total (torta + vinhaça) / *Total biogas (filter cake + vinasse)*	Nm^3/safra *(Nm^3/crop)*	62.912.483	36.312.045	32.997.085	18.526.135	12.398.440	**163.146.189**
Biometano de vinhaça / *Biomethane from vinasse*	Nm^3/safra *(Nm^3/crop)*	30.736.298	17.929.507	16.648.828	8.964.753	6.147.260	**80.426.645**
Biometano de torta de filtro / *Biomethane from filter cake*	Nm^3/safra *(Nm^3/crop)*	2.624.973	1.329.271	857.834	857.834	428.917	**6.098.829**
Biometano total (torta + vinhaça) / *Total biomethane (filter cake + vinasse)*	Nm^3/safra *(Nm^3/crop)*	33.361.270	19.258.778	17.506.662	9.822.588	6.576.177	**86.525.474**
Hidrogênio do biometano de vinhaça / *Hydrogen from vinasse biomethane*	Nm^3/safra *(Nm^3/crop)*	70.791.049	41.294.779	38.345.152	20.647.389	14.158.210	**185.236.579**
Hidrogênio do biometano de torta / *Hydrogen from filter cake biomethane*	Nm^3/safra *(Nm^3/crop)*	6.045.770	3.061.542	1.975.742	1.975.742	987.871	**14.046.666**
Hidrogênio do biometano total / *Hydrogen from total biomethane (filter cake + vinasse)*	Nm^3/safra *(Nm^3/crop)*	76.836.819	44.356.321	40.320.894	22.623.131	15.146.081	**199.283.245**
Geração de energia elétrica vinhaça / *Vinasse electricity generation*	MWh/safra *(MWh/crop)*	143.006	83.420	77.461	41.710	28.601	**374.198**
Geração de energia elétrica torta de filtro / *Filter cake electricity generation*	MWh/safra *(MWh/crop)*	12.213	6.185	3.991	3.991	1.663	**28.043**
Geração de energia elétrica total (torta + vinhaça) / *Total electricity generation (filter cake + vinasse)*	MWh/safra *(MWh/crop)*	155.219	89.605	81.453	45.701	30.264	**402.242**

tc = tonelada de cana moída. / tc = ton of crushed sugarcane.
Fonte: elaborada pelos autores (2025). / Source: prepared by the authors (2025).

Mapa 7.2 / *Map 7.2*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGETICOS PROVENIENTES DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO – VINHAÇA

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM SUGAR-ENERGY SECTOR RESIDUES - VINASSE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

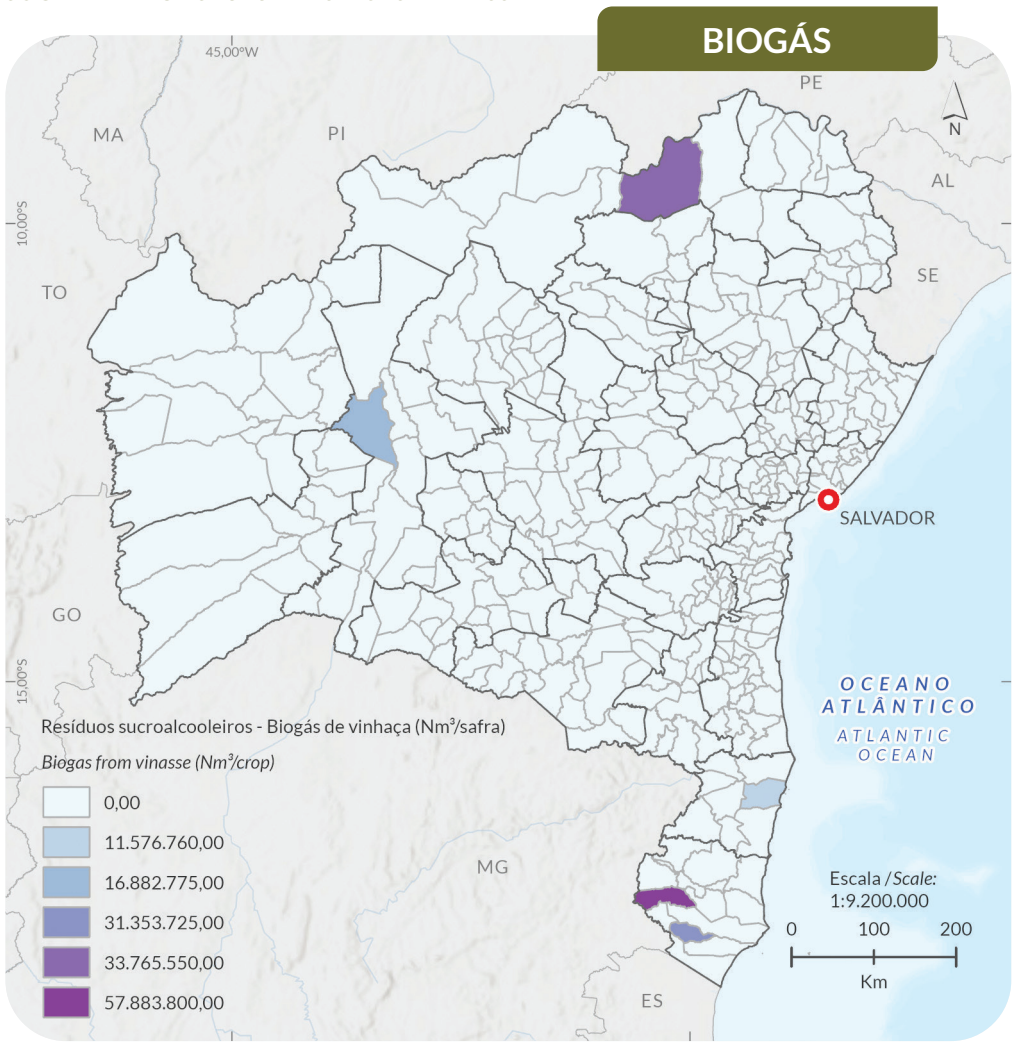
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

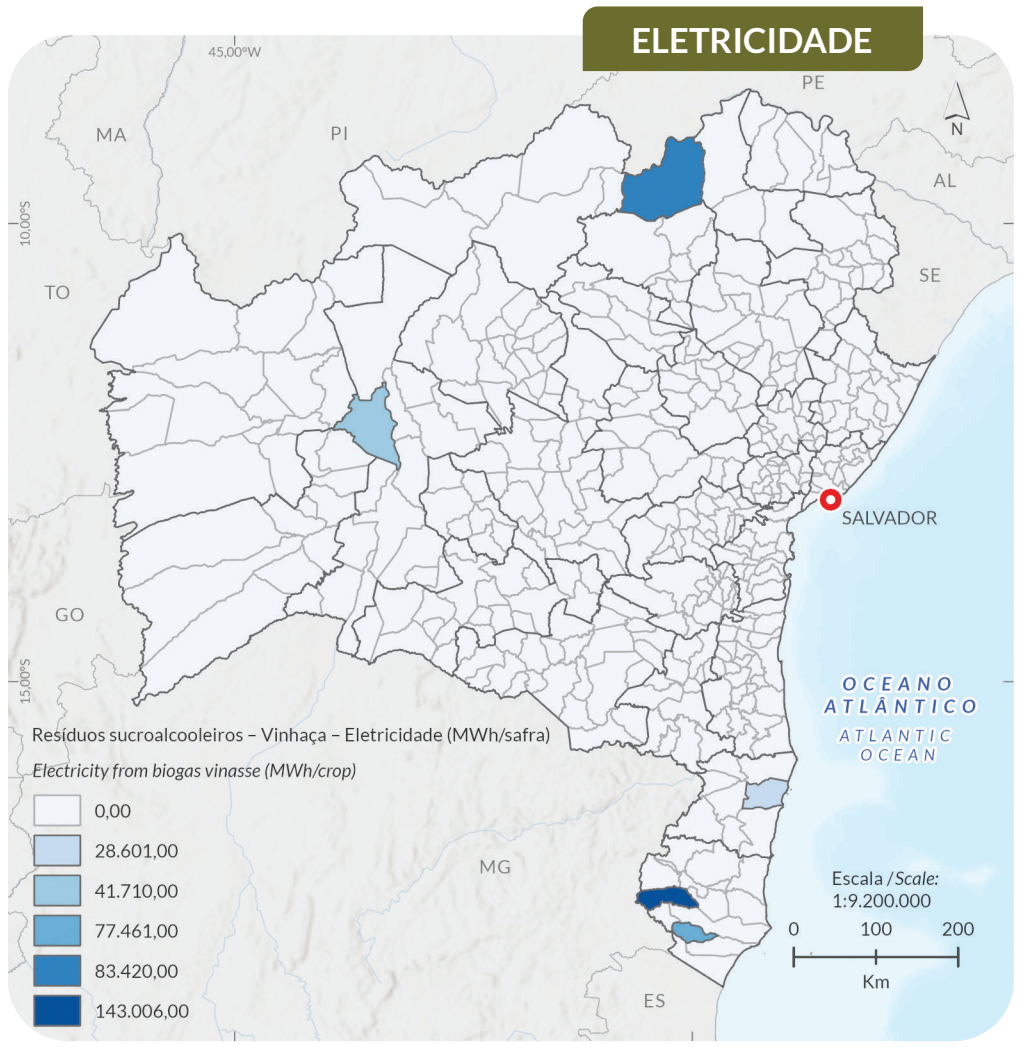
BIOGAS

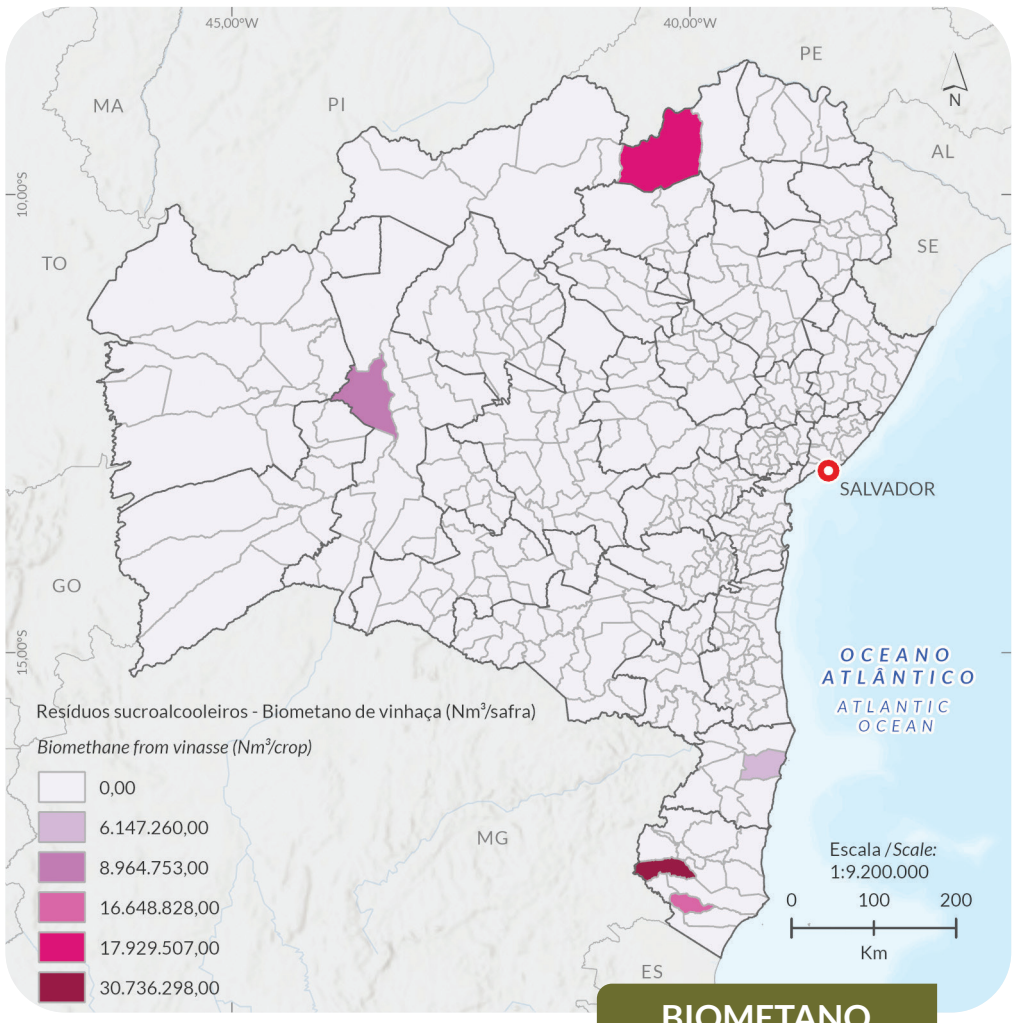
BIOGÁS



ELECTRICITY

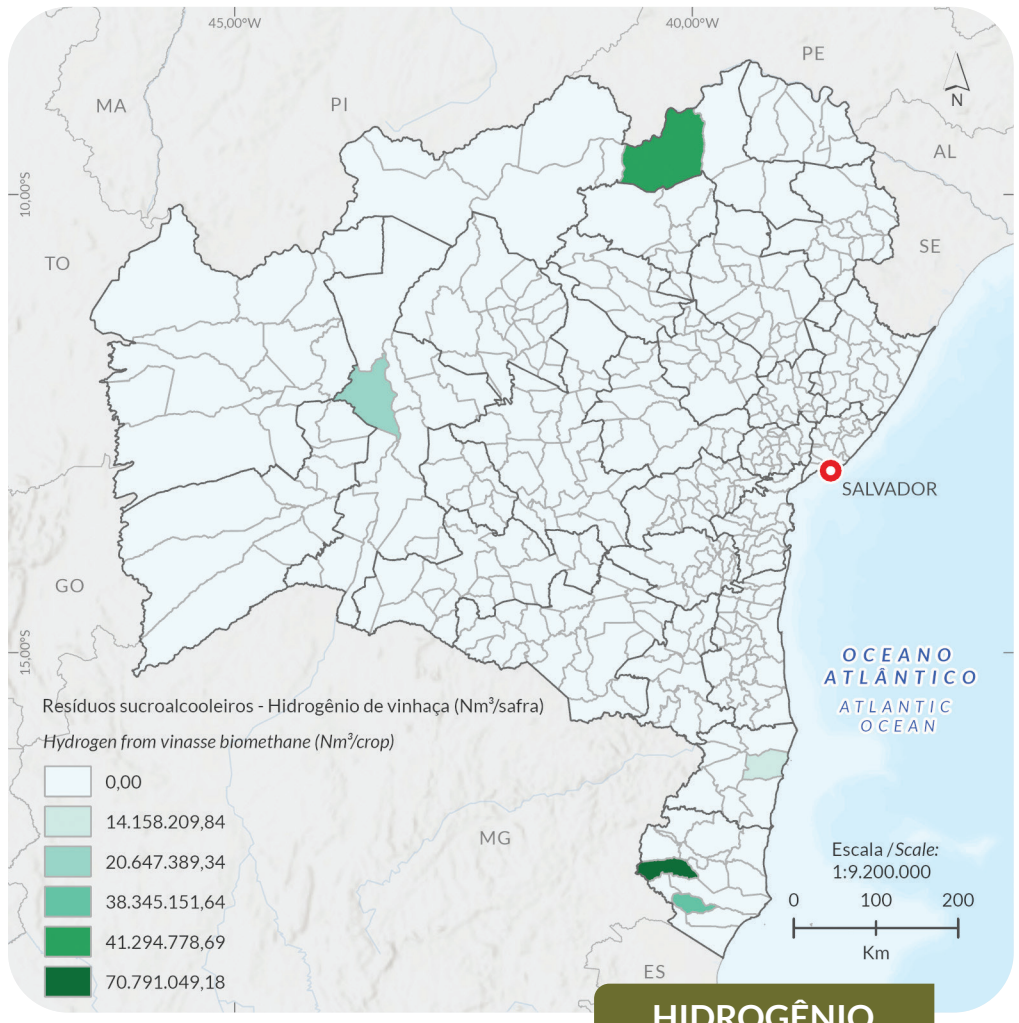
ELETRICIDADE





BIOMETHANE

BIOMETANO



HYDROGEN

HIDROGÊNIO

Mapa 7.3 / *Map 7.3*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGETICOS PROVENIENTES DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO – TORTA DE FILTRO

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM SUGAR-ENERGY SECTOR RESIDUES - FILTER CAKE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

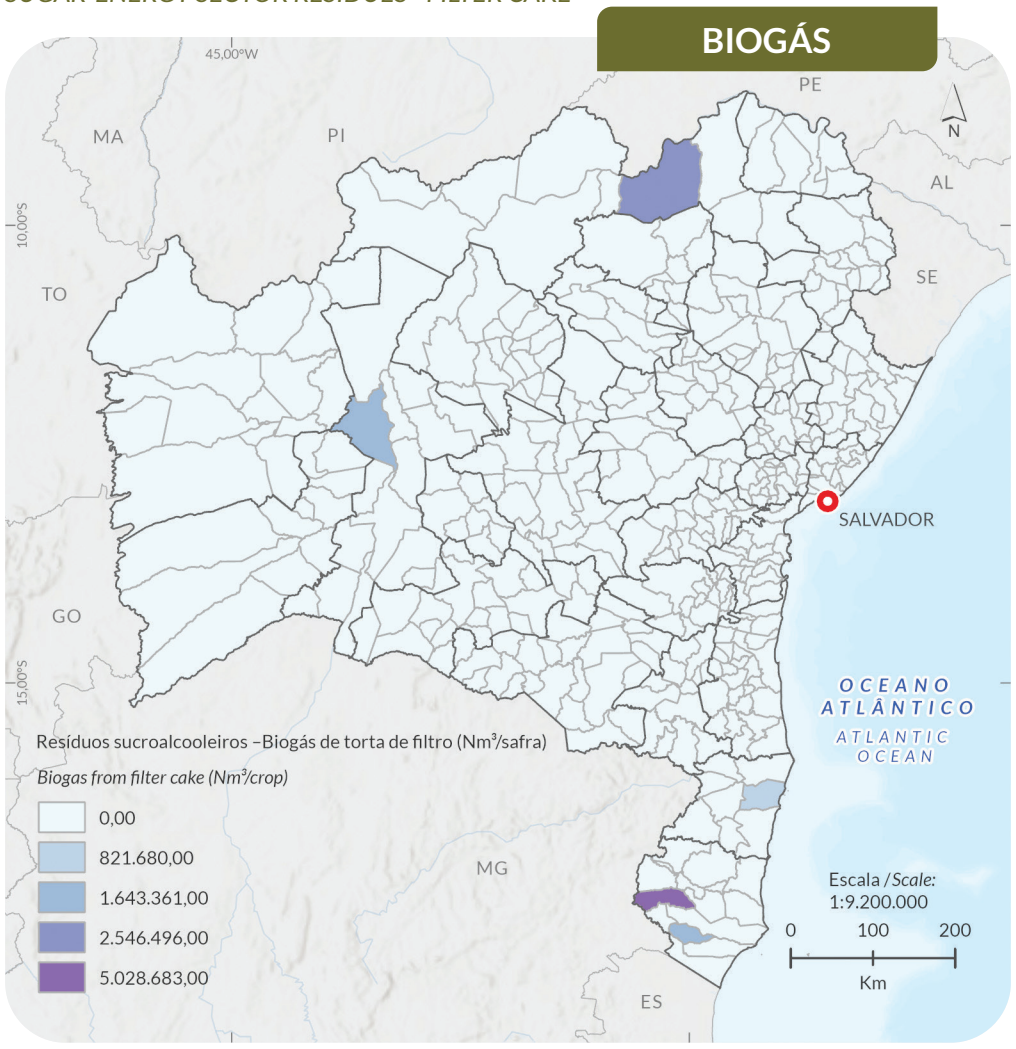
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

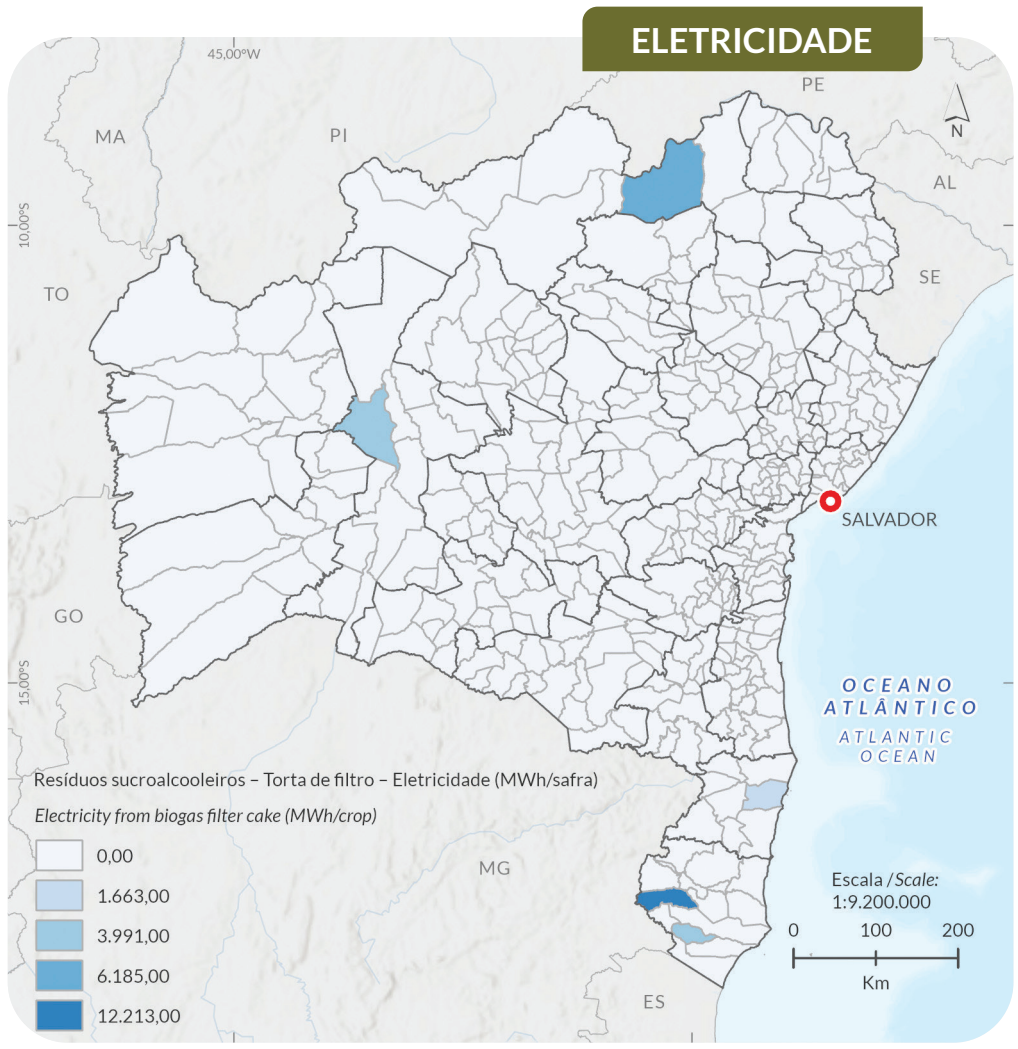
BIOGAS

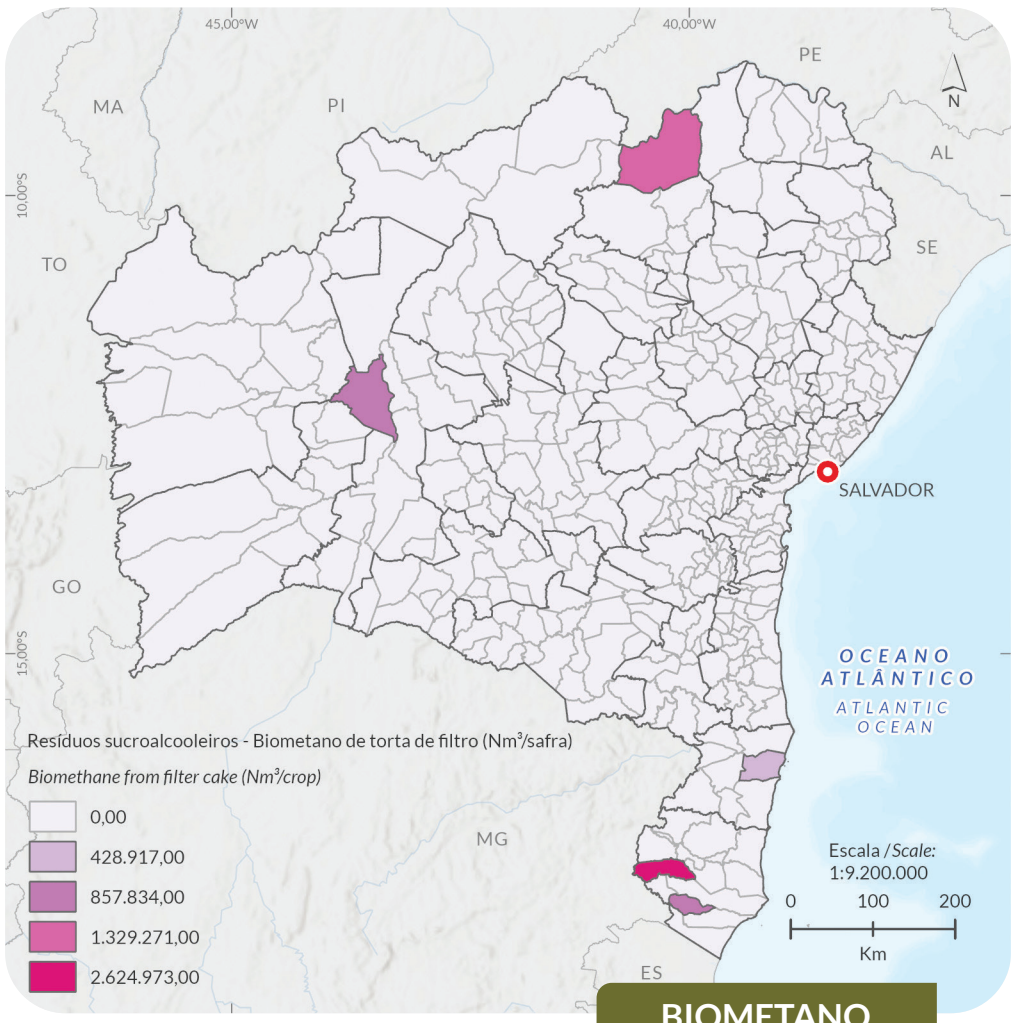
BIOGÁS



ELECTRICITY

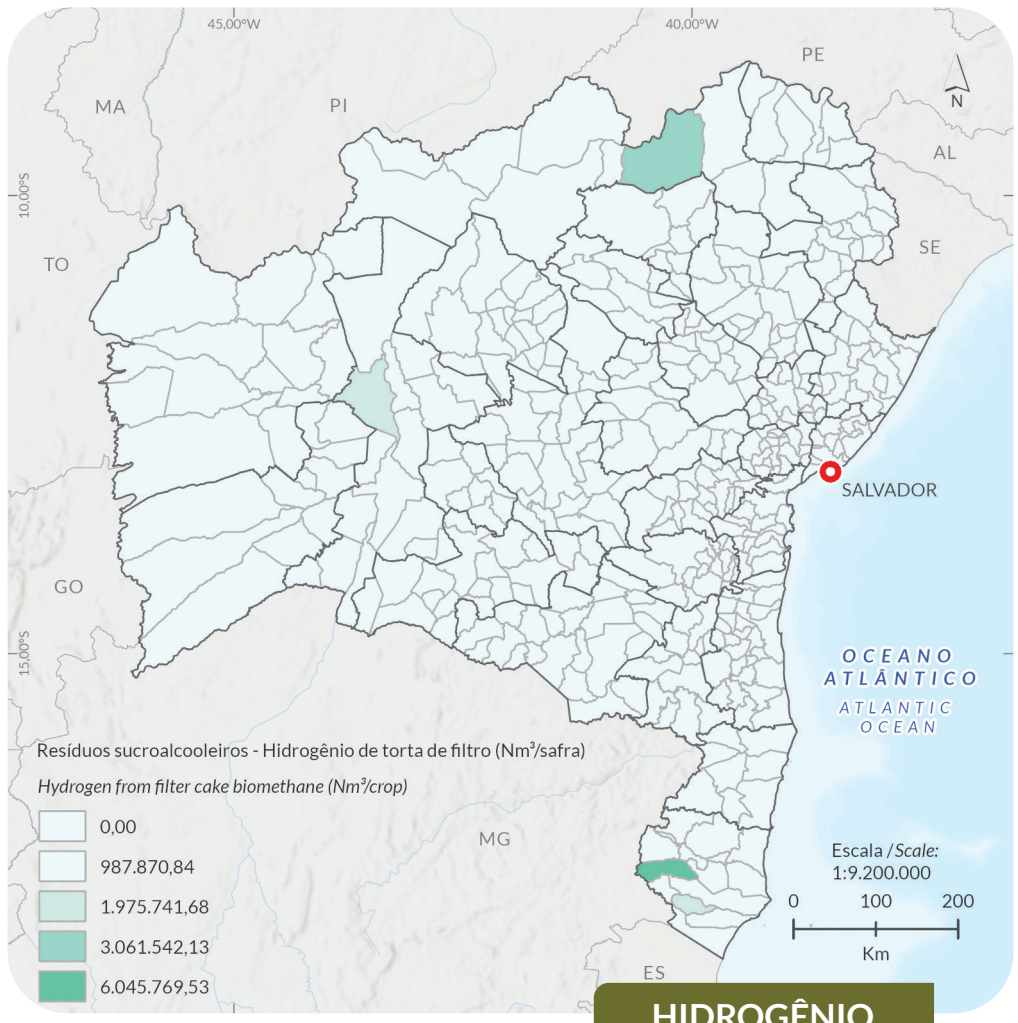
ELETRICIDADE





BIOMETHANE

BIOMETANO



HYDROGEN

HIDROGÊNIO

Mapa 7.4 / *Map 7.4*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGETICOS TOTAIS PROVENIENTES DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO – VINASSE + TORTA DE FILTRO

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM SUGAR-ENERGY SECTOR RESIDUES - VINASSE + FILTER CAKE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

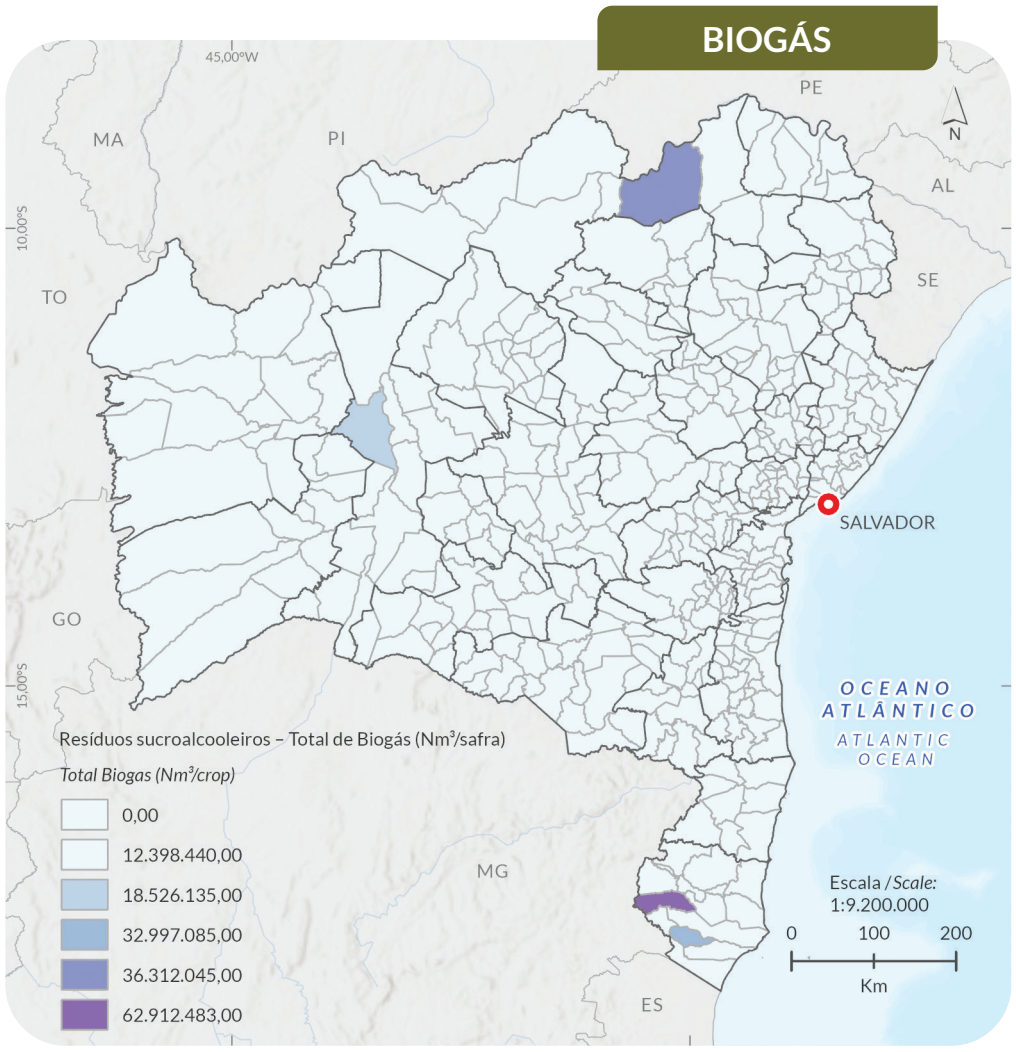
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

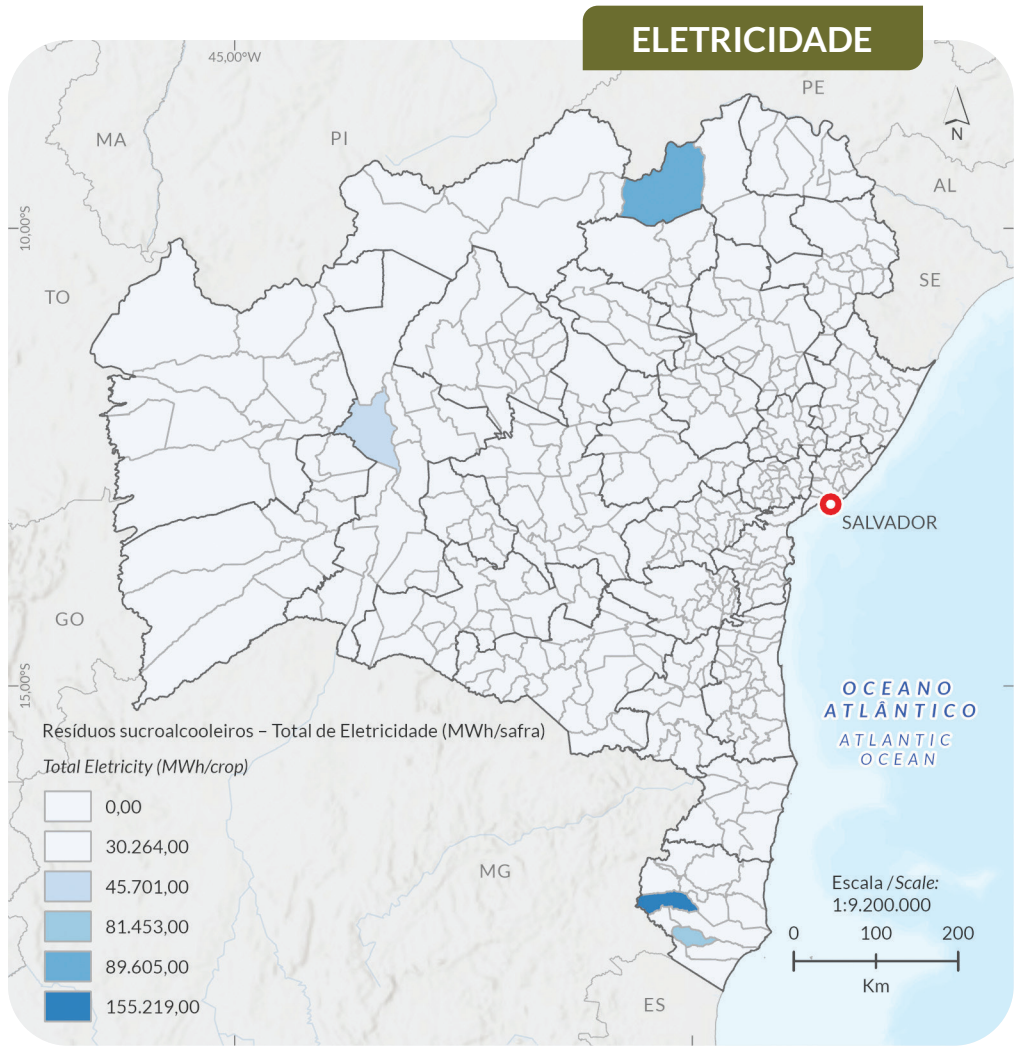
BIOGAS

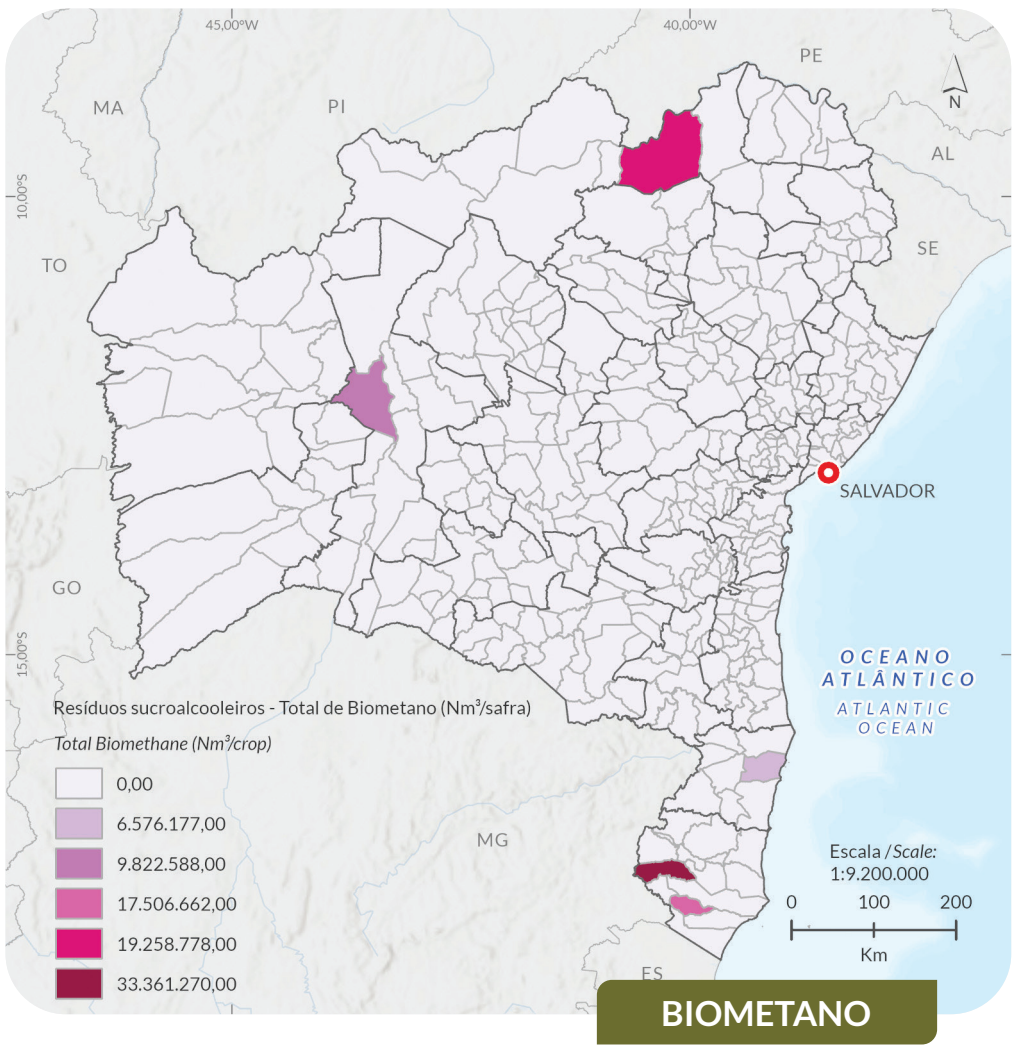
BIOGÁS



ELECTRICITY

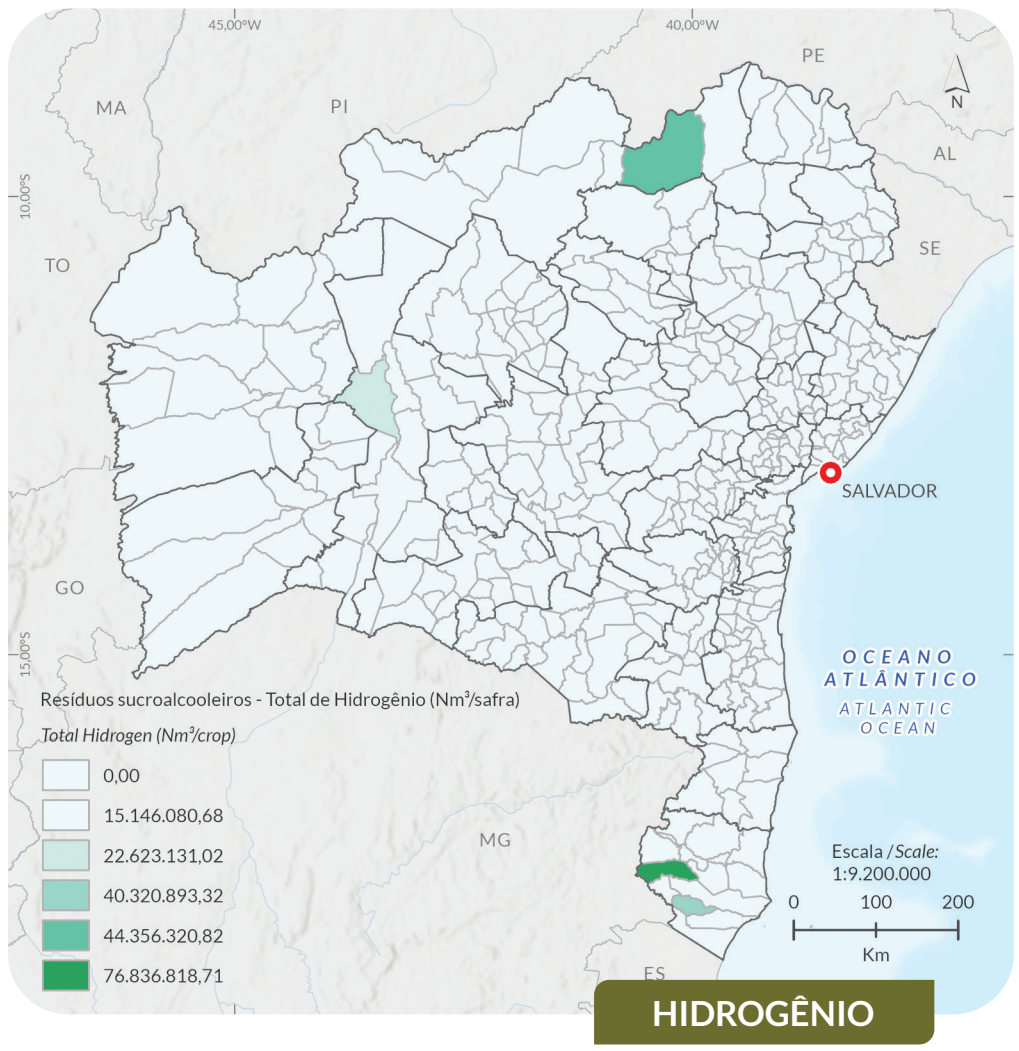
ELETRICIDADE





BIOMETHANE

BIOMETANO



HYDROGEN

HIDROGÊNIO

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO NA BAHIA

The data in Table 7.5 and the georeferenced maps of the energy potential of sugarcane residues reveal significant differences between the sugarcane-energy plants located in the five municipalities evaluated (Medeiros Neto, Juazeiro, Ibirapuã, Muquém do São Francisco, and Santa Cruz Cabrália), considering their installed capacity for hydrous ethanol production, milling, and byproduct utilization. The sugarcane-energy plants with the largest milling capacities are located in the municipalities of Medeiros Neto, Juazeiro, and Ibirapuã, where the largest volumes of vinasse and cake are also concentrated, resulting in greater potential for biogas, biomethane, electricity, and hydrogen.

Considering the location of the plants, Medeiros Neto has the greatest technical potential, with 62.9 million Nm³ of biogas per harvest, of which approximately 92% comes from vinasse. Juazeiro ranks 2nd, with 36.3 million Nm³/crop, followed by Ibirapuã, with 33.0 million Nm³/harvest. The strong predominance of vinasse as an energy input is consistent across all municipalities, accounting for over 90% of the total biogas in each location, reinforcing its strategic role in the production of biomethane or hydrogen.

In the municipalities of Muquém do São Francisco and Santa Cruz Cabrália, installed milling capacities are lower and, consequently, their potential is reduced: 18.5 million and 12.4 million Nm³/crop of biogas, respectively. Even so, these volumes are significant for local energy use, especially in regions where the demand for electricity or the replacement of fossil fuels is strategic.

In terms of electricity generation, Medeiros Neto remains the leader with 155.2 GWh/crop, followed by Juazeiro (89.6 GWh/crop) and Ibirapuã (81.4 GWh/crop). The use of filter cake is particularly significant in Medeiros Neto, contributing to its total potential and highlighting the importance of strategies that utilize not only vinasse but all available residues.

The conversion of biogas into biomethane reveals significant volumes for direct replacement of natural gas or market complement, with emphasis on Medeiros Neto (33.4 million Nm³/crop) and Juazeiro (19.3 million Nm³/crop), in addition to offering a technological route for the production of renewable hydrogen.

Considering the estimated electricity consumption for 2024 of 27,9 TWh/year [18], it is observed that the potential electricity generation from vinasse and filter cake combined in the five municipalities reaches approximately 402 GWh per harvest, which is equivalent to about 1.44% of the State's annual electricity consumption. This percentage, although modest in relation to State consuption , represents a relevant energy contribution to the sugar and ethanol sector and to the regions where the plants are located, and can contribute to local energy self-sufficiency and to reducing demand on the conventional electricity grid.

Os dados da *Tabela 7.5 e* dos mapas georreferenciados do potencial energético dos resíduos do setor sucroalcooleiro evidenciam diferenças significativas entre os cinco municípios avaliados (Medeiros Neto, Juazeiro, Ibirapuã, Muquém do São Francisco e Santa Cruz Cabrália), associadas principalmente à capacidade instalada de produção de etanol hidratado, à capacidade de moagem e ao aproveitamento dos subprodutos. Municípios com maior escala de moagem, como Medeiros Neto, Juazeiro e Ibirapuã, concentram também os maiores volumes de vinhaça e torta, refletindo-se em potenciais superiores de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio.

Medeiros Neto apresenta o maior potencial técnico, com 62,9 milhões de Nm³ de biogás por safra, dos quais cerca de 92% têm origem na vinhaça. Juazeiro ocupa a 2ª posição, com 36,3 milhões de Nm³/safra, seguido por Ibirapuã, com 33,0 milhões de Nm³/safra. A forte predominância da vinhaça como insumo energético se repete em todos os municípios, representando mais de 90% do biogás total em cada localidade, o que reforça seu papel estratégico para a produção de biometano e, subsequentemente, de hidrogênio.

Muquém do São Francisco e Santa Cruz Cabrália apresentam menores escalas de moagem e, consequentemente, potenciais reduzidos: 18,5 milhões e 12,4 milhões de Nm³/safra de biogás, respectivamente. Ainda assim, esses volumes são relevantes em termos de aproveitamento energético local, especialmente em regiões onde a demanda elétrica ou a substituição de combustíveis fósseis seja estratégica.

No que se refere à geração de eletricidade, Medeiros Neto se mantém na liderança com 155,2 GWh/safra, seguido por Juazeiro (89,6 GWh/safra) e Ibirapuã (81,4 mil MWh/safra). O aproveitamento da torta de filtro mostra-se particularmente expressivo em Medeiros Neto, contribuindo para ampliar seu potencial total e evidenciando a importância de estratégias que valorizem não apenas a vinhaça, mas todos os resíduos disponíveis.

A conversão do biogás em biometano revela volumes significativos para substituição direta do gás natural ou complemento do mercado, com destaque para Medeiros Neto (33,36 milhões de Nm³/safra) e Juazeiro (19,26 milhões de Nm³/safra), além de oferecer uma rota tecnológica para a produção de hidrogênio renovável.

Considerando o consumo estimado de energia elétrica para o ano de 2024, de 27,9 TWh/ano [18], observa-se que a geração elétrica potencial a partir da vinhaça e torta de filtro somada nos cinco municípios alcança, aproximadamente, 402 GWh por safra, o que equivale a cerca de 1,44% do consumo elétrico anual estadual. Esse percentual, embora modesto em escala estadual, representa uma contribuição energética relevante para o setor sucroalcooleiro e para as regiões onde as usinas estão localizadas, podendo contribuir para a autossuficiência energética local e para a redução da demanda da rede elétrica convencional.

Adicionalmente, a produção de hidrogênio renovável a partir do biometano, considerando o poder calorífico superior (PCS) do gás natural (39,5 MJ/m³) e do hidrogênio (12,7 MJ/m³), amplia o leque de possibilidades para o setor energético da Bahia. O total de hidrogênio produzido pelo setor pode atingir 199,28 milhões de Nm³/safra. Utilizando como base de comparação a energia contida no volume total de gás natural distribuído, o potencial identificado corresponde a cerca de 3,56% da energia anual associada ao gás natural no Estado. Trata-se de um valor expressivo, que reforça a viabilidade de utilizar o hidrogênio como vetor energético limpo para processos industriais, mobilidade ou armazenamento energético, fomentando a inovação e a sustentabilidade.

Apesar do potencial observado, a implementação efetiva dessas fontes renováveis depende da superação de desafios logísticos, como a coleta e transporte da vinhaça e torta, bem como do desenvolvimento de políticas públicas que incentivem a purificação do biogás, a geração distribuída de energia e o uso do biometano e hidrogênio. A integração das usinas com redes locais de distribuição de energia e combustível pode promover ganhos econômicos e ambientais relevantes, alinhados às metas de transição energética e redução das emissões de gases de efeito estufa no Estado.

Em síntese, a valorização energética dos resíduos do setor sucroenergético na Bahia apresenta-se como uma alternativa viável para a diversificação da matriz energética, oferecendo uma contribuição significativa, especialmente no contexto do gás natural, e potencializando a geração de energia elétrica renovável. A adoção de estratégias integradas que maximizem o uso dos subprodutos disponíveis fortalecerá o papel do setor na sustentabilidade energética e ambiental regional.

Com relação aos excedentes de energia elétrica por tonelada de cana moída, foram analisados três cenários de cogeração: 20 kWh/tc, 40 kWh/tc e 126 kWh/tc. Esses cenários permitem estimar o potencial técnico de excedente de energia que poderia ser aproveitado em cada município. Na *Tabela 7.6* são apresentados os resultados dos três cenários de cogeração com excedente de energia.

Tabela 7.6 Resultado da estimativa do potencial técnico de excedente de energia elétrica para três cenários.
Table 7.6 *Results of the estimated technical potential of surplus electricity for three scenarios.*

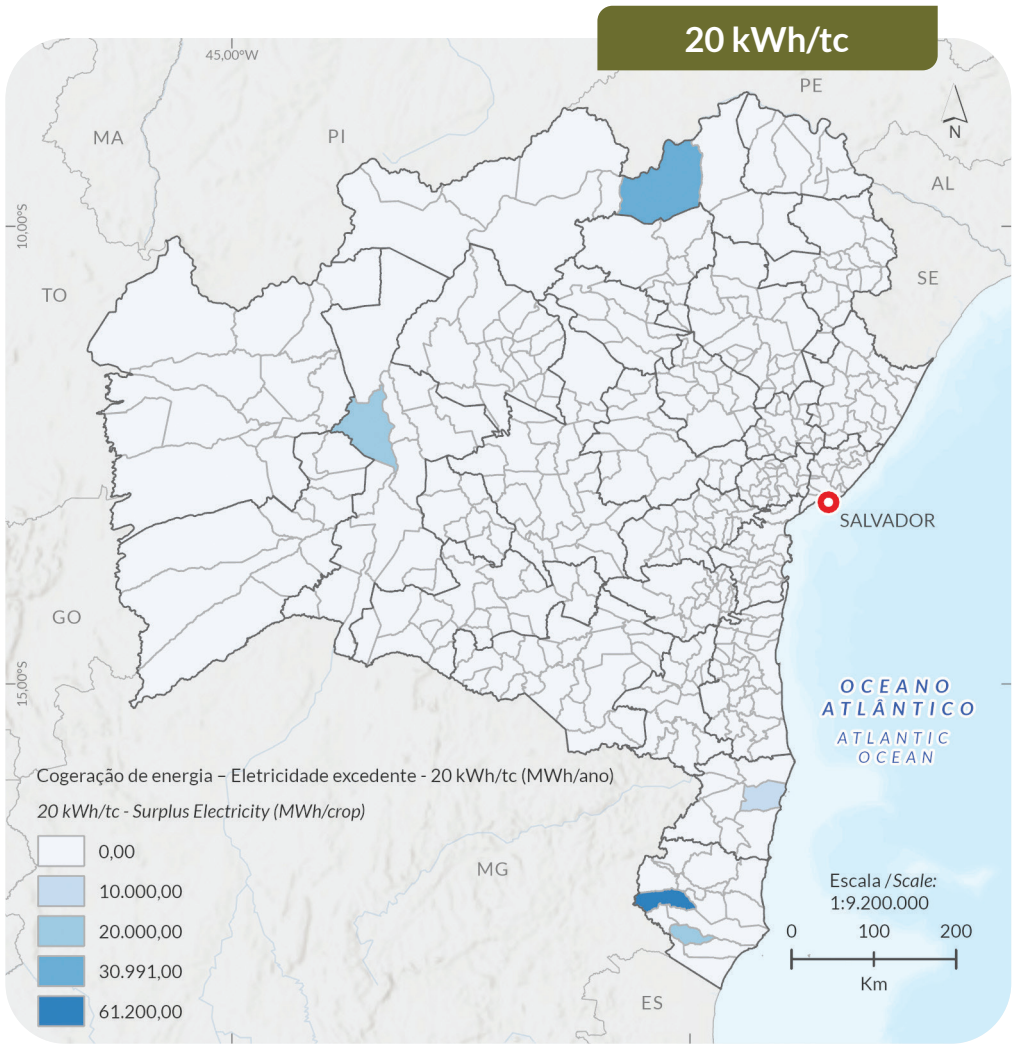
Município *Municipality*	**Unidade** *Unit*	**Medeiros Neto**	**Juazeiro**	**Ibirapuã**	**Muquém do São Francisco**	**Santa Cruz Cabrália**
Território de identidade *Territory of Identity*		**Extremo Sul**	**Sertão do São Francisco**	**Extremo Sul**	**Velho Chico**	**Costa do Descobrimento**
Moagem por safra / *Milling per crop*	*tc/safra / tc/crop*	3.060.000	1.549.566	1.000.000	1.000.000	500.000
Cenário A / *Scenario A*	*MWh/safra / MWh/crop*	61.200	30.991	20.000	20.000	10.000
Cenário B / *Scenario B*	*MWh/safra / MWh/crop*	122.400	61.983	40.000	40.000	20.000
Cenário C / *Scenario C*	*MWh/safra / MWh/crop*	385.560	195.245	126.000	126.000	63.000

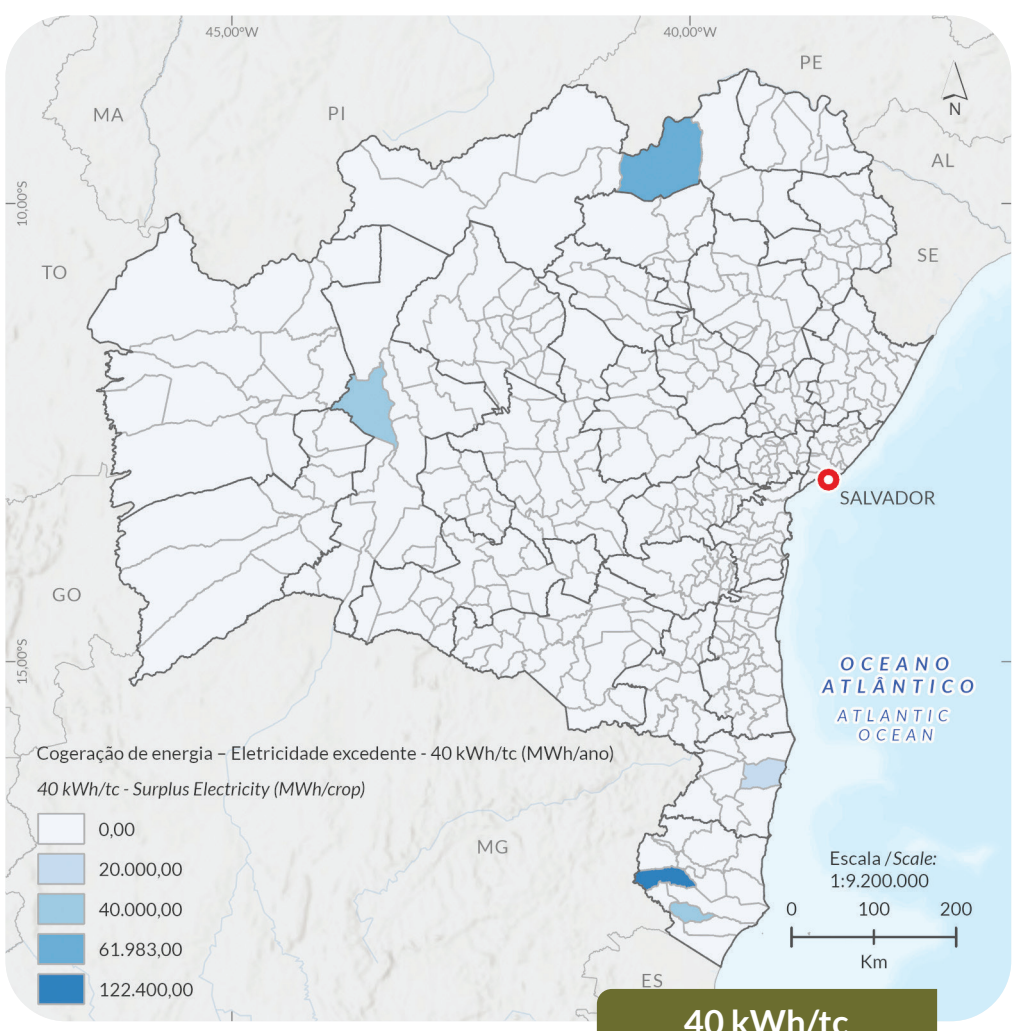
Cenário de cogeração A: excedentes de energia = 20 kWh/tc / *Cogeneration Scenario A: surplus energy = 20 kWh/tc*
Cenário de cogeração B: excedentes de energia = 40 kWh/tc / *Cogeneration Scenario B: surplus energy = 40 kWh/tc*
Cenário de cogeração C: excedentes de energia = 126 kWh/tc / *Cogeneration Scenario C: surplus energy = 126 kWh/tc*
Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 7.5 / *Map 7.5*

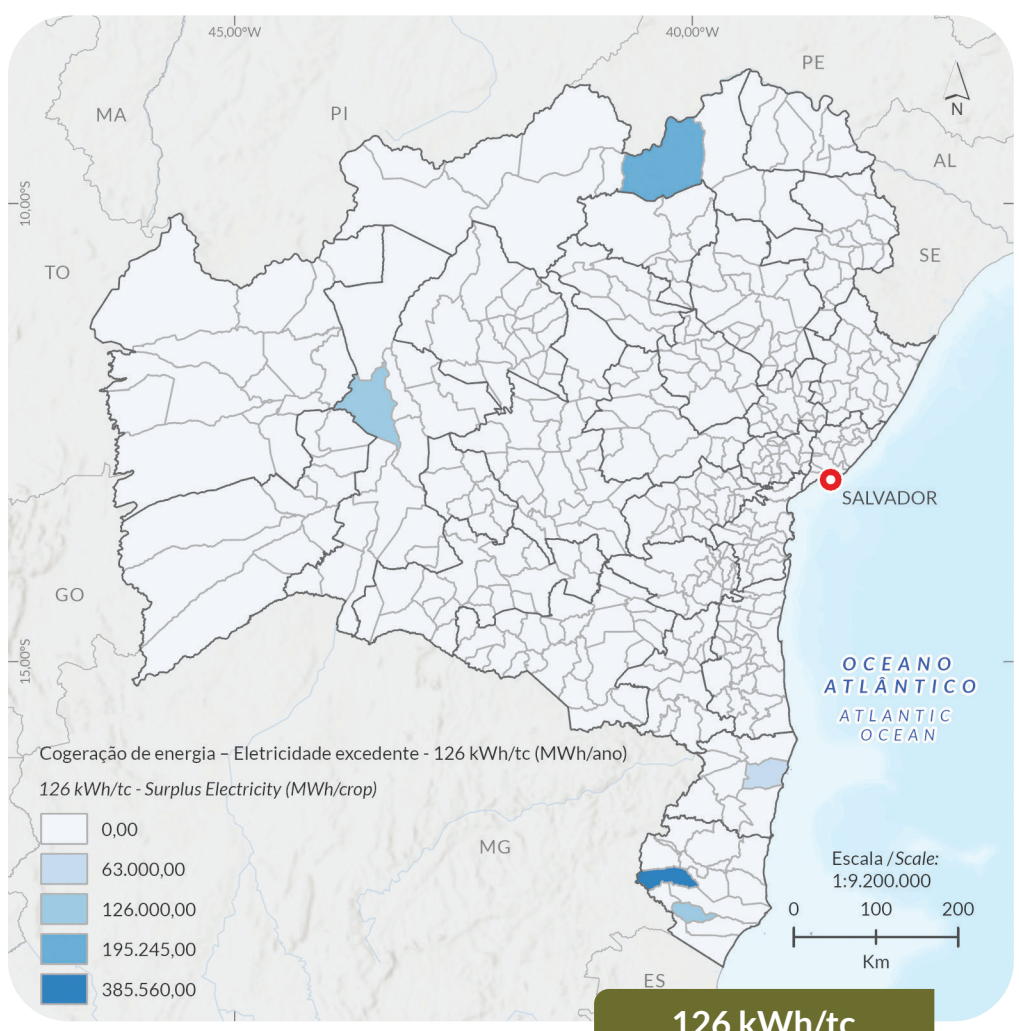
DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DO POTENCIAL EXCEDENTE DE ENERGIA A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF SURPLUS ENERGY GENERATION POTENTIAL FROM SUGARCANE BAGASSE





40 kWh/tc



126 kWh/tc

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

Figura 7.5 Bagaço de cana.
Figure 7.5 *Sugarcane bagasse.*



Foto / *Photo:* Omias / stock.adobe.com

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO NA BAHIA

Additionally, the production of renewable hydrogen from biomethane, considering the Higher Heating Value (HHV) of natural gas (39.5 MJ/m³) and hydrogen (12.7 MJ/m³), expands the range of possibilities for Bahia's energy sector. The total hydrogen produced by the sector could reach 199 million Nm³/crop. Using the energy contained in the total volume of natural gas distributed as a basis for comparison, the identified potential corresponds to approximately 3.56% of the annual energy associated with natural gas in the State. This is a significant value, reinforcing the viability of using hydrogen as a clean energy vector for industrial processes, mobility, or energy storage, fostering innovation and sustainability.

Despite the observed potential, the effective implementation of these renewable sources depends on overcoming challenges, such as well as the development of public policies that encourage biogas upgrading distributed energy generation, and the use of biomethane and hydrogen. Integrating these plants with local energy and fuel distribution networks can generate significant economic and environmental gains, aligned with the State's energy transition and greenhouse gas emissions reduction goals.

In summary, the energy recovery of residues from the sugarcane industry in Bahia presents a viable alternative for diversifying the energy mix, offering a significant contribution, especially in the context of natural gas, and boosting the generation of renewable electricity. The adoption of integrated strategies that maximize the use of available byproducts will strengthen the sector's role in regional energy and environmental sustainability.

Regarding surplus electricity per ton of crushed sugarcane, three CHP scenarios were analyzed: 20 kWh/tc, 40 kWh/tc, and 126 kWh/tc. These scenarios allow us to estimate the technical potential of surplus energy that could be used in each municipality. Table 7.6 presents the results for the three CHP scenarios with surplus energy.

The analysis of surplus electricity per ton of crushed sugarcane, considering the three CHP scenarios (20 kWh/tc, 40 kWh/tc, and 126 kWh/tc), reveals significant differences between the municipalities evaluated, directly proportional to the crushing capacity of each unit.

Medeiros Neto has the highest absolute potential in all scenarios, reflecting its larger crushing capacity (3.06 million tc/crop). In the most conservative scenario (20 kWh/tc), the municipality could provide approximately 61,200 MWh/crop of surplus energy, a figure that rises to 385,560 MWh/crop in the most efficient scenario (126 kWh/tc).

Juazeiro, with a milling capacity of 1.55 million tc/crop, ranks 2nd, reaching between 30,990 and 195,250 MWh/crop, depending on the CHP level adopted. Ibirapuã, with 1 million tc/crop, has a potential of between 20,000 and 126,000 MWh/crop, a performance identical to that of Muquém do São Francisco, given that both have equal milling capacity.

Santa Cruz Cabrália, with the lowest milling capacity of the group (500,000 tons/crop), also has the lowest absolute potential, ranging from 10,000 to 63,000 MWh/crop.

Despite the absolute differences, all municipalities share the same trend: a significant increase in energy potential as they move toward more efficient CHP scenarios. This behavior reinforces the technological relevance of expanding surpluses, especially in regions with greater milling capacity, but also highlights that, even in smaller municipalities, proportional gains can play a significant role in the regional energy mix.

In this context, integrating these surpluses into the electricity grid presents an opportunity to help meet local demands, reduce dependence on fossil fuels, and, in some cases, even supply a significant portion of consumption, especially in municipalities with lower installed capacity. The adoption of high-efficiency technologies and the optimization of residual biomass utilization strengthen not only the competitiveness but also the sustainability of the sugarcane industry in Bahia.

Beyond the quantitative aspect, there is an equally relevant qualitative component: the creation of hubs to harness these energy potentials. This movement transforms residues into strategic assets, combining environmental gains, such as emission mitigation and improved residues management, with significant economic and social impacts, including job creation, increased income in rural areas, and the strengthening of local production chains. This creates space for the development of innovative business models, aligned with regional realities and needs.

A análise dos excedentes de energia elétrica por tonelada de cana moída, considerando os três cenários de cogeração (20 kWh/tc, 40 kWh/tc e 126 kWh/tc), evidencia diferenças expressivas entre os municípios avaliados, diretamente proporcionais à capacidade de moagem de cada unidade.

Medeiros Neto apresenta o maior potencial absoluto em todos os cenários, reflexo de sua maior capacidade de moagem (3,06 milhões tc/safra). No cenário mais conservador (20 kWh/tc), o município poderia disponibilizar, aproximadamente, 61.200 MWh/safra de excedente, valor que sobe para 385.560 MWh/safra no cenário de maior eficiência (126 kWh/tc).

Juazeiro, com moagem de 1,55 milhão tc/safra, ocupa a 2ª posição, alcançando entre 30.990 e 195.250 MWh/safra, conforme o nível de cogeração adotado. Ibirapuã, com 1 milhão tc/safra, apresenta potencial entre 20 mil e 126 mil MWh/safra, desempenho idêntico ao de Muquém do São Francisco, dado que ambos possuem igual capacidade de moagem.

Santa Cruz Cabrália, com a menor moagem do grupo (500 mil tc/safra), registra também os menores potenciais absolutos, variando entre 10 mil e 63 mil MWh/safra.

Apesar das diferenças absolutas, todos os municípios compartilham a mesma tendência: o aumento expressivo do potencial energético à medida que se avança para cenários de maior eficiência na cogeração. Esse comportamento reforça a relevância tecnológica na ampliação dos excedentes, especialmente em regiões com maior capacidade de moagem, mas também evidencia que, mesmo em localidades de menor porte, ganhos proporcionais podem desempenhar papel relevante na matriz energética regional.

Nesse contexto, a integração desses excedentes à rede elétrica surge como oportunidade para colaborar no atendimento das demandas locais, reduzir a dependência de fontes fósseis e, em alguns casos, até mesmo suprir parte significativa do consumo, especialmente em municípios com menor carga instalada. A adoção de tecnologias de alta eficiência e a otimização do aproveitamento da biomassa residual fortalecem não apenas a competitividade, mas também a sustentabilidade do setor sucroenergético na Bahia.

Além do aspecto quantitativo, há um componente qualitativo igualmente relevante: a criação de polos para o aproveitamento desses potenciais energéticos. Esse movimento transforma resíduos em ativos estratégicos, associando ganhos ambientais, como



Foto / *Photo:* andyaziz6 / stock.adobe.com

a mitigação de emissões e a melhoria da gestão de resíduos, a impactos econômicos e sociais significativos, incluindo a geração de empregos, o incremento da renda no meio rural e o fortalecimento das cadeias produtivas locais. Com isso, abre-se espaço para o desenvolvimento de modelos de negócios inovadores, alinhados à realidade e às necessidades regionais.

7.6 POTENCIAIS E DESAFIOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO DA BAHIA: REFLEXÕES ESTRATÉGICAS

O setor sucroenergético na Bahia apresenta um potencial significativo para a diversificação da matriz energética estadual. Embora o Estado não figure entre os maiores produtores nacionais de cana-de-açúcar, concentra unidades industriais estratégicas em diferentes regiões, como o Extremo Sul, o Sertão do São Francisco, o Velho Chico e a Costa do Descobrimento. Essas localidades se beneficiam de condições favoráveis para a produção e processamento da cana, ainda que em escalas distintas, o que contribui para um perfil de produção heterogêneo e adaptado às realidades regionais.



O tratamento anaeróbio dos resíduos do setor sucroalcooleiro, vinhaça e a torta de filtro, representa uma solução estratégica que alia benefícios ambientais, energéticos e econômicos. A biodigestão reduz significativamente a carga orgânica desses efluentes, minimizando riscos de contaminação de corpos d'água e evitando problemas como odor e proliferação de vetores. Ao mesmo tempo, impede a liberação não controlada de metano, um potente gás de efeito estufa, e converte este composto em fonte de energia renovável, melhorando o balanço energético do etanol e fortalecendo a sustentabilidade do setor.

Do ponto de vista energético, o biogás proveniente desses resíduos pode ser convertido não apenas em eletricidade e biometano, mas também servir como matéria-prima para a produção de hidrogênio renovável, expandindo as possibilidades de uso e alinhando o setor às tendências globais de descarbonização. O uso do biometano ou do hidrogênio para substituir diesel em frotas agrícolas e veículos pesados contribui para reduzir emissões de gases poluentes e material particulado, beneficiando a qualidade do ar e a saúde pública, especialmente durante o período de safra.

A análise dos dados evidencia que a vinhaça e a torta de filtro, subprodutos abundantes da produção de açúcar e etanol, possuem grande relevância como matérias-primas para geração de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio no Estado da Bahia. Municípios com maior escala de moagem e produção, como Medeiros Neto, Juazeiro e Ibirapuã, concentram volumes expressivos desses resíduos e, consequentemente, maiores potenciais energéticos.

A viabilidade técnica para conversão desses subprodutos em energia é clara, mas a efetiva implementação das tecnologias requer planejamento estratégico. Aspectos como logística de transporte, infraestrutura de purificação do biogás e conexão com redes de distribuição são determinantes para transformar o potencial identificado em realidade. Políticas públicas e incentivos econômicos podem desempenhar papel fundamental, criando um ambiente favorável para investimentos e inovação no setor.

Além do impacto positivo na redução das emissões de gases de efeito estufa, o aproveitamento energético dos resíduos sucroalcooleiros pode gerar benefícios socioeconômicos relevantes, como a criação de empregos, o fortalecimento de cadeias produtivas locais e o estímulo à economia circular. Em um cenário de transição energética, esses recursos representam uma oportunidade estratégica para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e ampliar a participação de fontes renováveis na matriz estadual.

No contexto baiano, onde o setor sucroenergético se distribui em polos como o Extremo Sul, Sertão do São Francisco, Velho Chico e Costa do Descobrimento, o aproveitamento energético da vinhaça e da torta de filtro pode transformar resíduos de alto potencial poluidor em vetores de geração de energia limpa. Essa estratégia fortalece a economia local, reduz impactos ambientais e coloca o estado em sintonia com metas de redução de emissões e diversificação da matriz energética.

Portanto, o futuro do setor sucroenergético baiano está diretamente ligado à capacidade de integrar tecnologia, sustentabilidade e gestão eficiente dos recursos. Se devidamente aproveitado, o potencial energético aqui mapeado poderá contribuir de forma consistente para um desenvolvimento econômico mais limpo, resiliente e alinhado às demandas ambientais do nosso tempo.

Figura 7.6 Plantação de cana com usina sucroenergética ao fundo.
Figure 7.6 *Sugarcane plantation with a sugar-energy plant in the background.*

7.6 POTENTIALS AND CHALLENGES OF THE SUGAR-ENERGY SECTOR IN BAHIA: STRATEGIC REFLECTIONS

The sugar-energy sector in Bahia has significant potential for diversifying the State's energy mix. Although the State is not among the largest national sugarcane producers, it concentrates strategic industrial units in different regions, such as the Extremo Sul, the Sertão do São Francisco, the Velho Chico, and the Costa do Descobrimento. These locations benefit from favorable conditions for sugarcane production and processing, albeit on different scales, which contributes to a heterogeneous production profile adapted to regional realities.

The anaerobic treatment of sugarcane residues – vinasse and filter cake – represents a strategic solution that combines environmental, energy, and economic benefits. Biodigestion significantly reduces the organic load of these effluents, minimizing the risk of water contamination and preventing problems such as odor and vector proliferation. At the same time, it prevents the uncontrolled release of methane, a potent greenhouse gas, and converts this compound into a renewable energy source, improving the energy balance of ethanol and strengthening the sector's sustainability.

From an energy perspective, the biogas from these residues can be converted not only into electricity and biomethane but also serve as a feedstock for the production of renewable hydrogen, expanding its potential uses and aligning the sector with global decarbonization trends. Using biomethane or hydrogen to replace diesel in agricultural fleets and heavy-duty vehicles helps reduce emissions of pollutants and particulate matter, benefiting air quality and public health, especially during the harvest season.

Data analysis shows that vinasse and filter cake, abundant byproducts of sugar and ethanol production, are highly relevant as feedstock for generating biogas, biomethane, electricity, and hydrogen in the State of Bahia. Municipalities with larger milling and production scales, such as Medeiros Neto, Juazeiro, and Ibirapuã, concentrate significant volumes of these residues and, consequently, greater energy potential.

The technical feasibility of converting these byproducts into energy is clear, but effective implementation of the technologies requires strategic planning. Aspects such as transportation logistics, biogas upgrading infrastructure, and connection to distribution networks are crucial to transforming the identified potential into reality. Public policies and economic incentives can play a fundamental role in creating a favorable environment for investment and innovation in the sector.

In addition to the positive impact on reducing greenhouse gas emissions, the energy use of sugar and ethanol residues can generate significant socioeconomic benefits, such as job creation, strengthening local production chains, and stimulating the circular economy. In a scenario of energy transition, these resources represent a strategic opportunity to reduce dependence on fossil fuels and increase the share of renewable sources in the State's energy mix.

In the context of Bahia, where the sugar-energy sector is distributed in hubs such as the Extremo Sul, Sertão do São Francisco, Velho Chico, and Costa do Descobrimento, the energy use of vinasse and filter cake can transform residues with high polluting potential into clean energy sources. This strategy strengthens the local economy, reduces environmental impacts, and aligns the state with its goals for reducing emissions and diversifying energy mix.

Therefore, the future of Bahia's sugar-energy sector is directly linked to its ability to integrate technology, sustainability, and efficient resource management. If properly harnessed, the energy potential mapped here could consistently contribute to cleaner, more resilient economic development that is aligned with the environmental demands of our time.

Atlas Bioenergia Bahia

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL NA BAHIA

ENERGY RECOVERY FROM LIVESTOCK MANURE IN BAHIA

A produção animal é um componente relevante da economia agropecuária brasileira, com destaque para a bovinocultura, a suinocultura e a avicultura. Marcado pela incorporação progressiva de tecnologias e pela adoção de práticas sustentáveis, o setor busca conciliar produtividade e preservação ambiental. Essa dinâmica também se verifica no Estado da Bahia, cuja produção abastece tanto o consumo interno quanto as demandas do mercado nacional e internacional.

8.1 PANORAMA DOS REBANHOS NO BRASIL

Nos últimos anos, a pecuária brasileira passou por profundas transformações. O aumento da eficiência produtiva, a integração com a agricultura e a incorporação de novas tecnologias permitiram ao País alcançar elevados patamares de produtividade, qualidade e competitividade internacional.

O Brasil é reconhecido mundialmente como um dos maiores produtores e exportadores de carne bovina. A criação extensiva de gado *(Figura 8.1)*, tradicionalmente associada às vastas pastagens do Centro-Oeste, foi complementada por sistemas mais intensivos e por tecnologias que otimizam o uso do solo, da água e dos insumos. O País possui um dos maiores rebanhos bovinos comerciais do mundo, com mais de 220 milhões de cabeças, e exporta carne para mais de 150 Países, incluindo mercados exigentes como União Europeia, China e Estados Unidos [1].

No segmento de carne suína, o Brasil também ocupa posição de destaque. A produção concentra-se principalmente nos Estados do Sul, onde pequenas e médias propriedades familiares coexistem com grandes agroindústrias. O setor investe fortemente em genética, nutrição e sanidade animal, garantindo produtos de alta qualidade e rastreabilidade, requisitos essenciais para atender ao mercado internacional [2].

A avicultura consolidou-se como uma das atividades mais dinâmicas e organizadas do agronegócio nacional. O País é o maior exportador mundial de carne de frango, atendendo dezenas de mercados e adaptando-se rapidamente às demandas globais. O desenvolvimento da indústria de ração, o rigor no controle sanitário e a adoção de sistemas integrados de produção são fatores determinantes para o sucesso do setor [2].

Livestock is a significant component of the Brazilian agricultural economy, particularly cattle, swine, and broiler birds. Marked by the progressive incorporation of technologies and the adoption of sustainable practices, the sector seeks to balance productivity and environmental preservation. This dynamic is also evident in the State of Bahia, whose production supplies both domestic consumption and the demands of the national and international markets.

8.1 OVERVIEW OF LIVESTOCK IN BRAZIL

In recent years, Brazilian livestock farming has undergone profound transformations. Increased production efficiency, integration with agriculture, and the incorporation of new technologies have enabled the country to achieve high levels of productivity, quality, and international competitiveness.

Brazil is recognized worldwide as one of the largest producers and exporters of beef. Extensive cattle farming (Figure 8.1), traditionally associated with the vast pastures of the Central-West region, has been complemented by more intensive systems and technologies that optimize the use of land, water, and inputs. The country has one of the largest commercial cattle herds in the world, with over 220 million head, and exports meat to more than 150 countries, including demanding markets such as the European Union, China, and the United States [1].

In the swine segment, Brazil also occupies a prominent position. Production is concentrated primarily in the southern states, where small and medium-sized family farms coexist with large agribusinesses. The sector invests heavily in genetics, nutrition, and animal health, ensuring high-quality products and traceability, essential requirements for serving the international market [2].

Figura 8.1 Criação extensiva de gado.
Figure 8.1 *Extensive cattle farming.*



Foto / *Photo*: MaycoMelo / stock.adobe.com

ENERGY RECOVERY FROM LIVESTOCK MANURE IN BAHIA

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL NA BAHIA

Boiler birds has established itself as one of the most dynamic and organized sectors in Brazilian agribusiness. The country is the world's largest exporter of chicken meat, serving dozens of markets and rapidly adapting to global demands. The development of the feed industry, rigorous health controls, and the adoption of integrated production systems are key factors in the sector's success [2].

In this context, livestock farming plays a central role in the Brazilian economy not only due to the value of exports but also to he generation of jobs, income, and regional development. The sector generates billions of reais annually and involves a complex production chain, ranging from small producers to large farms, cooperatives, meatpacking plants, transport companies, input manufacturers, laboratories, and retailers [3].

The jobs generated range from rural to industrial and commercial sectors, being essential for settling populations in the country's interior and boosting the economy of hundreds of municipalities. In addition, the activity contributes to tax collection and the balance of trade, especially during periods of high international demand [3]. In 2023, the national livestock sector reached a production value of R$ 122.4 billion. Of this total, animal products accounted for R$ 112.3 billion, highlighting their importance in the food supply and wealth generation for the country [4].

Livestock farming production encompasses not only the raising of animals for beef and dairy farming, but also the entire chain of derived products, such as meat, milk, eggs, leather, and byproducts, which drive various industrial and commercial segments. The 2023 performance reflects a dynamic sector, driven by domestic demand and exports, placing Brazil among the largest producers and exporters of animal protein in the world [5].

Analyzing livestock composition is essential for understanding the national production structure, highlighting the diversity and scale of cattle, swine, poultry, goats, and sheep, a factor that contributes to the sector's resilience in the face of market fluctuations and climate conditions (Figure 8.2).

The growth of intensive and sustainable livestock farming systems has been driven both by the pursuit of greater efficiency and the need to meet the demand for quality meat with a lower environmental impact. In this context, the use of livestock manure to generate renewable energy is gaining importance. Confined systems allow for the centralized management and collection of these waste, enabling its use in biodigesters to produce biogas and biofertilizers. This strategy reduces greenhouse gas emissions, ensures proper waste disposal, and creates income opportunities for producers.

Diante desse cenário, a pecuária desempenha papel central na economia brasileira não apenas pelo valor das exportações, mas também pela geração de empregos, renda e desenvolvimento regional. O setor movimenta bilhões de reais anualmente e envolve uma cadeia produtiva complexa, que vai desde pequenos produtores até grandes fazendas, cooperativas, frigoríficos, transportadoras, indústrias de insumos, laboratórios e varejistas[3].

Os empregos gerados abrangem desde o campo até a indústria e o comércio, sendo essenciais para fixar populações no interior do País e impulsionar a economia de centenas de municípios. Além disso, a atividade contribui para a arrecadação de impostos e para o equilíbrio da balança comercial, especialmente em períodos de alta demanda internacional [3]. Em 2023, o setor pecuário nacional atingiu valor de produção de R$ 122,4 bilhões. Desse total, os produtos de origem animal responderam por R$ 112,3 bilhões, evidenciando sua importância no abastecimento alimentar e na geração de riqueza para o País [4].

A produção pecuária engloba não apenas a criação de animais para corte e leite, mas também toda a cadeia de produtos derivados, como carnes, leite, ovos, couro e subprodutos, que movimentam diferentes segmentos industriais e comerciais. O desempenho de 2023 reflete um setor dinâmico, impulsionado pela demanda interna e pelas exportações, que colocam o Brasil entre os maiores produtores e exportadores de proteína animal do mundo [5].

A análise da composição dos rebanhos é essencial para compreender a estrutura produtiva nacional, evidenciando a diversidade e a magnitude das criações, como bovinos, suínos, aves, caprinos e ovinos, fator que contribui para a resiliência do setor diante de variações de mercado e condições climáticas (*Figura 8.2).*

O crescimento de sistemas intensivos e sustentáveis de criação tem sido motivado tanto pela busca por maior eficiência quanto pela necessidade de atender à demanda por carne de qualidade e menor impacto ambiental. Nesse contexto, o aproveitamento de dejetos animais para geração de energia renovável ganha relevância. Sistemas com confinamento permitem o manejo e a coleta centralizada desses resíduos, viabilizando seu uso em biodigestores para produção de biogás e biofertilizantes. Essa estratégia reduz emissões de gases de efeito estufa, garante destinação adequada dos resíduos e cria oportunidades de renda para os produtores.

Figura 8.2 População dos principais rebanhos no Brasil.
Figure 8.2 *Population of the main livestock in Brazil.*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [5]. / *Source: prepared by the authors based on data from [5].*

8.2 PECUÁRIA BAIANA: PRODUÇÃO, DISTRIBUIÇÃO TERRITORIAL E DESAFIOS AMBIENTAIS

O agronegócio é um dos pilares da economia baiana, responsável por gerar empregos, exportações e renda. A agropecuária, em particular, tem se consolidado como um dos setores mais promissores, com relevante impacto social [7]. O desenvolvimento sustentável do campo, apoiado por tecnologias de precisão, representa simultaneamente um desafio e uma oportunidade para garantir a segurança alimentar e o respeito ao meio ambiente. O uso de métodos inovadores e práticas multidisciplinares tem contribuído para o aumento da produtividade do setor [7].

A pecuária baiana apresenta grande diversidade, refletida nas diferentes regiões de destaque para cada atividade. Em 2023, os rebanhos do Estado totalizavam 45.812.654 galináceos, 13.290.719 bovinos, 5.005.629 ovinos, 3.955.274 caprinos, 1.016.164 suínos, 463.297 equinos e 23.374 bubalinos [5]. Esses números correspondem a 2,9% do rebanho nacional de galináceos, 5,6% do bovino e 23,0% do ovino [8]. A distribuição espacial é ampla: bovinos concentram-se principalmente no Centro-Sul, Sul, Extremo Oeste e Centro-Norte; caprinos e ovinos predominam no Vale do São Francisco; e galináceos têm maior presença no Extremo Oeste, Centro-Oeste, Centro-Sul, Região Metropolitana de Salvador e Nordeste baiano (*Figura 8.3)* [5].

- **Bovinocultura: liderança regional e avanços sanitários**

O rebanho bovino da Bahia, composto majoritariamente por gado zebuíno, representa 36,2% do efetivo do Nordeste e ocupa o 1º lugar no *ranking* regional, com predominância de mestiçagens da raça nelore. A criação para corte é a principal atividade, sustentada pela ampla disponibilidade de pastagens naturais e cultivadas, associada ao uso de pastejo rotacionado, confinamento e semiconfinamento nas regiões produtoras de grãos do Oeste. A obtenção do status de zona livre de febre aftosa sem vacinação, alcançado em 2024, reduziu custos com vacinas e manejo, gerando economia anual estimada em R$ 100 milhões para o setor [7].

- **Avicultura: relevância econômica e polos produtivos**

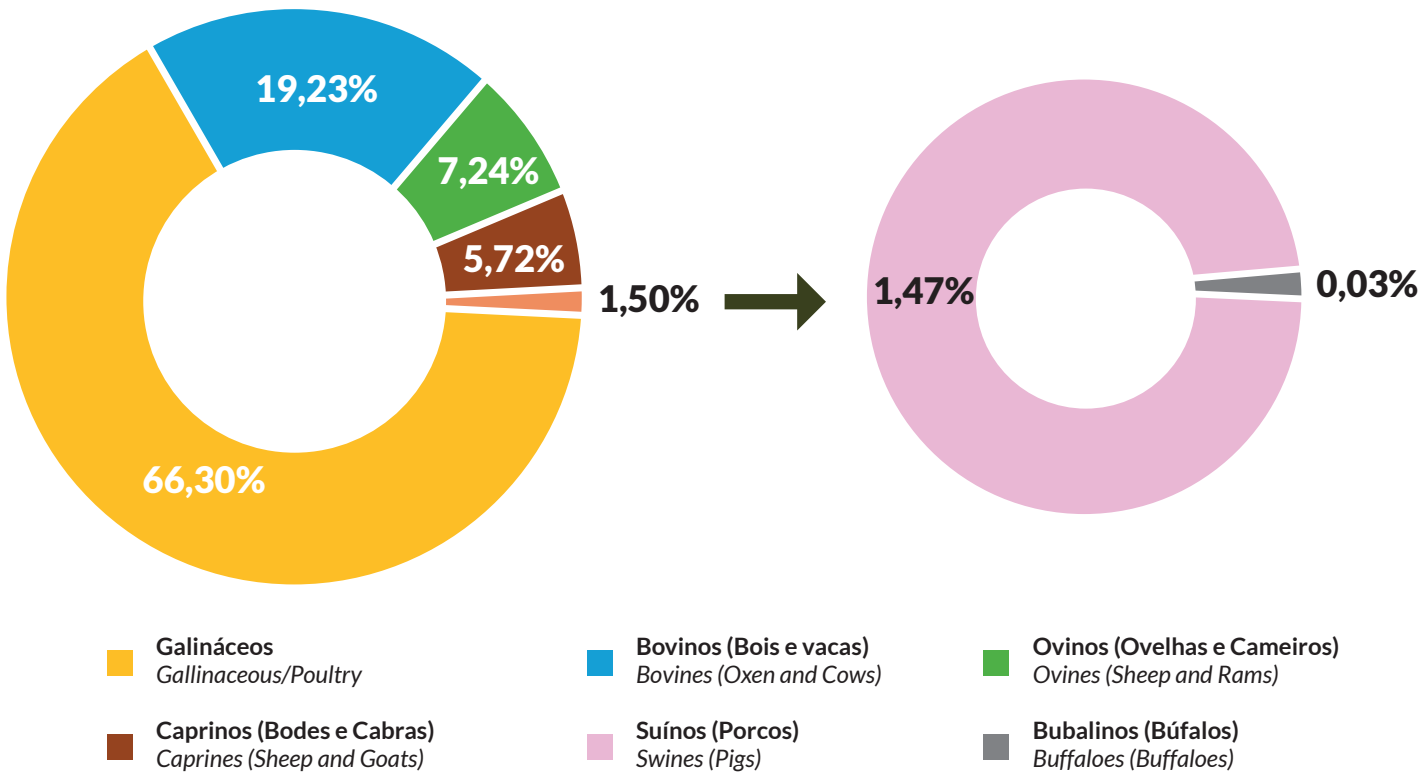
A avicultura baiana é igualmente relevante, com cerca de 160 milhões de aves alojadas, posicionando o Estado como o 8o maior parque avícola do Brasil. Os principais polos estão nos territórios de identidade de Feira de Santana, Recôncavo, Bacia do Rio Grande, Costa do Descobrimento, Extremo Sul, Litoral Norte e Agreste Baiano, Semiárido Nordeste II e Sudoeste Baiano [7].

- **Caprinocultura e ovinocultura: protagonismo nacional**

A caprinocultura e a ovinocultura desempenham papel estratégico no desenvolvimento regional, especialmente no sertão baiano, por gerarem emprego e renda para pequenos produtores. A Bahia lidera o *ranking* nacional dessas criações, concentrando 30,7% do rebanho caprino e 23,0% do ovino do País [5], com destaque para municípios como Casa Nova, Juazeiro, Curaçá e Remanso.

Casa Nova, maior produtor brasileiro, detém mais de 1 milhão de cabeças, sendo 585 mil caprinos e 511 mil ovinos [7]. Apesar de 60% do rebanho nacional de ovinos estar no Nordeste, 75% dos abates oficiais ocorrem no Rio Grande do Sul, o que evidencia oportunidades para fortalecimento da cadeia produtiva. Nesse

Figura 8.3 Efetivo das principais espécies da pecuária baiana em 2023, expresso em número de cabeças.
Figure 8.3 *Number of the main livestock farming species in Bahia in 2023, expressed in number of head.*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [5]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [5].

8.2 LIVESTOCK FARMING IN BAHIA: PRODUCTION, TERRITORIAL DISTRIBUTION, AND ENVIRONMENTAL CHALLENGES

Agribusiness is one of the pillars of the economy in Bahia, responsible for generating jobs, exports, and income. Agriculture, in particular, has established itself as one of the most promising sectors, with significant social impact [7]. Sustainable rural development, supported by precision technologies, represents both a challenge and an opportunity to ensure food security and respect for the environment. The use of innovative methods and multidisciplinary practices has contributed to increased productivity in the sector [7].

The livestock farming in Bahia shows considerable diversity, reflected in the distinct regions where each activity stands out. In 2023, the State's livestock totaled 45.8 millions poultry, 13.3 millions cattle, 5 millions sheep, 3.9 millions goats, 1.0 million swine, 463,297 horses, and 23,374 buffaloes [5]. These numbers correspond to 2.9% of the national poultry herd, 5.6% of cattle, and 23.0% of sheep [8]. The spatial distribution is broad: cattle are concentrated mainly in the Center-South, South, Far West, and Center-North regions; goats and sheep predominate in the São Francisco Valley; and gallinaceous species are most prevalent in the Far West, Central-West, Central-South, Metropolitan Region of Salvador, and Northeast Bahia (Figure 8.3)[5].

- ***Cattle farming: regional leadership and health advances***

Bahia's cattle herd, composed primarily of Zebu cattle, represents 36.2% of the Northeast region's herd and ranks 1st in the region, with a predominance of Nelore crossbreeds. Beef cattle production is the main activity, supported by the ample availability of natural and cultivated pastures, combined with the use of rotational grazing, confinement, and semi-confinement in the grain-producing regions of the West. Obtaining foot-and-mouth disease-free zone status without vaccination, achieved in 2024, reduced vaccine and management costs, generating an estimated annual savings of R$100 million for the sector [7]

- ***Poultry farming: economic significance and production hubs***

Bahia's Poultry farming are equally significant, with approximately 160 million birds housed, making the State the 8th largest poultry farm in Brazil. The main hubs are located in the areas of Feira de Santana, Recôncavo, Rio Grande Basin, Costa do Descobrimento, Far South, North Coast and Agreste region of Bahia, Semiarid Northeast II, and Southwest Bahia [7].

- ***Goat and sheep farming: national prominence***

Goat and sheep farming play a strategic role in regional development, especially in the Bahia backlands, by generating employment and income for small producers. Bahia leads the national ranking for these livestock, accounting for 30.7% of the country's goat herd and 23.0% of its sheep herd [5], with municipalities such as Casa Nova, Juazeiro, Curaçá, and Remanso standing out.

Casa Nova, the largest Brazilian producer, has over 1 million head, including 585,000 goats and 511,000 sheep [7]. Although 60% of the national sheep herd is in the Northeast region, 75% of official slaughter takes place in Rio Grande do Sul, highlighting opportunities for strengthening the production chain. In this context, the Lamb Route Project seeks to maximize the sector's potential, addressing challenges such as low technology adoption and limited producer organization. Among the incentive actions, the State investment of R$3 million in the construction of a cold storage facility in Casa Nova stands out, with the aim of reducing costs, improving meat quality and increasing competitiveness [7].

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL NA BAHIA

An analysis of Bahia's share of the national livestock underscores the state's weight as a major livestock farming center. It highlights its relevance to the supply of multiple value chains and the creation of opportunities to integrate animal production with energy recovery from livestock waste (Figure 8.4).

8.3 CALCULATION METHODOLOGY

The general methodology is based on the number of head of cattle per municipality, manure generation factors, volatile solids concentration, biochemical methane potential (BMP), and upgrading and electricity generation efficiencies.

For all species, the amount of manure to be biodigested is calculated based on the average daily manure production factor (liters/animal.day) and the number of head of livestock per municipality. The biogas volume is estimated from this quantity, considering the volatile solids concentration (kg SV/liters), the BMP (Nm^3 CH_4/kg SV), and the methane concentration in the biogas. The biomethane volume is derived from the biogas, taking into account the methane concentration and upgrading efficiency. Electricity generation is assumed to be carried out using a motor-generator set, with an electrical efficiency of 35% for daily biogas flow rates below 5,000 Nm^3/day and 42% for higher flows. The plant operating factor is assumed to be 85%.

The estimate of hydrogen production from biomethane was obtained by means of calculations based on mass and energy balances, taking into account the typical operating conditions of conventional steam reforming plants. The hydrogen production potential via steam reforming of biomethane was obtained by considering the mass flow rate, heat content, and LCV of the hydrogen, ensuring greater accuracy in the assessment of energy use. The mathematical model used is described in the Appendix of this atlas.

contexto, o Projeto Rota do Cordeiro busca ampliar o aproveitamento do potencial do setor, enfrentando desafios como a baixa adoção de tecnologia e a limitada organização dos produtores. Entre as ações de incentivo, destaca-se o investimento estadual de R$ 3 milhões na construção de um frigorífico em Casa Nova, com o objetivo de reduzir custos, melhorar a qualidade da carne e ampliar a competitividade [7].

A análise da participação do rebanho baiano no total nacional reforça o peso do Estado como importante polo pecuário, evidenciando sua relevância no abastecimento de diferentes cadeias produtivas e na geração de oportunidades para integração entre a produção animal e o aproveitamento energético de resíduos (*Figura 8.4).*

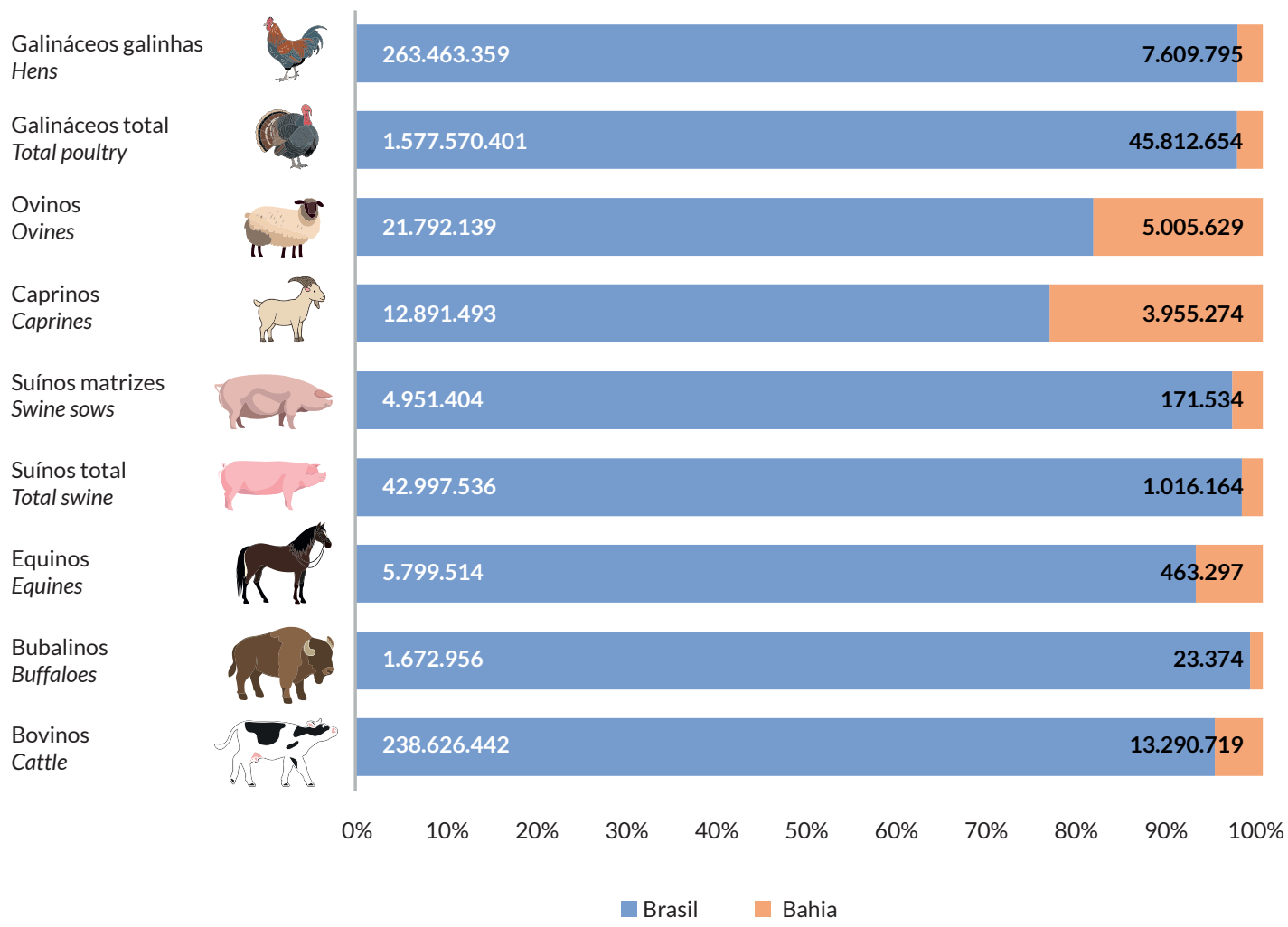
8.3 METODOLOGIA DE CÁLCULO

A metodologia geral baseia-se no número de cabeças por município, fatores de geração de dejetos, concentração de sólidos voláteis, potencial bioquímico de metano (BMP) e eficiências de purificação e geração elétrica.

Para todas as espécies, calcula-se a quantidade de dejetos a ser biodigerida a partir do fator médio de produção de dejetos diários (litros/animal.dia) e pelo número de cabeças de animais por município. O volume de biogás é estimado a partir dessa quantidade, considerando a concentração de sólidos voláteis (kg SV/litros), o BMP (Nm^3 CH_4/kg SV) e a concentração de metano no biogás. O volume de biometano deriva do biogás, levando em conta a concentração de metano e a eficiência de purificação. Considera-se que a geração de eletricidade é realizada utilizando grupo motogerador, com eficiência elétrica de 35% para vazões diárias de biogás inferiores a 5 mil Nm^3/dia e de 42% para vazões superiores. O fator de operação da planta é assumido em 85%.

A estimativa da produção de hidrogênio a partir do biometano foi obtida por meio de cálculos baseados em balanços de massa e energia, levando em conta as condições operacionais típicas de plantas industriais de reforma a vapor convencionais. O potencial de produção de hidrogênio via reforma a vapor do biometano foi obtido considerando o fluxo mássico, o conteúdo térmico e o PCI do hidrogênio, garantindo maior precisão na avaliação do aproveitamento energético. O modelo matemático utilizado está descrito no Apêndice deste Atlas.

Figura 8.4 Comparação do efetivo de cada espécie animal entre Bahia e Brasil (ano-base 2023).
Figure 8.4 *Comparison of the number of animals per animal species between Bahia and Brazil (base year 2023).*



Fonte: elaborada pelos autores com base em dados de [5]. / *Source: prepared by the authors based on data from* [5].

Os fatores utilizados foram obtidos de fontes como Embrapa, CIBiogás, Senar e associações de criadores. As especificidades por cultura estão listadas a seguir:

A metodologia para estimativa do potencial de produção de biogás, biometano e eletricidade a partir de dejetos animais baseia-se em dados específicos de cada espécie, que consideram fatores como a produção diária de dejetos, concentração de sólidos voláteis e potencial bioquímico de metano. Esses parâmetros são fundamentais para a precisão dos cálculos e permitem avaliar o potencial energético em nível municipal e estadual.

The factors used were obtained from sources such as Embrapa, CIBiogás, Senar, and livestock associations. The specificities by animal farming are listed below:

The methodology for estimating the potential for biogas, biomethane, and electricity production from animal manure is based on species-specific data, which consider factors such as daily residue production, volatile solids concentration, and biochemical methane potential. These parameters are essential for the accuracy of the calculations and allow for the assessment of energy potential at the municipal and state levels.

To better understand the process, Figure 8.6 presents an illustrative diagram of the production of biogas, biomethane, and electricity from animal residue, demonstrating the steps and flows involved. Box 8.1 details the technical parameters adopted for each species, serving as a reference for the estimates and ensuring the consistency of the results presented.

Figura 8.5 Ilustração de uma planta de biodigestão de dejetos animais com produção de biogás.
Figure 8.5 *Illustration of an animal waste biodigestion plant with biogas production*

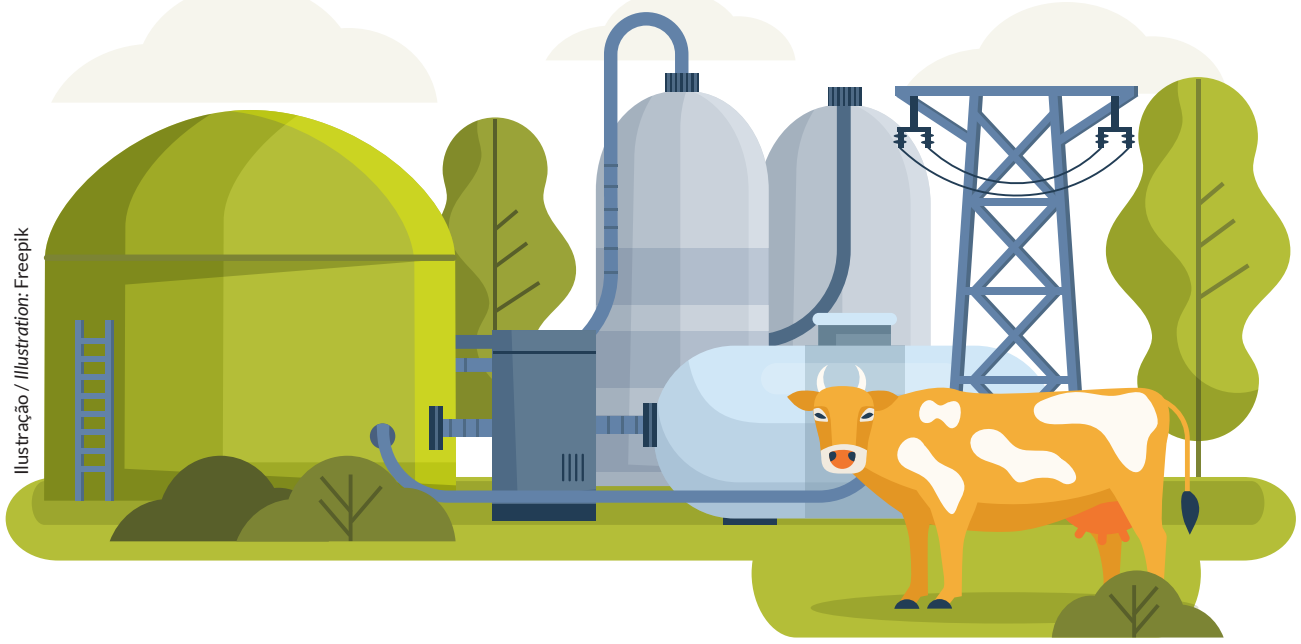


Ilustração / *Illustration*: Freepik

8.4 RESULTS AND SPATIAL REPRESENTATION OF ENERGY POTENTIAL FROM LIVESTOCK MANURE IN BAHIA

The growing adoption of more intensive and technologically advanced livestock systems has expanded the possibilities for energy use from livestock manure. This section analyzes estimates of the potential for biogas, biomethane, hydrogen, and electricity production from livestock waste of different categories in Bahia.

Quadro 8.1 Fatores técnicos utilizados na estimativa do potencial energético de dejetos animais, detalhadas para cada espécie.
Box 8.1 *Technical factors used to estimate the energy potential of livestock manure, detailed for each animal species.*

Espécie / *Animal species*	**Fator** / *Factor*	**Fonte de dados** / *Data source*
Bovinos de corte / Beef cattle farming	Confinados por 110 dias anteriores ao abate / *Confined for 110 days prior to slaughter*	Captar Agrobusiness [9]
Bovinos de leite / *Dairy cattle*	Confinados por 8 horas/dia (período de ordenha) / *Confined for 8 hours/day (milking period)*	CIBiogás [10]
Suínos de corte / *Grower-finisher pigs*	Confinamento durante todo o ciclo / *Confined throughout the entire cycle*	CIBiogás [11]
Suínos matrizes / *Breeding sows*	Confinamento durante todo o ciclo / *Confined throughout the entire cycle*	CIBiogás[11]
Caprinos / *Goats*	Confinados por 8 horas/dia (período noturno) / *Confined for 8 hours/day (night period)*	Adab ([12]
Ovinos / *Sheep*	Confinados por 8 horas/dia (período noturno) / *Confined for 8 hours/day (night period)*	Adab ([12]
Aves de corte / *Broiler birds*	Efetivo calculado pela diferença entre galináceos e galinhas *Flock count calculated by the difference between chickens and hens*	IBGE [5]
	Sistema confinado / *Confined system*	*Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [13]
	Dejetos correspondem à cama de frango / *Manure corresponds to chicken litter*	*Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [13]
Aves poedeiras / *Laying hens*	Efetivo de galinhas / *Chicken count*	IBGE [5]
	Sistema confinado em gaiolas / *Confined system in cages*	*Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [13]
Bubalinos / *Buffaloes*	Confinados por 100 dias anteriores ao abate / *Confined for 100 days prior to slaughter*	[14]

Fonte: elaborado pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL NA BAHIA

The potential estimate considered the use of manure biodigesters, which produce biogas and biofertilizers (digester). Biomethane is obtained through biogas upgrading, while electricity is generated by burning it directly in generator sets. This approach generates not only environmental benefits by reducing greenhouse gas emissions and ensuring proper waste disposal, but also opens up opportunities for diversifying producers' income.

The results are available in georeferenced maps illustrating energy potential and in tables highlighting the ten municipalities with the greatest identified potential. It is worth noting that the energy 27.9 TWh/year [15]. Biomethane was evaluated by comparing the total volume of natural gas distributed (approximately 1.8 billion m³/year, equivalent to a daily average of approximately 4.8 million m³/day). In 2024, the residential/commercial sector represented 1.24% of total natural gas [16]. As for hydrogen, the comparison will be made on an energy basis by comparing the total energy of hydrogen with the volume of natural gas distributed, considering the Higher Heating Value (HHV) of natural gas equal to 39.5 MJ/m³ and of hydrogen equal to 12.7 MJ/m³.

Para melhor compreensão do processo, a *Figura 8.6* apresenta um esquema ilustrativo da produção de biogás, biometano e eletricidade a partir dos resíduos animais, demonstrando as etapas e fluxos envolvidos. Já a *Tabela 8.1* detalha os parâmetros técnicos adotados para cada espécie, servindo como referência para as estimativas e garantindo a consistência dos resultados apresentados.

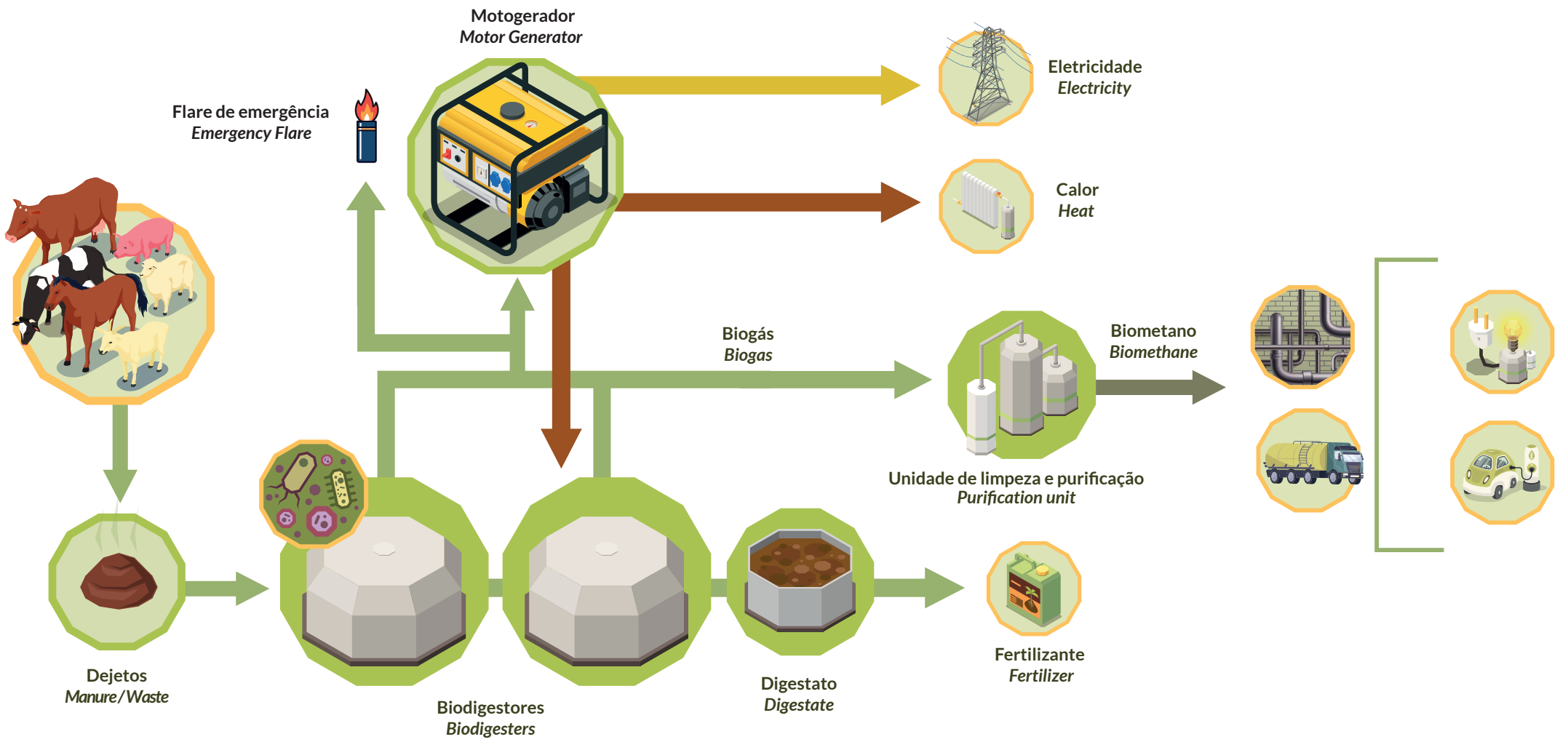
8.4 RESULTADOS E REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL NA BAHIA

A crescente adoção de sistemas de produção animal mais intensivos e tecnificados tem ampliado as possibilidades de aproveitamento energético dos dejetos gerados na pecuária. Neste item, são analisadas as estimativas do potencial de produção de biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade a partir dos resíduos de diferentes categorias de animais criados na Bahia.

A estimativa dos potenciais considerou o aproveitamento dos dejetos em biodigestores, nos quais ocorre a produção de biogás e de biofertilizantes (digestato). O biometano é obtido por meio da purificação do biogás, enquanto a geração de eletricidade resulta da sua queima direta em grupos motogeradores. Essa abordagem gera não apenas benefícios ambientais, ao reduzir as emissões de gases de efeito estufa e assegurar a destinação adequada dos resíduos, mas também abre oportunidades para a diversificação da renda dos produtores.

Os resultados são disponibilizados em mapas georreferenciados, que ilustram os potenciais energéticos, e em tabelas que destacam os dez municípios com maior potencial identificado. Vale frisar que a análise dos potenciais energéticos é feita considerando o consumo de energia elétrica por ano em 2024 o qual foi estimado em 27,9 TWh/ano [15]. O biometano foi avaliado comparando o volume total de gás natural distribuído, (1,8 bilhão de m³/ano, aproximadamente, o que equivale a uma média diária de cerca de 4,8 milhões de m³/dia). No ano de 2024 o setor residencial/comercial representou 1,24% do total de gás natural [16]. Quanto ao hidrogênio a comparação será feita em base de energia comparando a energia total do biometano, com o volume de gás natural distribuído, considerando o poder calorífico superior do gás natural igual a 39,5 MJ/m³ e do hidrogênio igual a 12,7 MJ/m³.

Figura 8.6 Esquema ilustrativo da produção de biogás, biometano e eletricidade a partir de dejetos animais, evidenciando as principais etapas do processo e os fluxos envolvidos.
Figure 8.6 *Illustrative diagram of the production of biogas, biomethane, and electricity from livestock manure, highlighting the main process steps and the flows involved.*



Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Tabela 8.1 Parâmetros técnicos utilizados para estimativa do potencial energético de biogás, biometano e eletricidade por cultura animal.
Table 8.1 *Technical parameters used to estimate the energy potential of biogas, biomethane and electricity per animal culture.*

Parâmetro *Parameter*	**Unidade** *Unit*	**Bovinos de corte** *Beef cattle farming*	**Bovinos leiteiros** *Dairy cattle*	**Suínos de corte** *Finisher pig*	**Matrizes suínas** *Breeding sows*	**Aves de corte** *Broiler birds*	**Aves poedeiras** *Laying hens*	**Caprinos** *Goats*	**Ovinos** *Sheep*	**Bubalinos** *Buffaloes*
Confinamento *Confinement*		**110 dias** *110 days*	**Durante a ordenha** *During milking*	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**noturno** *nighttime*	**noturno** *nighttime*	**100%**
Produção de efluente / *Effluent production*	litros efluente/animal dia *liters of effluent/animal day*	●	●	●	●					
Produção de dejeto *Manure production*	kg dejetos/animal.ano *kg manure/animal.year*					●		●	●	●
	kg dejetos/animal.dia *kg manure/animal.day*						●			
Sólidos totais (ST) / *Total Solids (TS)*	Kg ST/kg dejeto *Kg TS/kg manure*								●	
Sólido Voláteis (SV) *Volatile Solids (VS)*	Kg SV/litro efluente *Kg VS/liter of effluent*	●	●							
	Kg SV/kg cama frango *Kg VS/kg chicken litter*					●				
	g SV/litro efluente *g VS/liter of effluent*			●	●					
	Kg SV/kg dejetos *Kg VS/kg manure*						●	●	●	●
Fator de geração de biogás *Biogas generation factor*	$Nm^3CH_4/kgSV$ *$Nm^3CH_4/kgVS$*	●	●	●	●	●		●	●	●
	Nm^3 biogás/kg SV *Nm^3 biogas/kg VS*						●			
Concentração de metano no biogás *Methane concentration in biogas*	%	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Concentração de metano no biometano *Methane concentration in biomethane*	%	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Potencial energético do metano *Energy potential of methane*	kWh/Nm^3CH_4	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Eficiência elétrica para vazões de biogás **menores** que 5.000 Nm^3/dia *Electrical efficiency for biogas flow rates less than 5,000 Nm^3/day*	%	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Eficiência elétrica para vazões de biogás **maiores** que 5.000 Nm^3/dia *Electrical efficiency for biogas flow rates greater than 5,000 Nm^3/day*	%	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Fator de operação / *Operating factor*	%	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL NA BAHIA

8.4.1 ENERGY POTENTIAL FROM BEEF CATTLE FARMING MANURE

The municipalities with the ten highest technical potentials for producing biogas, biomethane, hydrogen, and electricity from beef cattle manure are presented in Table 8.2.

The results presented for the ten municipalities with the greatest technical potential for energy use from beef cattle manure highlight the strategic importance of this segment in Bahia's bioenergy mix. Together, these municipalities generate 234.78 million Nm³/year of biogas, 126.8 million Nm³/year of biomethane, 292 million Nm³/year of hydrogen (obtained from biomethane), and 589,860 MWh/year of electricity, representing significant fractions of the State's energy consumption and supply.

Considering Bahia's annual electricity consumption in 2024, estimated at 27.9 TWh/year [71] the potential electricity generation of these municipalities would correspond to approximately 2.1% of the State's total. Although this share may seem modest in the global context, it is highly significant in the context of distributed generation and the diversification of renewable sources, especially in rural areas and regions far from large consumer centers.

Regarding natural gas, the estimated biomethane production for the ten largest producers represents approximately 7.0% of the total volume distributed in the state (1.8 billion Nm³/year, equivalent to a daily average of 4.8 million Nm³/day). This energy equivalency is particularly relevant when considering the residential/commercial sector, which accounted for only 1.24% of natural gas consumption in 2024, a scenario in which partial replacement with biomethane could significantly reduce greenhouse gas emissions and increase local energy autonomy.

In the case of hydrogen, using the energy contained in the total volume of natural gas distributed as a basis for comparison (considering a Higher Heating Value – HHV) of 39.5 MJ/m³ for natural gas and 12.7 MJ/m³ for hydrogen), the identified potential corresponds to approximately 5.0% of the annual energy associated with natural gas in the State. This is a significant amount, which reinforces the viability of integrating renewable hydrogen production into the biomethane chain, expanding opportunities for decarbonization and entry into the emerging renewable H_2 market.

The analysis of Table 8.2 also highlights a strong territorial concentration of potential, particularly in the Rio Grande Basin, the Far South, and the Mid-Southwest of Bahia, regions that concentrate a large portion of the beef cattle herds in confinement or semi-confinement. Municipalities such as Santa Rita de Cássia, Itamaraju, and Itanhém stand out for presenting individual volumes exceeding 25 million Nm³/year of biogas and 13 million Nm³/year of biomethane, configuring them as potential regional hubs for gaseous biofuel production. These hubs could anchor efficient logistics chains and business models focused on both local consumption and supply to regional or industrial markets.

However, it is important to consider that the estimated values derive from a methodological hypothesis that assumes full confinement of the animals for 110 days per year. This assumption was adopted due

8.4.1 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS DEJETOS DA BOVINOCULTURA DE CORTE

Os municípios com os dez maiores potenciais técnicos de produção de biogás, biometano hidrogênio e eletricidade a partir dos dejetos de bovinos de corte são apresentados na *Tabela 8.2*.

Os resultados apresentados para os dez municípios com maior potencial técnico de aproveitamento energético a partir dos dejetos de bovinos de corte evidenciam a relevância estratégica desse segmento na matriz bioenergética da Bahia. Juntos, esses municípios somam 234,78 milhões Nm³/ano de biogás, 126,78 milhões Nm³/ano de biometano, 291,99 milhões Nm³/ano de hidrogênio (obtido a partir do biometano) e 589,86 mil MWh/ano de eletricidade, representando frações expressivas do consumo e da oferta energética do Estado.

Considerando o consumo anual de energia elétrica na Bahia em 2024, estimado em 27,95 milhões MWh/ano [71] a geração elétrica potencial desses municípios corresponderia a, aproximadamente, 2,1% do total estadual. Embora essa participação possa parecer modesta no contexto global, ela é altamente significativa no âmbito da geração distribuída e da diversificação de fontes renováveis, especialmente em áreas rurais e regiões afastadas de grandes centros consumidores.

Em relação ao gás natural, a produção de biometano estimada para o grupo dos dez maiores representa cerca de 7,0% do volume total distribuído no Estado (1,8 bilhão Nm³/ano, equivalente a uma média diária de 4,8 milhões Nm³/dia). Essa equivalência energética é particularmente relevante quando se considera o setor residencial/comercial, que respondeu por apenas 1,24% do consumo de gás natural em 2024, cenário em que a substituição parcial por biometano poderia reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e aumentar a autonomia energética local.

No caso do hidrogênio, utilizando como base de comparação a energia contida no volume total de gás natural distribuído (considerando PCS de 39,5 MJ/m³ para gás natural e 12,7 MJ/m³ para hidrogênio), o potencial identificado corresponde a cerca de 5,0% da energia anual associada ao gás natural no Estado. Trata-se de um valor expressivo, que reforça a viabilidade de integrar a produção de hidrogênio renovável à cadeia do biometano, ampliando as oportunidades de descarbonização e de inserção no mercado emergente de H_2 renovável.

A análise da *Tabela 8.2* também evidencia uma forte concentração territorial dos potenciais, com destaque para a Bacia do Rio Grande, o Extremo Sul e o Médio Sudoeste da Bahia, regiões que concentram grande parte dos rebanhos bovinos de corte em regime de confinamento ou semiconfinamento. Municípios como Santa Rita de Cássia, Itamaraju e Itanhém se destacam por apresentarem volumes individuais superiores a 25 milhões Nm³/ano de biogás e 13 milhões Nm³/ano de biometano, configurando-se como potenciais polos regionais de produção de biocombustíveis gasosos. Esses polos poderiam ancorar cadeias logísticas eficientes e modelos de negócio voltados tanto para o consumo local quanto para o suprimento de mercados regionais ou industriais.

Entretanto, é importante considerar que os valores estimados derivam de uma hipótese metodológica que pressupõe o confinamento integral dos animais por 110 dias ao ano. Essa suposição foi adotada devido à indisponibilidade de dados precisos sobre o número real de bovinos confinados, mas pode superestimar o potencial em municípios onde predominam sistemas extensivos ou semi-intensivos. Apesar dessa limitação, mesmo com ajustes conservadores, os resultados permanecem suficientemente robustos para apontar oportunidades concretas de aproveitamento energético, sustentando a viabilidade de projetos de bioenergia vinculados à pecuária de corte na Bahia.

Tabela 8.2 Municípios com os dez maiores potenciais técnicos de biogás, biometano e eletricidade produzidos a partir dos dejetos de bovinos de corte.
Table 8.2 *Municipalities with the ten highest technical potentials for biogas, biomethane, and electricity produced from beef cattle manure.*

Território de identidade (TI) *Territory of Identity*	Município *Municipality*	Bovinos (Cabeças) *Beef Cattle (Heads)*	Biogás (Nm³/ano) *Biogas (Nm³/year)*	Biometano (Nm³/ano) *Biomethane (Nm³/year)*	Hidrogênio do Biometano (Nm³/ano) *Hydrogen from Biomethane (Nm³/year)*	Eletricidade (MWhano) *Electricity (MWh/year)*
Bacia do Rio Grande	Santa Rita de Cássia	188.374	27.962.434	15.099.714	34.777.273	70.254
Extremo Sul	Itamaraju	183.168	27.189.649	14.682.411	33.816.150	68.312
Extremo Sul	Itanhém	168.981	25.083.716	13.545.207	31.196.972	63.021
Médio Sudoeste da Bahia	Itarantim	167.555	24.872.039	13.430.901	30.933.706	62.490
Médio Sudoeste da Bahia	Itambé	158.958	23.595.892	12.741.782	29.346.543	59.283
Médio Sudoeste da Bahia	Itapetinga	147.513	21.896.984	11.824.371	27.233.588	55.015
Costa do Descobrimento	Guaratinga	146.653	21.769.325	11.755.435	27.074.816	54.694
Bacia do Rio Grande	Wanderley	144.749	21.486.693	11.602.814	26.723.303	53.984
Bacia do Rio Grande	Cotegipe	138.226	20.518.412	11.079.942	25.519.038	51.551
Bacia do Rio Grande	Angical	137.428	20.399.956	11.015.976	25.371.713	51.254
TOTAL TOP 10		**1.581.605**	**234.775.100**	**126.778.554**	**291.993.101**	**589.858**
BAHIA		**13.290.719**	**1.972.888.224**	**1.065.359.641**	**2.453.708.894**	**4.953.387**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 8.1 / *Map 8.1*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DOS DEJETOS DE CRIAÇÃO DE BOVINOS DE CORTE

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM BEEF CATTLE FARMING MANURE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

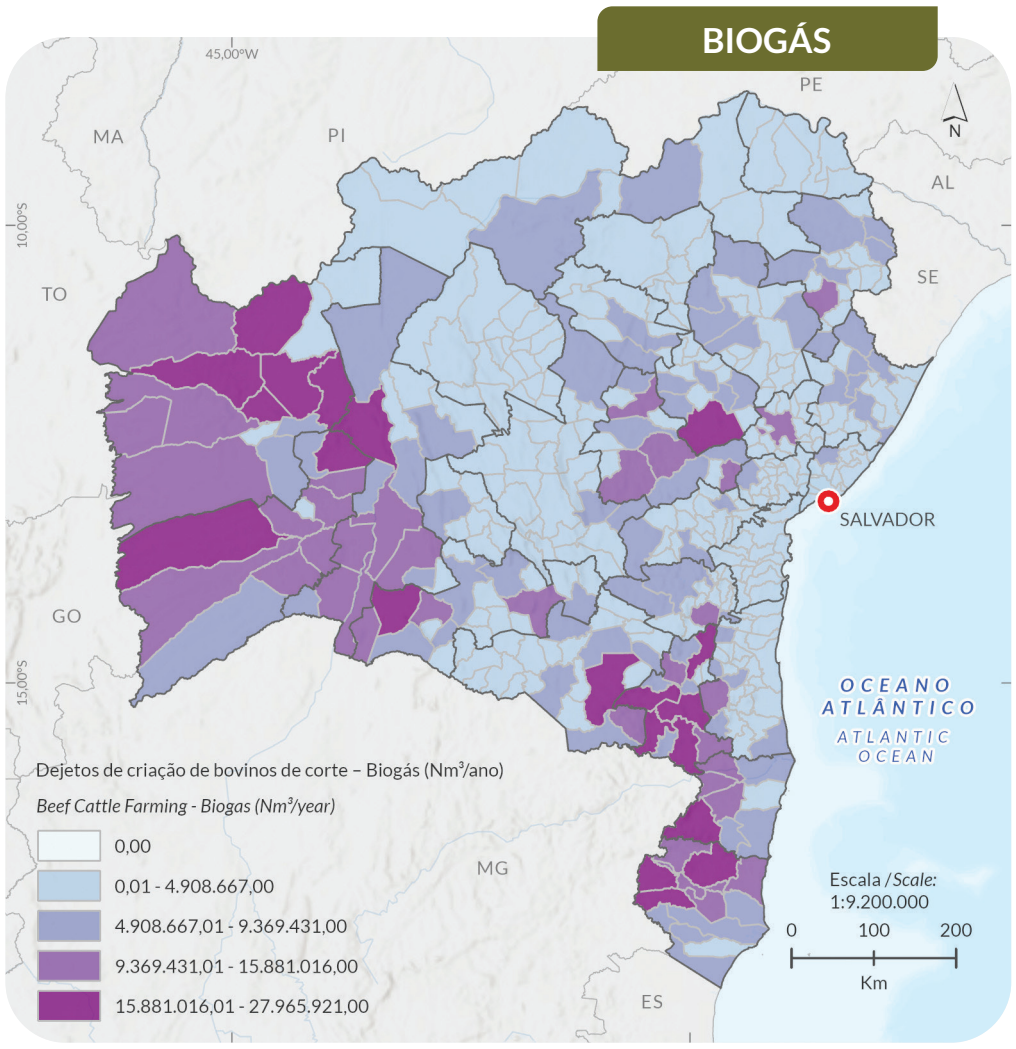
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

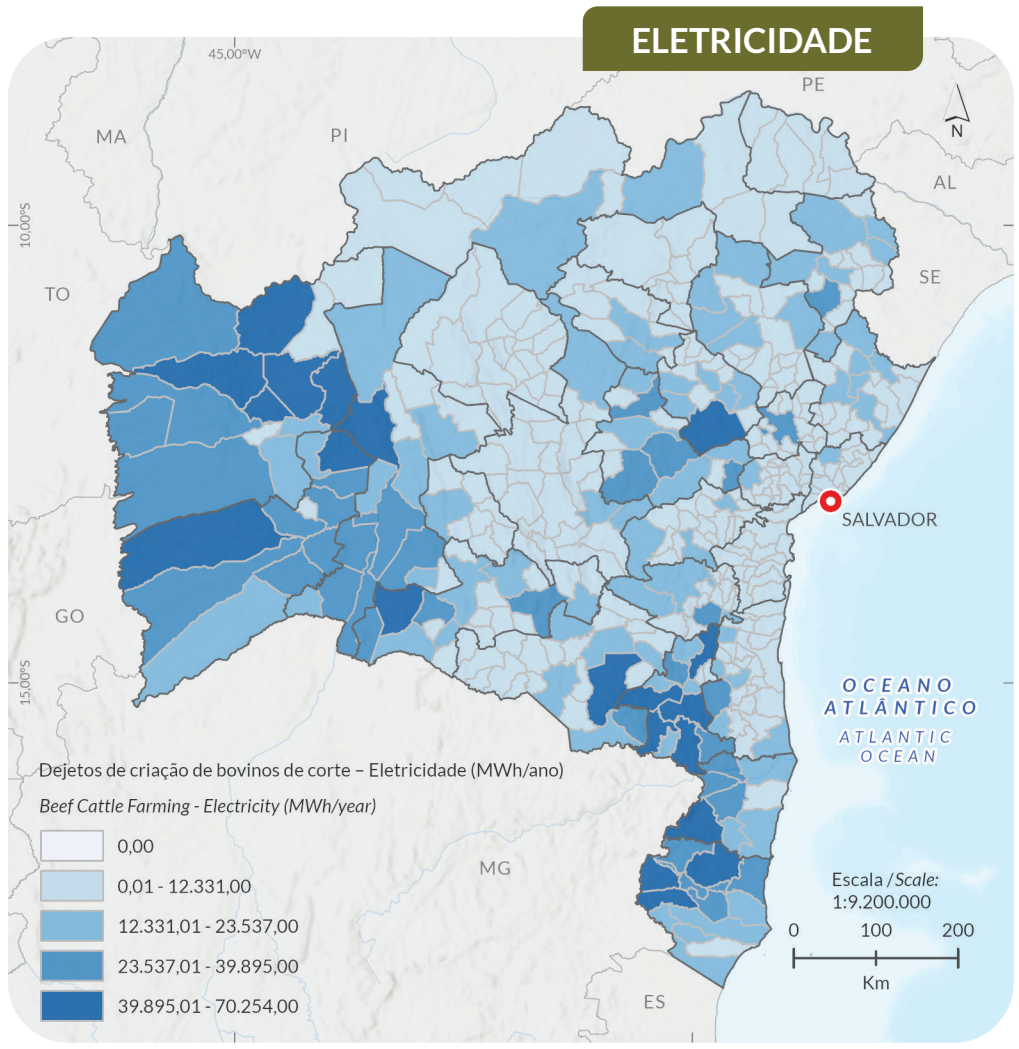
BIOGAS

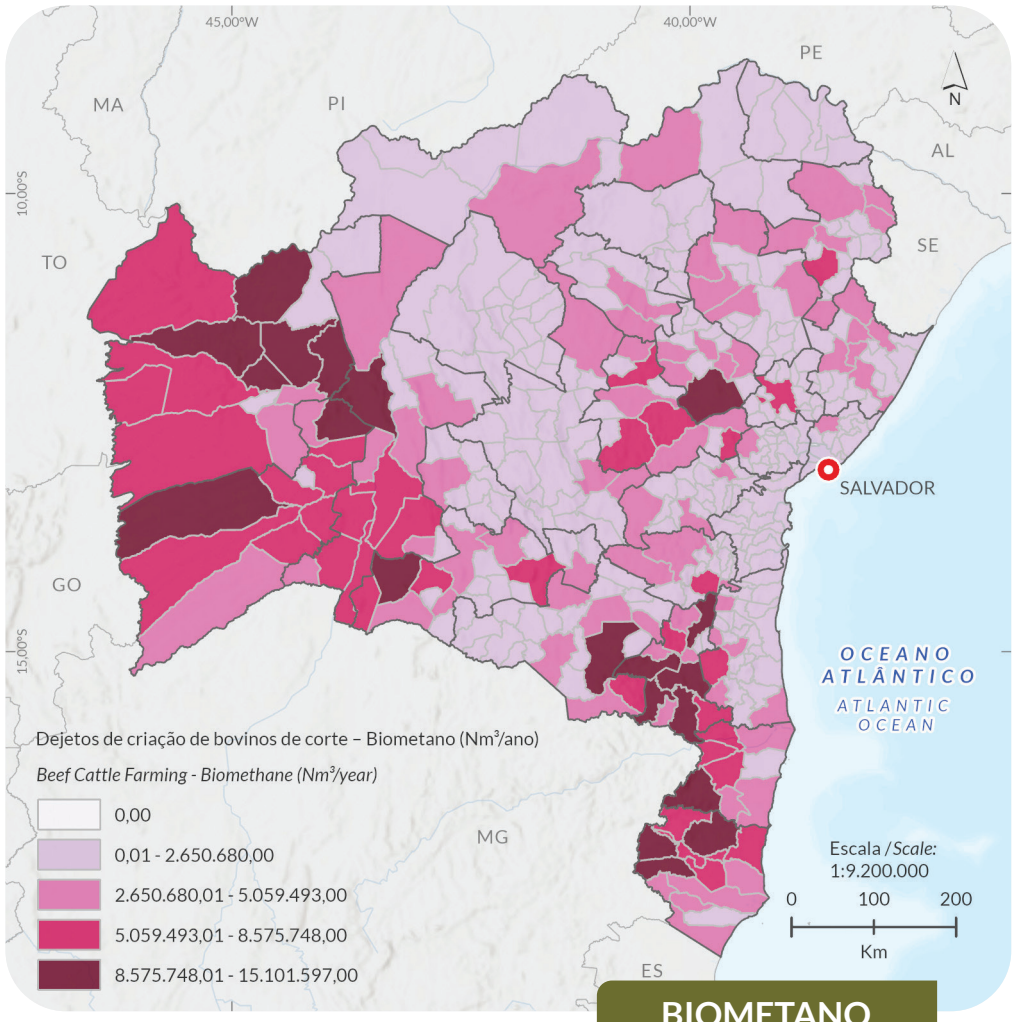
BIOGÁS



ELECTRICITY

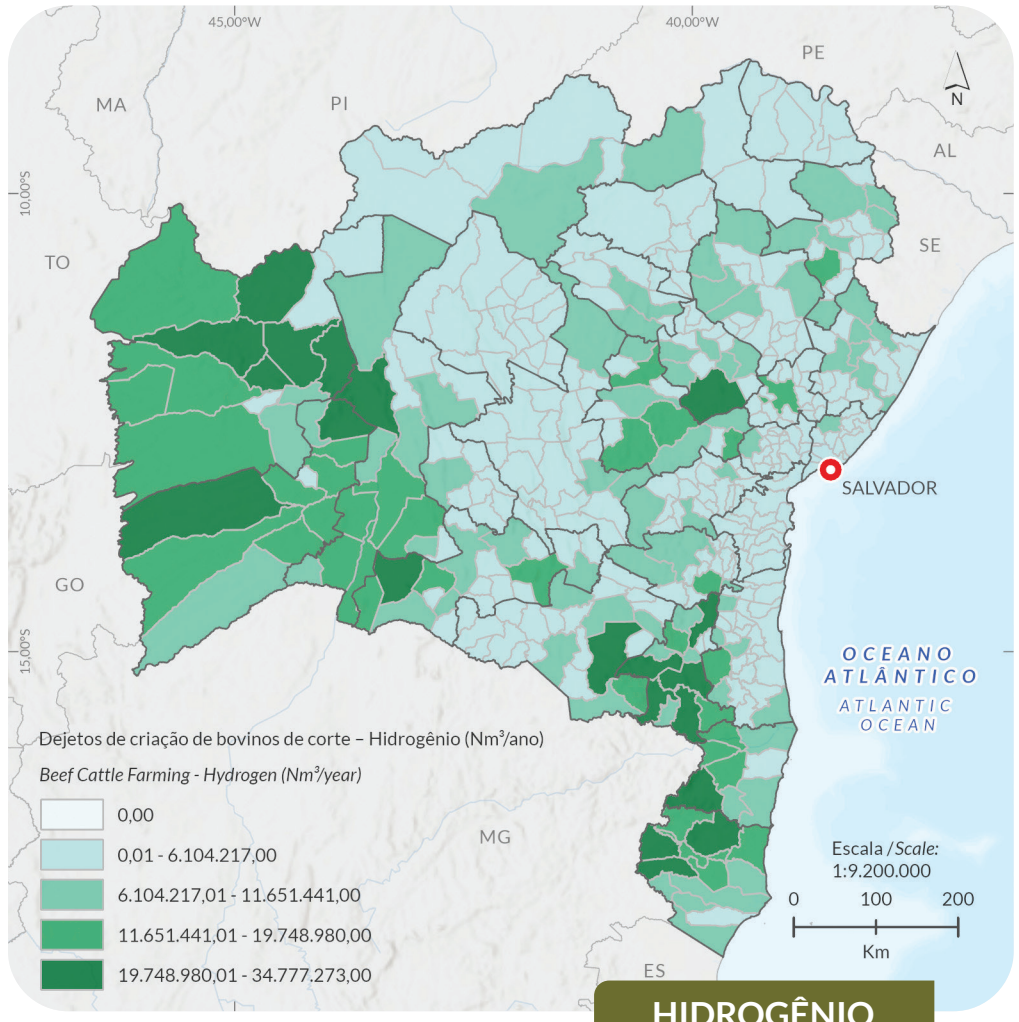
ELETRICIDADE





BIOMETANO

BIOMETHANE



HIDROGÊNIO

HYDROGEN

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL NA BAHIA

to the unavailability of precise data on the actual number of confined cattle, but it may overestimate the potential in municipalities where extensive or semi-intensive systems predominate. Despite this limitation, even with conservative adjustments, the results remain robust enough to point to concrete opportunities for energy use, supporting the viability of bioenergy projects linked to beef cattle in Bahia.

Harnessing this potential depends on factors such as the availability of infrastructure for residue collection and treatment, the adoption of efficient biodigestion and upgrading technologies, and integration with electricity and gas distribution networks. Furthermore, public incentive policies, cooperative production models, and technical training for producers can play a decisive role in transforming these potentials into economically viable and environmentally sustainable projects, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions and the dynamization of local economies.

8.4.2 ENERGY POTENTIAL FROM DAIRY CATTLE MANURE

The municipalities with the ten highest technical potentials for the production of biogas, biomethane, hydrogen, and electricity from dairy cattle manure are presented in Table 8.3.

The analysis of the results highlights the significant role of dairy farm waste in Bahia's bioenergy mix. The group of ten municipalities with the greatest technical potential totals 107.6 million Nm³/year of biogas, 49.1 million Nm³/year of biomethane, 133.9 million Nm³/year of hydrogen (obtained from biomethane), and 250.4 GWh/year of electricity, values that represent significant portions of the State's energy supply and consumption.

Considering Bahia's electricity consumption in 2024, estimated at 27.9 TWh/year [71] the biogas-based electricity generation potential of these ten municipalities would correspond to approximately 0.9% of the State's total. Although this percentage appears small, its relevance increases when considered in the context of distributed generation, especially in rural areas with less access to stable electricity supply sources.

Regarding natural gas, the biomethane potential of these ten municipalities is equivalent to approximately 2.7% of the annual volume distributed in the State (1.8 billion Nm³/year). When compared with consumption in the residential/commercial sector, which represented 1.2% of this total in 2024, it can be seen that biomethane production from dairy farming could easily meet this segment's demand in full, enabling direct substitution and reducing associated emissions.

For hydrogen, considering the Higher Heating Value (HHV) of natural gas (39.5 MJ/m³) and hydrogen (12.7 MJ/m³), the estimated energy content of biomethane from these municipalities corresponds to approximately 2.40% of the annual energy contained in the natural gas distributed in Bahia. Although lower than the percentages obtained for biomethane and electricity, this value is significant in the context of decentralized hydrogen production, opening up opportunities for applications in mobility, industry, and energy storage.

O aproveitamento desse potencial depende de fatores como a viabilização de infraestrutura para coleta e tratamento dos dejetos, a adoção de tecnologias eficientes de biodigestão e purificação, e a integração com redes de distribuição de energia elétrica e de gás. Além disso, políticas públicas de incentivo, modelos cooperativos de produção e capacitação técnica dos produtores podem desempenhar papel decisivo para transformar esses potenciais em projetos economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a dinamização das economias locais.

8.4.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS DEJETOS DA BOVINOCULTURA DE LEITE

Os municípios com os dez maiores potenciais técnicos de produção de biogás, biometano hidrogênio e eletricidade a partir dos dejetos de bovinos leiteiros, são apresentados na *Tabela 8.3*.

A análise dos resultados evidencia o papel expressivo dos resíduos da pecuária leiteira na matriz bioenergética da Bahia. O grupo dos dez municípios com maior potencial técnico soma 107,64 milhões Nm³/ano de biogás, 49,12 milhões Nm³/ano de biometano, 133,87 milhões Nm³/ano de hidrogênio (obtido a partir do biometano) e 250,43 GWh/ano de eletricidade, valores que representam parcelas significativas da oferta e consumo energético estadual.

Considerando o consumo de energia elétrica na Bahia em 2024, estimado em 27,95 milhões MWh/ano [71] o potencial de geração elétrica a partir do biogás desses dez municípios corresponderia a, aproximadamente, 0,9% do total estadual. Embora esse percentual pareça reduzido, sua relevância aumenta quando considerado no contexto de geração distribuída, especialmente em áreas rurais com menor acesso a fontes firmes de suprimento elétrico.

Em relação ao gás natural, o potencial de biometano dos dez municípios equivale a cerca de 2,73% do volume anual distribuído no Estado (1,8 bilhão Nm³/ano). Quando se compara com o consumo do setor residencial/comercial, que representou 1,24% desse total em 2024, observa-se que a produção de biometano derivada da pecuária leiteira poderia suprir integralmente, e com folga, a demanda desse segmento, possibilitando substituição direta e redução de emissões associadas.

Para o hidrogênio, considerando o poder calorífico superior do gás natural (39,5 MJ/m³) e do hidrogênio (12,7 MJ/m³), o conteúdo energético estimado a partir do biometano desses municípios corresponde a cerca de 2,40% da energia anual contida no gás natural distribuído na Bahia. Embora menor que os percentuais obtidos para o biometano e a eletricidade, esse valor é expressivo no contexto da produção descentralizada de hidrogênio, abrindo oportunidades para aplicações em mobilidade, indústria e armazenamento de energia.

A distribuição geográfica dos maiores potenciais concentra-se sobretudo nos territórios do Médio Sudoeste da Bahia e Extremo Sul, com destaque para Itarantim, Itanhém e Medeiros Neto, que lideram o ranking estadual. Esses municípios apresentam volumes de biogás superiores a 11 milhões Nm³/ano, configurando-se como áreas prioritárias para o desenvolvimento de projetos de geração distribuída e para a criação de polos regionais de bioenergia.

Um diferencial metodológico relevante deste estudo foi a estimativa do potencial energético considerando apenas o tempo de manejo dos animais durante a ordenha, em vez de assumir confinamento integral. Essa abordagem mais conservadora busca aproximar os resultados da realidade produtiva, evitando superdimensionamentos que poderiam comprometer a viabilidade técnica e econômica dos projetos. Embora resulte em valores mais modestos, essa metodologia aumenta a confiabilidade das estimativas e facilita seu uso no planejamento de investimentos e políticas públicas.

Tabela 8.3 Municípios com os dez maiores potenciais técnicos de biogás, biometano e eletricidade produzidos a partir dos dejetos de bovinos leiteiros.
Table 8.3 *Municipalities with the ten highest technical potentials for biogas, biomethane, and electricity produced from dairy cattle manure.*

Território de identidade (TI) *Territory of Identity*	Município *Municipality*	Bovinos Leiteiros (Cabeças) *Dairy Cattle (Heads)*	Biogás (Nm³/ano) *Biogas (Nm³/year)*	Biometano (Nm³/ano) *Biomethane (Nm³/year)*	Hidrogênio do Biometano (Nm³/ano) *Hydrogen from Biomethane (Nm³/year)*	Eletricidade (MWhano) *Electricity (MWh/year)*
Médio Sudoeste da Bahia	Itarantim	26.115	18.229.004	9.843.662	22.671.670	45.799
Extremo Sul	Itanhém	18.159	12.675.493	6.844.766	15.764.689	31.846
Extremo Sul	Medeiros Neto	15.871	11.078.404	5.982.338	13.778.368	27.834
Semiárido Nordeste II	Ribeira do Pombal	15.778	11.013.488	5.947.283	13.697.630	27.671
Médio Sudoeste da Bahia	Macarani	15.358	10.720.316	5.788.971	13.333.008	26.934
Sudoeste Baiano	Vitória da Conquista	14.612	10.199.587	5.507.777	12.685.370	25.626
Médio Sudoeste da Bahia	Itambé	13.145	9.175.580	4.954.813	11.411.798	23.053
Bacia do Jacuípe	Ipirá	12.980	9.060.405	4.892.619	11.268.553	22.764
Bacia do Rio Corrente	Serra Dourada	11.500	8.027.323	4.334.755	9.983.695	20.168
Bacia do Jacuípe	Riachão do Jacuípe	10.683	7.457.034	4.026.799	9.274.419	18.735
TOTAL TOP 10		**154.201**	**107.636.634**	**58.123.782**	**133.869.200**	**270.431**
BAHIA		**969.683**	**676.866.000**	**365.507.640**	**841.827.785**	**1.634.272**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 8.2 / *Map 8.2*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DOS DEJETOS DE CRIAÇÃO DE BOVINOS DE LEITE

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM DAIRY CATTLE MANURE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

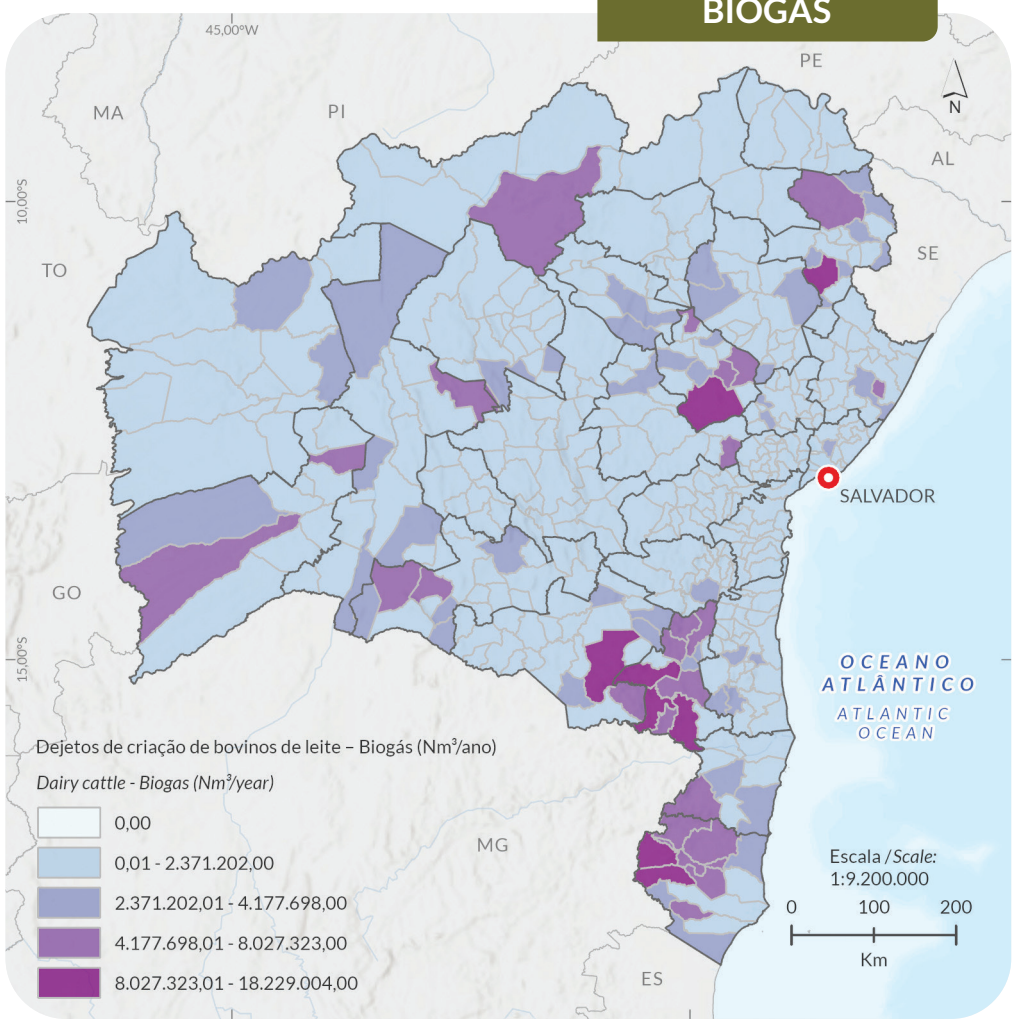
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

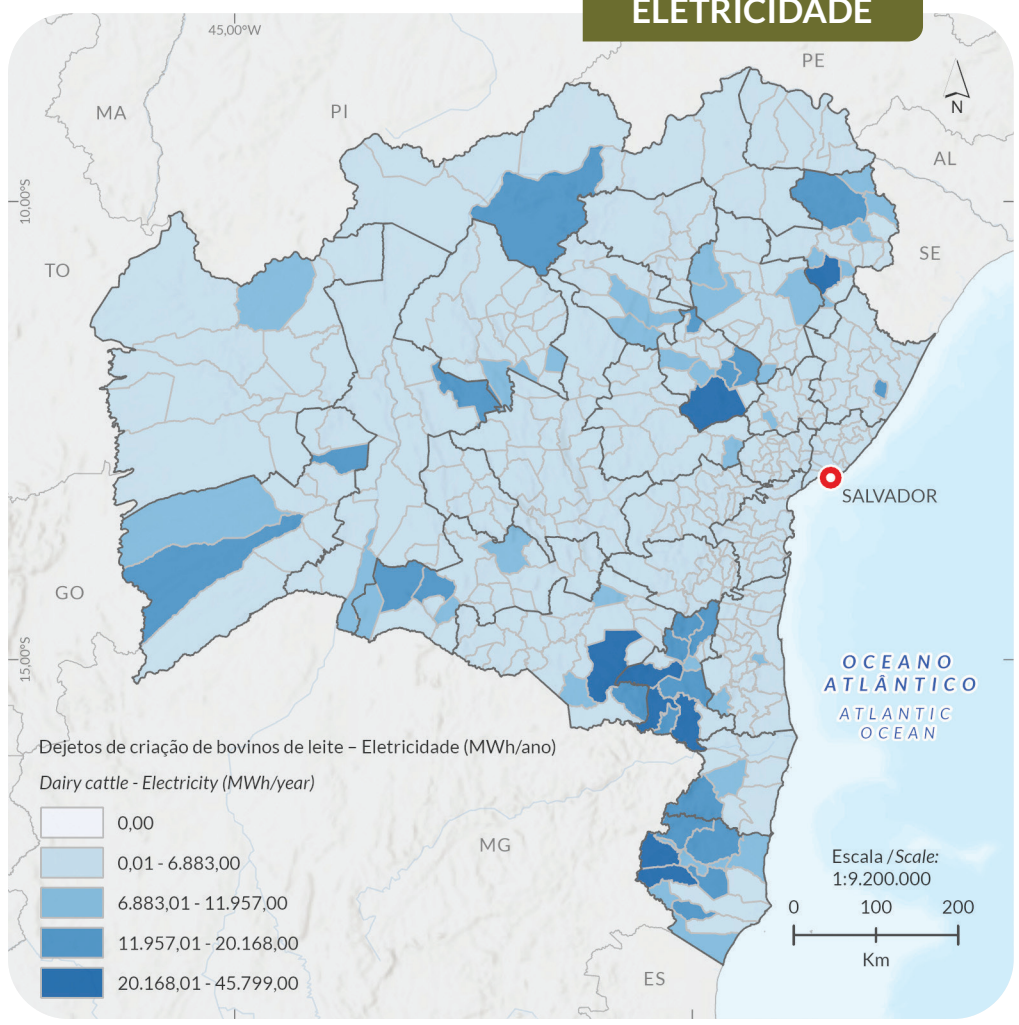
BIOGAS

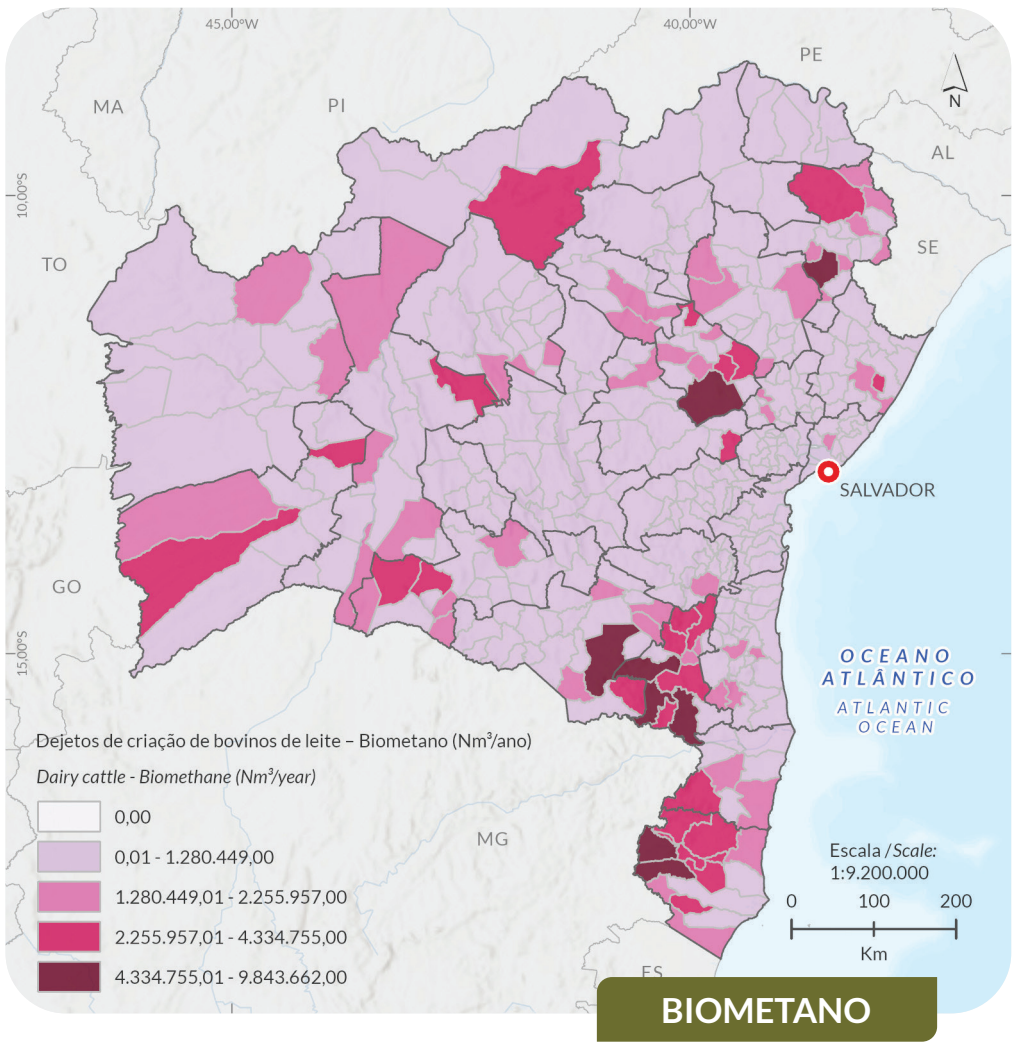
BIOGÁS



ELECTRICITY

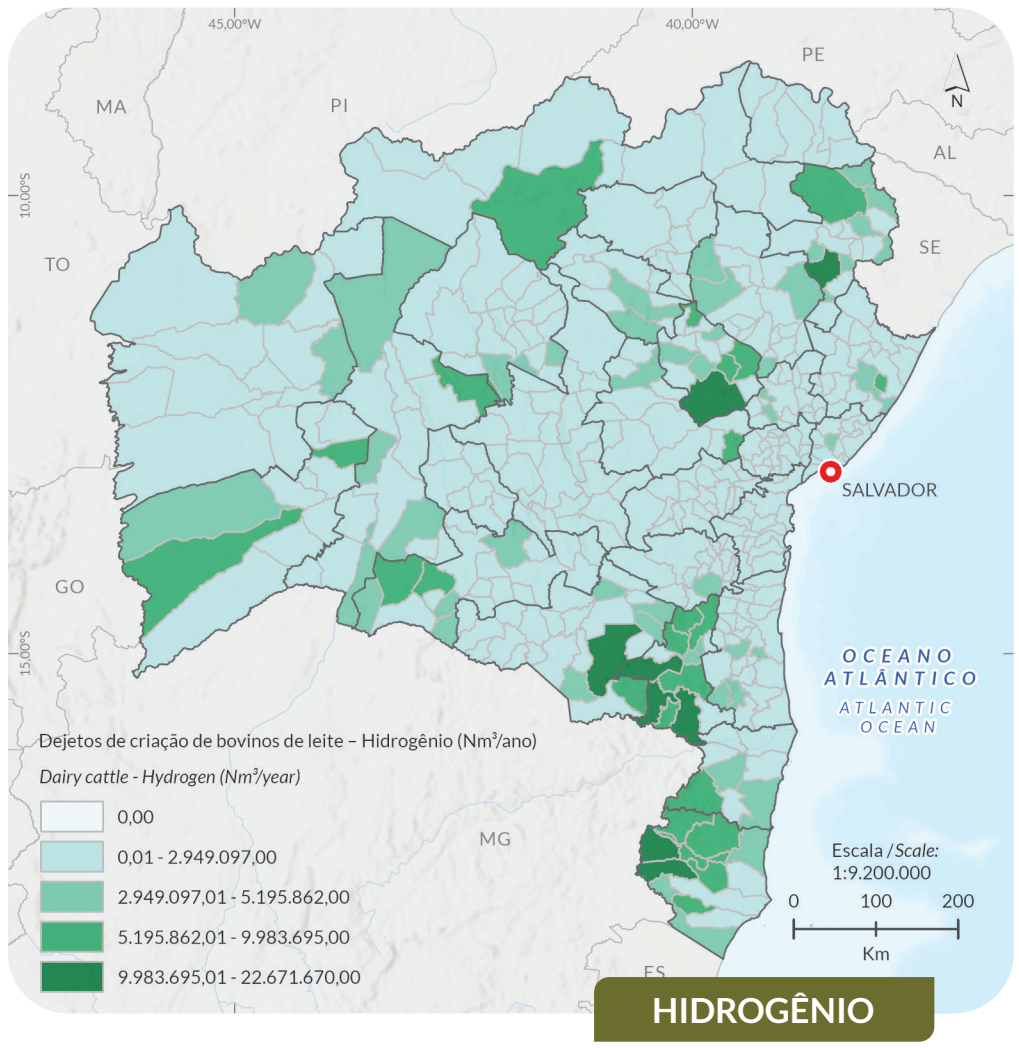
ELETRICIDADE





BIOMETHANE

BIOMETANO



HYDROGEN

HIDROGÊNIO

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL NA BAHIA

The geographic distribution of the greatest potential is concentrated primarily in the Médio Sudoeste da Bahia, Extremo Sul TIs) regions of Bahia, with Itarantim, Itanhém, and Medeiros Neto leading the State ranking. These municipalities have biogas volumes exceeding 11 million Nm³/year, constituting priority areas for the development of distributed generation projects and the creation of regional bioenergy hubs.

A significant methodological difference in this study was the estimation of energy potential considering only the time spent handling animals during milking, rather than assuming full confinement. This more conservative approach seeks to approximate the results to the production reality, avoiding overestimations that could compromise the technical and economic viability of the projects. Although it results in more modest values, this methodology increases the reliability of the estimates and facilitates their use in investment and public policy planning.

Even under conservative assumptions, Bahia's dairy farming sector offers significant potential for generating biogas, biomethane, electricity, and hydrogen, bringing multiple benefits: reducing greenhouse gas emissions, environmentally sound manure disposal, generating additional income for producers, and strengthening local production chains. Integrating bioenergy systems into rural properties can drive the development of business models aligned with the circular economy, increase the sector's competitiveness, and contribute to achieving sustainability and decarbonization goals in the State.

8.4.3 ENERGY POTENTIAL FROM GROWER-FINISHER PIGS MANURE

The municipalities with the ten highest potentials for biogas, biomethane, hydrogen, and electricity produced from grower finisher pig manure are presented in Table 8.4.

The municipalities with the ten highest technical potentials for producing biogas, biomethane, hydrogen, and electricity from swine manure, shown in Table 8.4, total 110.9 million Nm³/year of biogas, 59.9 million Nm³/year of biomethane, 137.9 million Nm³/year of hydrogen (obtained from biomethane), and 278.5 GWh/year of electricity.

Considering Bahia's annual electricity consumption in 2024, estimated at 27.9 TWh/year [71], the electricity potential of these ten municipalities represents approximately 1% of the State's total. Although modest in proportion to aggregate consumption, this volume is highly relevant for distributed generation applications, especially in rural areas or those with limited access to the conventional electricity grid.

Regarding natural gas, the biomethane potential of these ten municipalities is equivalent to approximately 3.3 % of the annual volume distributed in the State (1.8 billion Nm³/year). Compared to consumption in the residential/commercial sector, which accounted for 1.2% of the total in 2024, the estimated production could easily meet this demand in full, replacing fossil-based gas with a renewable alternative with a lower environmental impact.

Mesmo sob premissas conservadoras, a pecuária leiteira baiana apresenta um potencial significativo para geração de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio, trazendo benefícios múltiplos: redução de emissões de gases de efeito estufa, destinação ambientalmente adequada dos dejetos, geração de renda adicional para produtores e fortalecimento das cadeias produtivas locais. A integração de sistemas de bioenergia às propriedades rurais pode impulsionar o desenvolvimento de modelos de negócio alinhados à economia circular, ampliar a competitividade do setor e contribuir para o cumprimento de metas de sustentabilidade e descarbonização no Estado.

8.4.3 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS DEJETOS DA SUINOCULTURA DE CORTE

Os municípios com os dez maiores potenciais de biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade produzidos a partir dos dejetos de suínos de corte, são apresentados na *Tabela 8.4*.

Os municípios com os dez maiores potenciais técnicos de produção de biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade a partir dos dejetos de suínos de corte, apresentados na *Tabela 8.4*, somam 110,86 milhões Nm³/ano de biogás, 59,86 milhões Nm³/ano de biometano, 137,88 milhões Nm³/ano de hidrogênio (obtido a partir do biometano) e 278,53 GWh/ano de eletricidade.

Considerando o consumo anual de energia elétrica na Bahia em 2024, estimado em 27,95 milhões MWh/ano [71], o potencial elétrico desses dez municípios representa cerca de 1% do total estadual. Embora proporcionalmente modesto frente ao consumo agregado, esse volume é altamente relevante para aplicações em geração distribuída, especialmente em regiões rurais ou com restrições de acesso à rede elétrica convencional.

Em relação ao gás natural, o potencial de biometano dos dez municípios equivale a, aproximadamente, 3,33% do volume anual distribuído no Estado (1,8 bilhão Nm³/ano). Comparado ao consumo do setor residencial/comercial, que respondeu por 1,24% do total em 2024, a produção estimada poderia suprir integralmente, e com folga, essa demanda, substituindo gás de origem fóssil por uma alternativa renovável e de menor impacto ambiental.

Quando convertido em hidrogênio e feita a equivalência energética, utilizando o poder calorífico superior do gás natural (39,5 MJ/m³) e do hidrogênio (12,7 MJ/m³), o potencial desses municípios corresponde a cerca de 2,40% da energia contida no gás natural distribuído no Estado. Embora o percentual seja inferior ao obtido para o biometano, o valor é expressivo no contexto de produção descentralizada de hidrogênio, com aplicação em setores estratégicos como transporte, processos industriais e armazenamento de energia.

Geograficamente, há forte concentração no Sertão do São Francisco, com destaque para Pilão Arcado e Casa Nova, que, juntos, superam 30 milhões Nm³/ano de biogás. Outros polos expressivos incluem Vitória da Conquista, Serra do Ramalho e Campo Alegre de Lourdes, que, pela magnitude dos volumes, configuram-se como áreas prioritárias para a execução de projetos de bioenergia em escala regional. Essa distribuição favorece o estabelecimento de hubs integrados para processamento, purificação e distribuição do biometano e hidrogênio, otimizando custos logísticos e ampliando a viabilidade econômica.

Tabela 8.4 Municípios com os dez maiores potenciais técnicos de biogás, biometano e eletricidade produzidos a partir dos dejetos de suínos de corte.
Table 8.4 *Municipalities with the ten highest technical potentials for biogas, biomethane, and electricity produced from grower finisher pig manure.*

Território de identidade (TI) *Territory of Identity*	Município *Municipality*	Suínos de corte (Cabeças) *Grower-finisher pigs (Heads)*	Biogás (Nm³/ano) *Biogas (Nm³/year)*	Biometano (Nm³/ano) *Biomethane (Nm³/year)*	Hidrogênio do Biometano (Nm³/ano) *Hydrogen from Biomethane (Nm³/year)*	Eletricidade (MWhano) *Electricity (MWh/year)*
Sertão do São Francisco	Pilão Arcado	18.111	15.373.713	8.301.805	19.120.504	38.626
Sertão do São Francisco	Casa Nova	18.022	15.298.165	8.261.009	19.026.543	38.436
Sudoeste Baiano	Vitória da Conquista	13.665	11.599.679	6.263.827	14.426.685	29.143
Velho Chico	Serra do Ramalho	13.172	11.181.191	6.037.843	13.906.205	28.092
Sertão do São Francisco	Campo Alegre de Lourdes	12.403	10.528.417	5.685.345	13.094.341	26.452
Bacia do Rio Corrente	Serra Dourada	12.163	10.324.691	5.575.333	12.840.964	25.940
Bacia do Rio Grande	São Desidério	11.835	10.046.265	5.424.983	12.494.681	25.241
Sertão Produtivo	Guanambi	11.422	9.695.685	5.235.670	12.058.660	24.360
Sertão Produtivo	Caetité	10.015	8.501.338	4.590.723	10.573.234	21.359
Sertão do São Francisco	Remanso	9.790	8.310.345	4.487.586	10.335.693	20.879
TOTAL TOP 10		**130.598**	**110.859.490**	**59.864.124**	**137.877.510**	**278.528**
BAHIA		**844.630**	**716.973.084**	**387.165.465**	**891.709.531**	**1.736.061**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 8.3 / *Map 8.3*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DOS DEJETOS DE CRIAÇÃO DE SUÍNOS DE CORTE

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM GROWER-FINISHER PIGS MANURE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

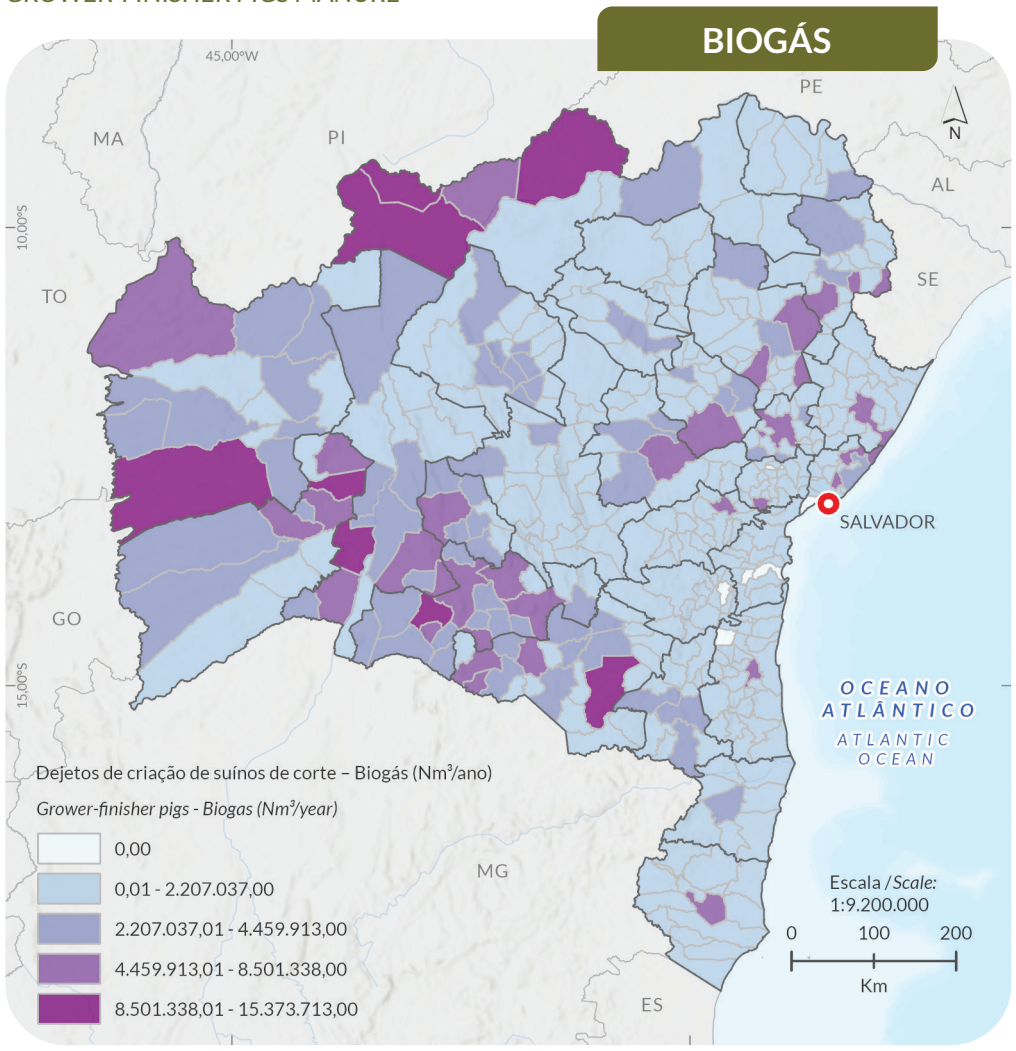
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

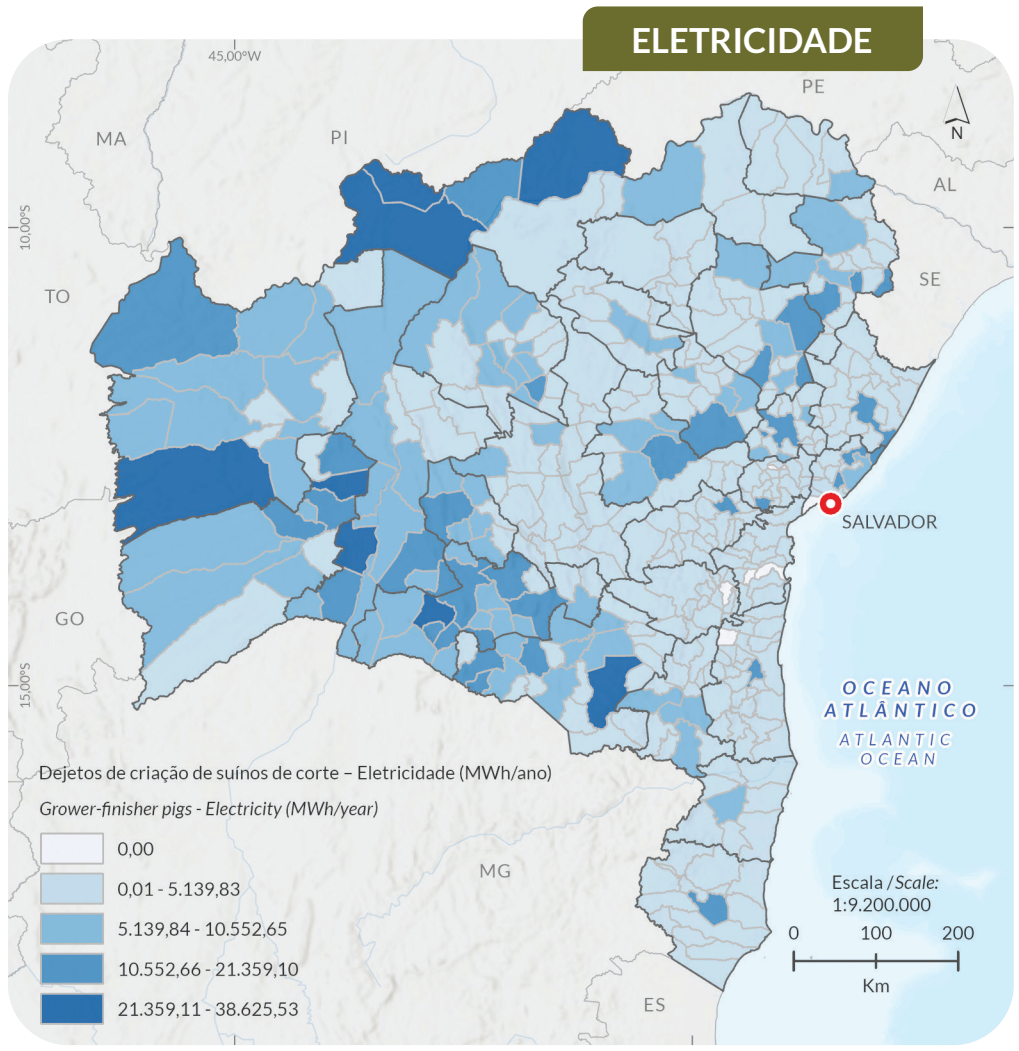
BIOGAS

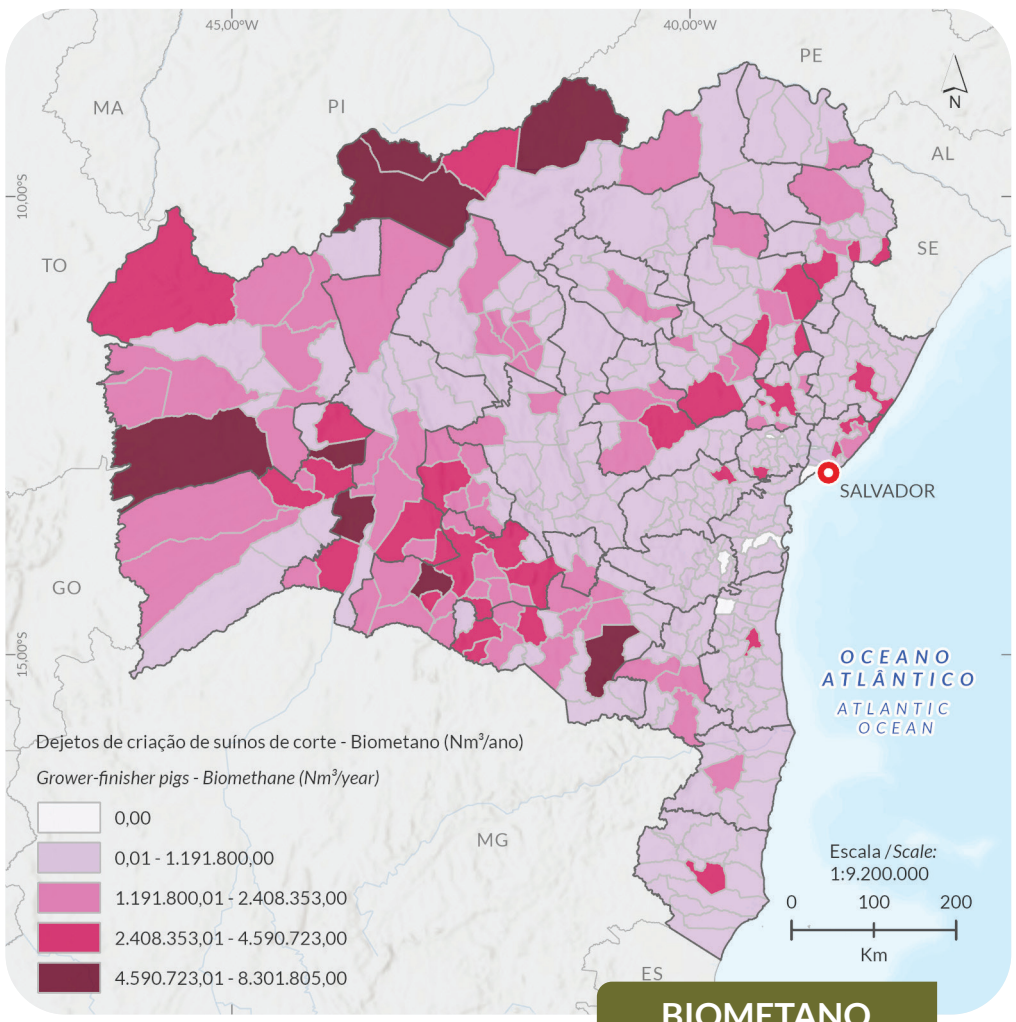
BIOGÁS



ELECTRICITY

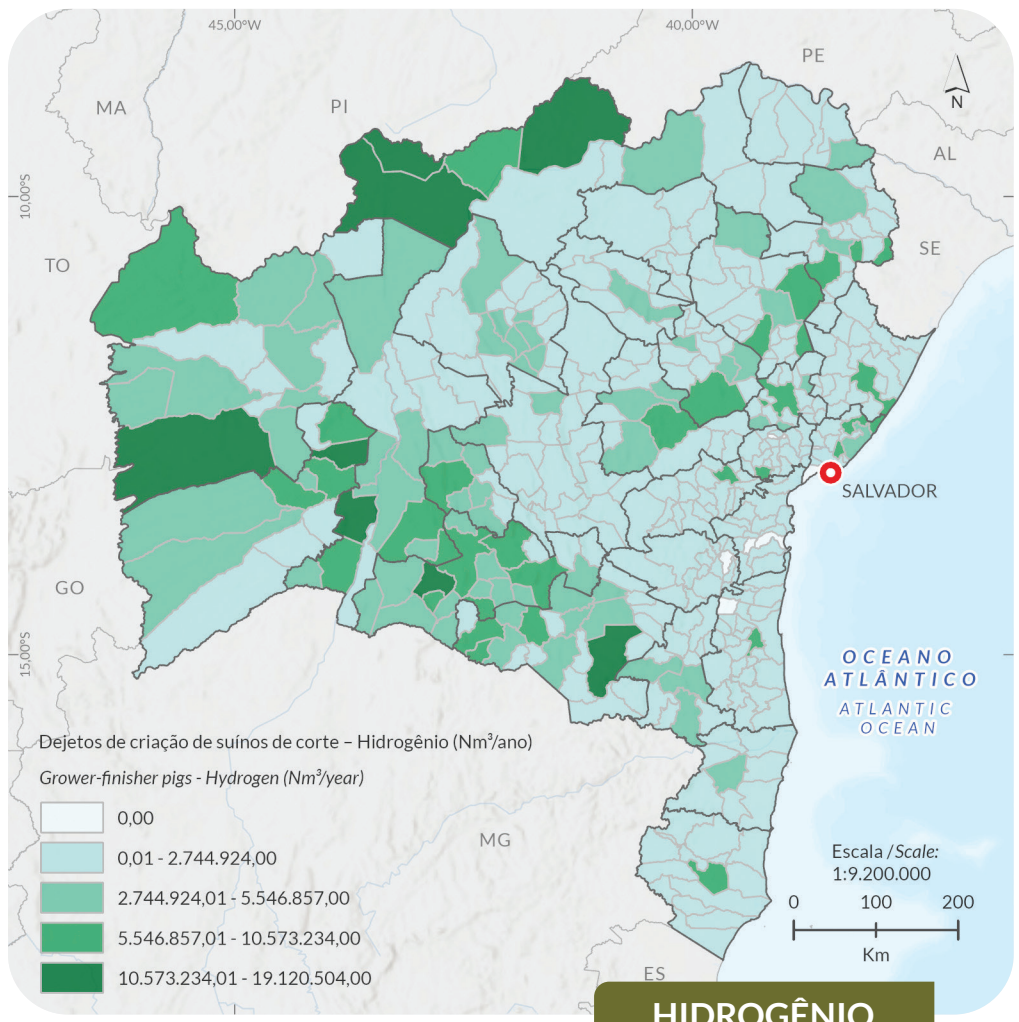
ELETRICIDADE





BIOMETANO

BIOMETHANE



HIDROGÊNIO

HYDROGEN

When converted to hydrogen and energy equivalence is achieved, utilizing the Higher Heating Value (HHV) of natural gas (39.5 MJ/m³) and hydrogen (12.7 MJ/m³), the potential of these municipalities corresponds to approximately 2.40% of the energy contained in the natural gas distributed in the State. Although this percentage is lower than that obtained for biomethane, the value is significant in the context of decentralized hydrogen production, with applications in strategic sectors such as transportation, industrial processes, and energy storage.

Geographically, there is a strong concentration in the São Francisco Backlands region, particularly in Pilão Arcado and Casa Nova, which together produce over 30 million Nm³/year of biogas. Other significant hubs include Vitória da Conquista, Serra do Ramalho, and Campo Alegre de Lourdes, which, due to their sheer volume, are priority areas for the implementation of regional-scale bioenergy projects. This distribution favors the establishment of integrated hubs for the processing, upgrading, and distribution of biomethane and hydrogen, optimizing logistics costs and increasing economic viability.

In addition to contributing to the security and diversification of the energy mix, the use of swine manure brings significant environmental and health benefits, such as reduced greenhouse gas emissions, odor mitigation, and a lower risk of water contamination. These advantages, combined with the potential for revenue generation and strengthening of local production chains, position the swine farming industry as a strategic driver of the energy transition and bioeconomy in the State.

8.4.4 ENERGY POTENTIAL FROM BREEDING SOWS MANURE

The municipalities with the ten highest technical potentials for biogas, biomethane, electricity, and hydrogen produced from breeding sows manure are presented in Table 8.5.

The municipalities with the ten highest technical potentials for producing biogas, biomethane, hydrogen, and electricity from swine manure are presented in Table 8.5. Together, these municipalities produce 2.3 million Nm³/year of biogas, 1.2 million Nm³/year of biomethane, 2.86 million Nm³/year of hydrogen (obtained from biomethane), and 4.8 GWh/year of electricity.

Considering Bahia's annual electricity consumption in 2024, estimated at 27.9 TWh/year (71), the electricity potential of these ten municipalities represents approximately 0.02% of the State total, reinforcing their ideal role for distributed generation and meeting local demands, especially in rural areas.

In the case of biomethane, when comparing the estimated volume with the annual distribution of natural gas in the State (1.8 billion Nm³/year, an average of 4.8 million Nm³/day), the combined potential of the ten municipalities is equivalent to 0.1% of the total. Although modest on a statewide scale, the volume is sufficient to continuously supply the natural gas consumption of the residential/commercial sector, which in 2024 represented only 1.2% of the total distributed in the State, in specific locations.

Além da contribuição para a segurança e diversificação da matriz energética, o aproveitamento dos dejetos suínos traz benefícios ambientais e sanitários relevantes, como redução de emissões de gases de efeito estufa, mitigação de odores e menor risco de contaminação hídrica. Tais vantagens, aliadas ao potencial de geração de receita e de fortalecimento das cadeias produtivas locais, posicionam a suinocultura de corte como um vetor estratégico da transição energética e da bioeconomia no Estado.

8.4.4 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS DEJETOS DE MATRIZES SUÍNAS

Os municípios com os dez maiores potenciais técnicos de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio produzidos a partir dos dejetos de suínos de corte, são apresentados na *Tabela 8.5*.

Os municípios com os dez maiores potenciais técnicos de produção de biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade a partir dos dejetos de matrizes suínas estão apresentados na *Tabela 8.5*. Juntos, esses municípios totalizam 2,30 milhões Nm³/ano de biogás, 1,24 milhão Nm³/ano de biometano, 2,86 milhões Nm³/ano de hidrogênio (obtido a partir do biometano) e 4,81 GWh/ano de eletricidade.

Considerando o consumo anual de energia elétrica da Bahia em 2024, estimado em 27,95 milhões MWh/ano [71], o potencial elétrico dos dez municípios representa cerca de 0,017% do total estadual, reforçando seu papel mais adequado para geração distribuída e atendimento de demandas locais, sobretudo em áreas rurais.

No caso do biometano, ao se comparar o volume estimado com a distribuição anual de gás natural no Estado (1,8 bilhão Nm³/ano, média de 4,8 milhões Nm³/dia), o potencial conjunto dos dez municípios equivale a 0,07% do total. Embora modesto em escala estadual, o volume é suficiente para suprir de forma contínua o consumo de gás natural do setor residencial/comercial, que em 2024 representou apenas 1,24% do total distribuído no Estado, em localidades específicas.

Para o hidrogênio, a comparação é feita com base energética, adotando o poder calorífico superior do gás natural (39,5 MJ/m³) e do hidrogênio (12,7 MJ/m³). Nessa equivalência, o potencial dos dez municípios corresponde a cerca de 0,05% da energia contida no gás natural distribuído na Bahia, sugerindo viabilidade para aplicações descentralizadas, como abastecimento de frotas cativas, uso em processos industriais regionais ou integração a microrredes.

Geograficamente, há destaque para o Litoral Sul, com liderança de Itabuna, e para o Sertão do São Francisco, que abriga polos como Pilão Arcado e Casa Nova. Municípios do Velho Chico, Sertão Produtivo e Bacia do Rio Corrente também figuram entre os principais, compondo uma distribuição territorial que favorece soluções de aproveitamento energético descentralizadas e integradas a arranjos produtivos locais.

Tabela 8.5 Municípios com os dez maiores potenciais técnicos de biogás, biometano e eletricidade produzidos a partir dos dejetos de matrizes de suínos.
Table 8.5 *Municipalities with the ten highest technical potentials for biogas, biomethane, and electricity produced from breeding sows manure.*

Território de identidade (TI) *Territory of Identity*	Município *Municipality*	Suínos Matrizes (Cabeças) *Breeding Sows (Heads)*	Biogás (Nm³/ano) *Biogas (Nm³/year)*	Biometano (Nm³/ano) *Biomethane (Nm³/year)*	Hidrogênio do Biometano (Nm³/ano) *Hydrogen from Biomethane (Nm³/year)*	Eletricidade (MWhano) *Electricity (MWh/year)*
Litoral Sul	Itabuna	7.320	535.660	289.257	666.208	1.122
Sertão do São Francisco	Pilão Arcado	4.061	297.174	160.474	369.600	622
Sertão do São Francisco	Casa Nova	3.225	235.998	127.439	293.514	494
Bacia do Rio Corrente	Serra Dourada	3.100	226.851	122.499	282.137	475
Sertão Produtivo	Guanambi	2.595	189.896	102.544	236.176	398
Velho Chico	Riacho de Santana	2.500	182.944	98.790	227.530	383
Sertão do São Francisco	Campo Alegre de Lourdes	2.335	170.870	92.270	212.513	358
Piemonte do Paraguaçu	Itaberaba	2.192	160.405	86.619	199.498	336
Velho Chico	Serra do Ramalho	2.110	154.405	83.379	192.035	323
Sertão do São Francisco	Remanso	1.975	144.526	78.044	179.749	303
TOTAL TOP 10		**31.413**	**2.298.729**	**1.241.314**	**2.858.962**	**4.813**
BAHIA		**171.534**	**12.552.452**	**6.778.324**	**15.611.662**	**26.281**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 8.4 / *Map 8.4*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DOS DEJETOS DE CRIAÇÃO DE MATRIZES SUÍNAS

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM BREEDING SOWS MANURE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

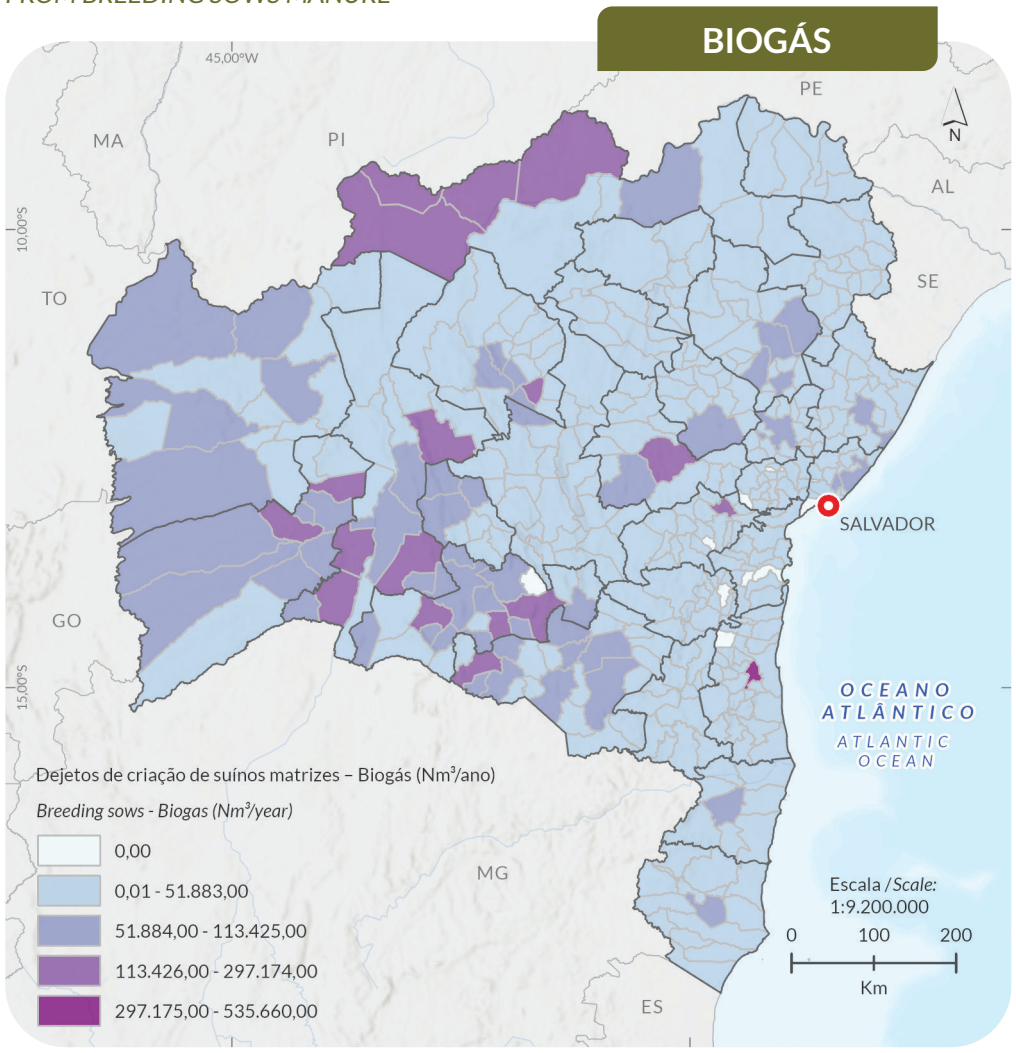
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

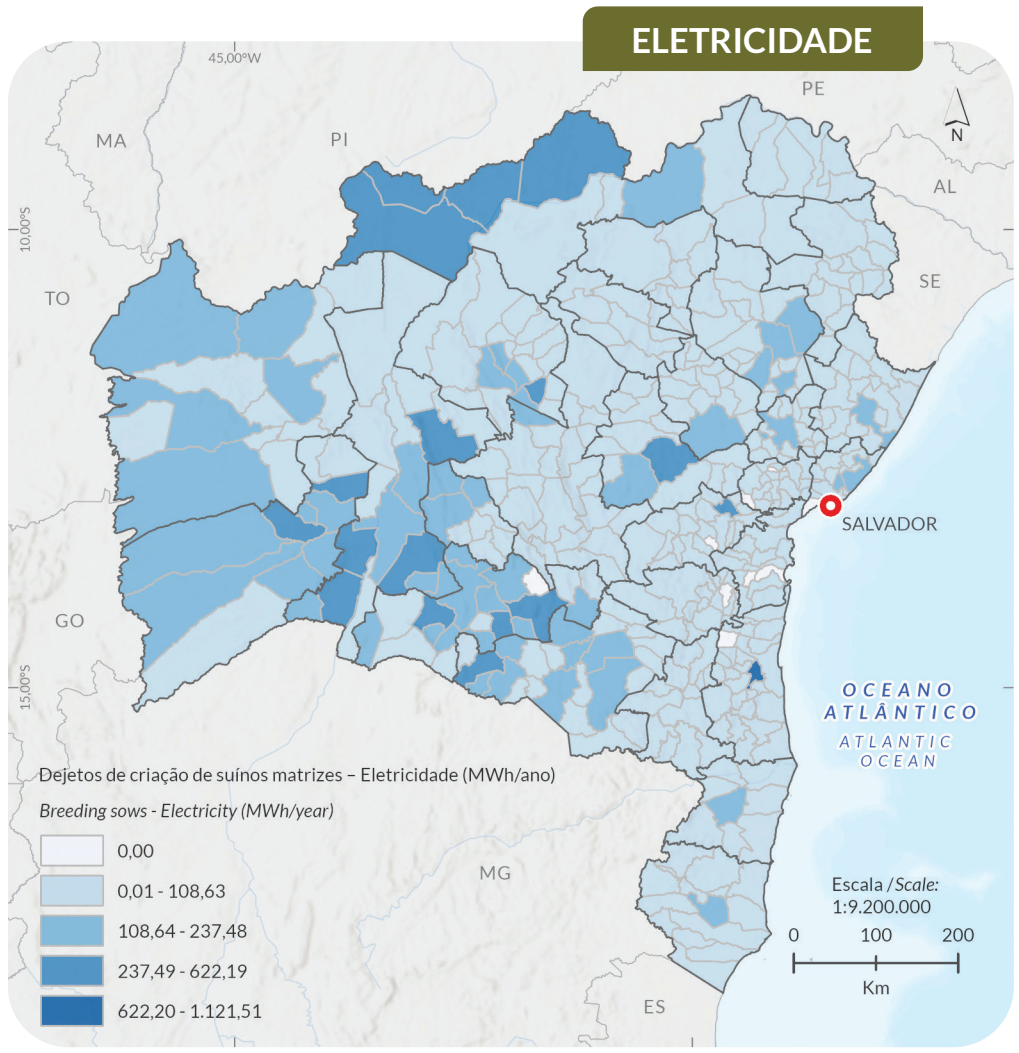
BIOGÁS

BIOGAS



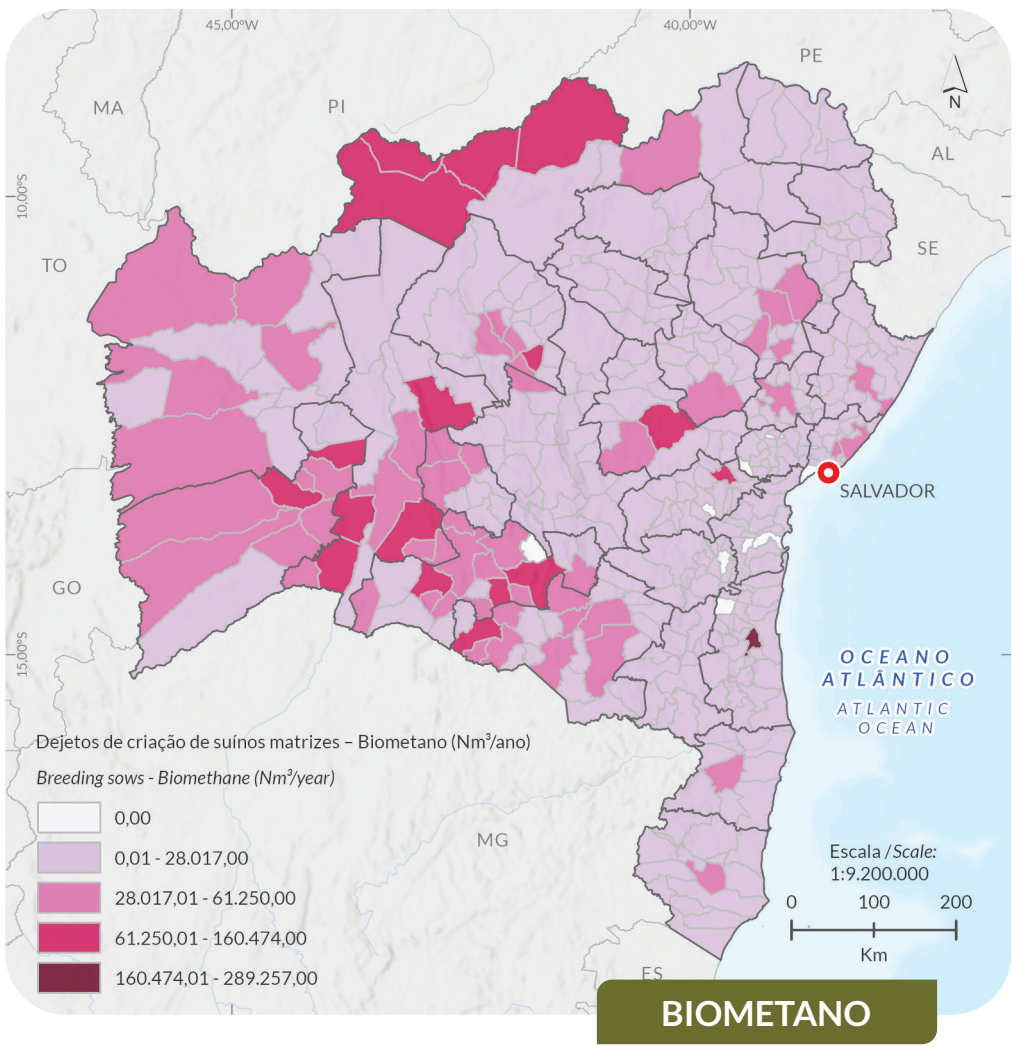
ELETRICIDADE

ELECTRICITY



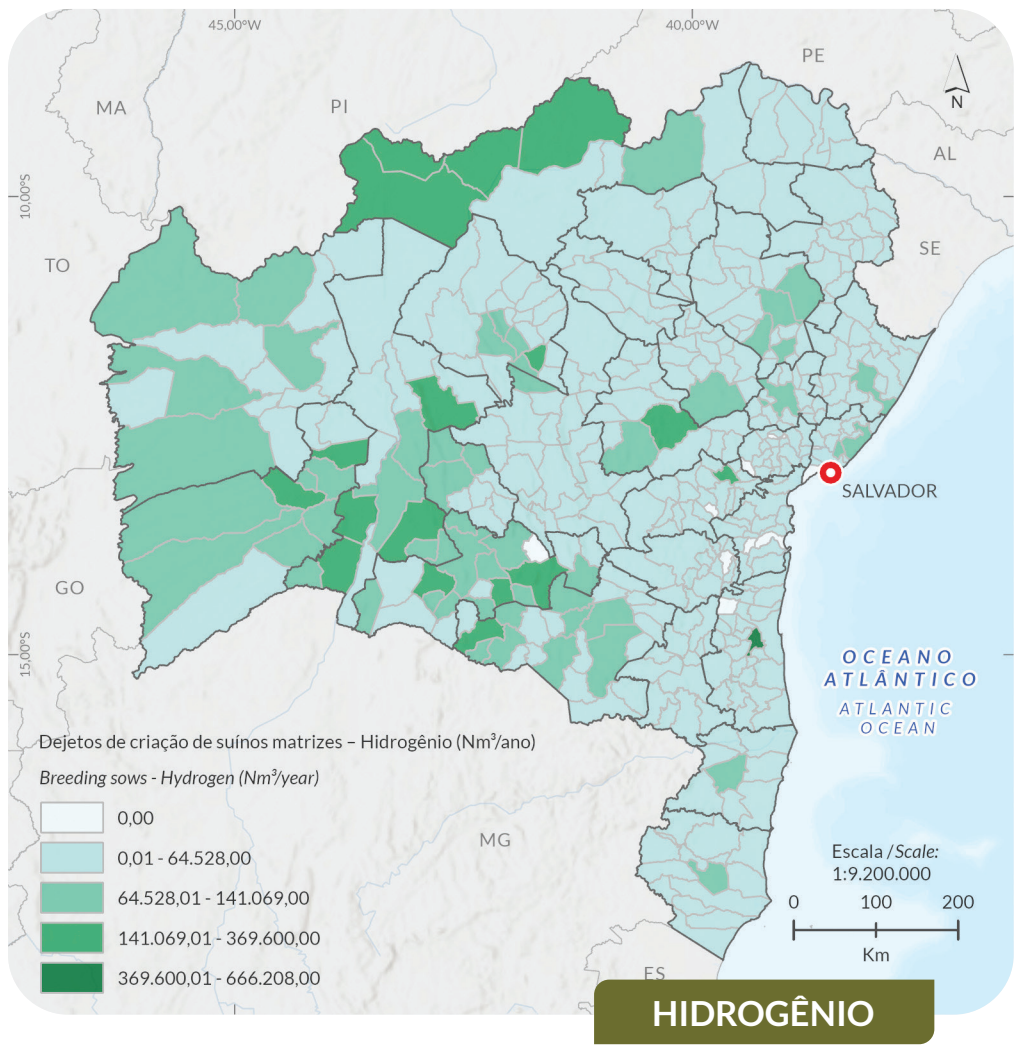
BIOMETANO

BIOMETHANE



HIDROGÊNIO

HYDROGEN



For hydrogen, the comparison is made on an energy basis, adopting the Higher Heating Value (HHV) of natural gas (39.5 MJ/m³) and hydrogen (12.7 MJ/m³). With this equivalence, the potential of the ten municipalities corresponds to approximately 0.05% of the energy contained in the natural gas distributed in Bahia, suggesting viability for decentralized applications, such as supplying captive fleets, use in regional industrial processes, or integration into microgrids.

Geographically, the Litoral Sul, led by Itabuna, and the Sertão do São Francisco home to hubs such as Pilão Arcado and Casa Nova, stand out. Municipalities in the Velho Chico, Sertão Produtivo, and Bacia do Rio Corrente are also among the main ones, forming a territorial distribution that favors decentralized energy solutions integrated with local production arrangements.

In addition to the energy aspect, the treatment and recovery of swine manure contributes to mitigating greenhouse gas emissions, controlling odors, and reducing the organic load released into water bodies. This reinforces the role of biodigestion technologies not only as energy generators but also as environmental management tools in swine farming. Thus, even though it represents a modest fraction of the State's energy mix, the energy harvesting of swine breeding sows has strategic relevance for small- and medium-scale projects aimed at local energy self-sufficiency, with economic, environmental, and social benefits for rural communities.

8.4.5 ENERGY POTENTIAL FROM BROILER BIRDS MANURE

The municipalities with the ten largest energy potentials for biogas, biomethane, hydrogen, and electricity produced from broiler birds manure are presented in Table 8.6.

The municipalities with the ten highest technical potentials for producing biogas, biomethane, hydrogen, and electricity from broiler manure are presented in Table 8.6. Together, these municipalities produce 5.4 million Nm³/year of biogas, 2.9 million Nm³/year of biomethane, 6.7 million Nm³/year of hydrogen (produced from biomethane), and 11.3 GWh/year of electricity.

The energy potential analysis was conducted considering Bahia's annual electricity consumption in 2024, estimated at 27.9 TWh/year [71], and the annual distribution of natural gas, approximately 1.8 billion Nm³/year (daily average of approximately 4.8 million Nm³/day). The residential/commercial sector accounted for only 1.24% of this volume in the reference year. For hydrogen, the comparison is made on an energy basis, considering the Higher Heating Value (HHV) of natural gas (39.5 MJ/m³) and hydrogen (12.7 MJ/m³).

Based on these parameters, the electrical potential of the ten municipalities represents approximately 0.04% of the state's annual electricity consumption, while the volume of biomethane is equivalent to 0.16% of the natural gas distributed. Hydrogen, in energy terms, corresponds to approximately 0.10% of the energy contained in the natural

Além do aspecto energético, o tratamento e valorização dos dejetos suínos contribuem para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa, o controle de odores e a diminuição da carga orgânica lançada em corpos hídricos. Isso reforça o papel das tecnologias de biodigestão não apenas como geradoras de energia, mas também como instrumentos de gestão ambiental na suinocultura. Assim, mesmo representando uma fração modesta da matriz estadual, o aproveitamento energético das matrizes suínas apresenta relevância estratégica para projetos de pequena e média escala, voltados à autossuficiência energética local, com benefícios econômicos, ambientais e sociais para as comunidades rurais.

8.4.5 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS DEJETOS DE AVICULTURA DE CORTE

Os municípios com os dez maiores potenciais energéticos de biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade produzidos a partir dos dejetos de aves de corte, são apresentados na *Tabela 8.6*.

Os municípios com os dez maiores potenciais técnicos de produção de biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade a partir dos dejetos de aves de corte estão apresentados na *Tabela 8.6*. Juntos, esses municípios somam 5,39 milhões Nm³/ano de biogás, 2,91 milhões Nm³/ano de biometano, 6,70 milhões Nm³/ano de hidrogênio (produzido a partir do biometano) e 11,29 GWh/ano de eletricidade.

A análise dos potenciais energéticos foi realizada considerando o consumo anual de energia elétrica na Bahia em 2024, estimado em 27,9 TWh/ano [71], e a distribuição anual de gás natural, de, aproximadamente, 1,8 bilhão Nm³/ano (média diária de cerca de 4,8 milhões Nm³/dia). O setor residencial/comercial respondeu por apenas 1,24% desse volume no ano de referência. Para o hidrogênio, a comparação é feita em base energética, considerando o poder calorífico superior (PCS) do gás natural (39,5 MJ/m³) e do hidrogênio (12,7 MJ/m³).

Com base nesses parâmetros, o potencial elétrico dos dez municípios representa cerca de 0,04% do consumo anual de energia elétrica no Estado, enquanto o volume de biometano equivale a 0,16% do gás natural distribuído. Já o hidrogênio, em termos energéticos, corresponde a aproximadamente 0,10% da energia contida no gás natural comercializado na Bahia. Esses percentuais indicam que, embora o impacto seja reduzido no contexto da matriz estadual, há potencial significativo para aplicações descentralizadas, especialmente no atendimento a demandas locais ou setoriais.

Do ponto de vista territorial, observa-se que os maiores potenciais de aproveitamento energético a partir dos dejetos de aves de corte concentram-se, principalmente, na Bacia do Rio Grande (com destaque para os municípios de Barreiras e Luís Eduardo Magalhães), e no Portal do Sertão (representada pelos municípios de Conceição da Feira, Feira de Santana, São Gonçalo dos Campos, Água Fria e Irará). Além desses polos, também se destacam municípios do Recôncavo (Varzedo e Santo Antônio de Jesus) e do Sudoeste Baiano (Vitória da Conquista). Essa distribuição espacial evidencia que o recurso pode ser explorado como alternativa energética estratégica em regiões com forte presença da avicultura, muitas vezes localizadas fora dos grandes centros de consumo e caracterizadas por infraestrutura energética limitada.

Tabela 8.6 Municípios com os dez maiores potenciais técnicos de biogás, biometano e eletricidade produzidos a partir dos dejetos de aves de corte.
Table 8.6 *Municipalities with the ten largest technical potentials for biogas, biomethane, and electricity produced from broiler birds manure.*

Território de identidade (TI) *Territory of Identity*	Município *Municipality*	Aves de Corte (Cabeças) *Broiler birds (Heads)*	Biogás (Nm³/ano) *Biogas (Nm³/year)*	Biometano (Nm³/ano) *Biomethane (Nm³/year)*	Hidrogênio do Biometano (Nm³/ano) *Hydrogen from Biomethane (Nm³/year)*	Eletricidade (MWhano) *Electricity (MWh/year)*
Bacia do Rio Grande	Barreiras	5.948.601	1.362.018	735.490	1.693.962	2.852
Portal do Sertão	Conceição da Feira	3.068.231	702.516	379.359	873.729	1.471
Bacia do Rio Grande	Luís Eduardo Magalhães	3.044.785	697.148	376.460	867.052	1.460
Sudoeste baiano	Vitória da Conquista	2.454.330	561.954	303.455	698.911	1.177
Portal do Sertão	Feira de Santana	1.995.122	456.812	246.679	568.144	956
Portal do Sertão	São Gonçalo dos Campos	1.955.348	447.705	241.761	556.817	937
Recôncavo	Varzedo	1.788.713	409.552	221.158	509.365	857
Portal do Sertão	Água Fria	1.441.485	330.049	178.226	410.486	691
Portal do Sertão	Irará	954.877	218.633	118.062	271.917	458
Recôncavo	Santo Antônio de Jesus	891.946	204.224	110.281	253.996	428
TOTAL TOP 10		**23.543.438**	**5.390.612**	**2.910.930**	**6.704.380**	**11.286**
BAHIA		**38.202.859**	**8.747.099**	**4.723.433**	**10.878.890**	**18.314**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 8.5 / *Map 8.5*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DOS DEJETOS DE CRIAÇÃO DE AVES DE CORTE

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM BROILER BIRDS MANURE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

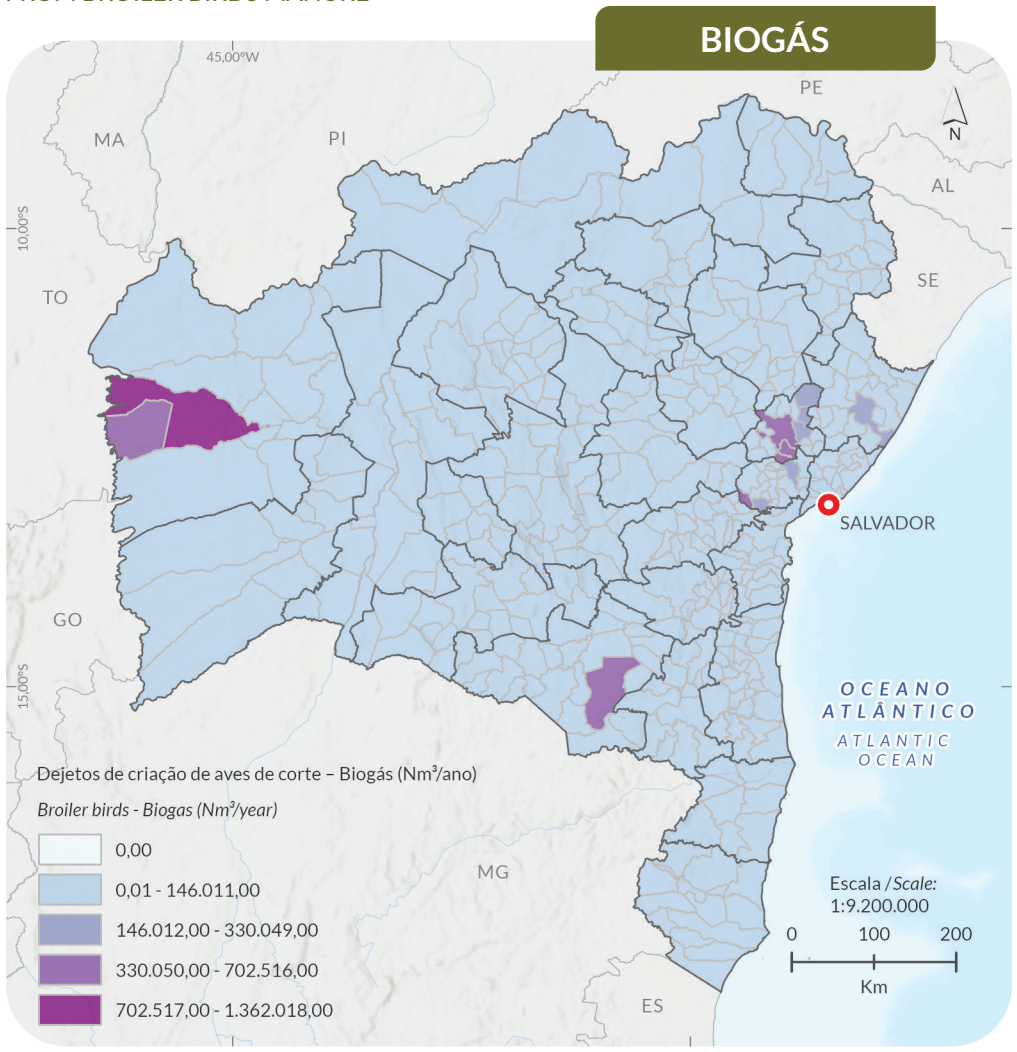
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

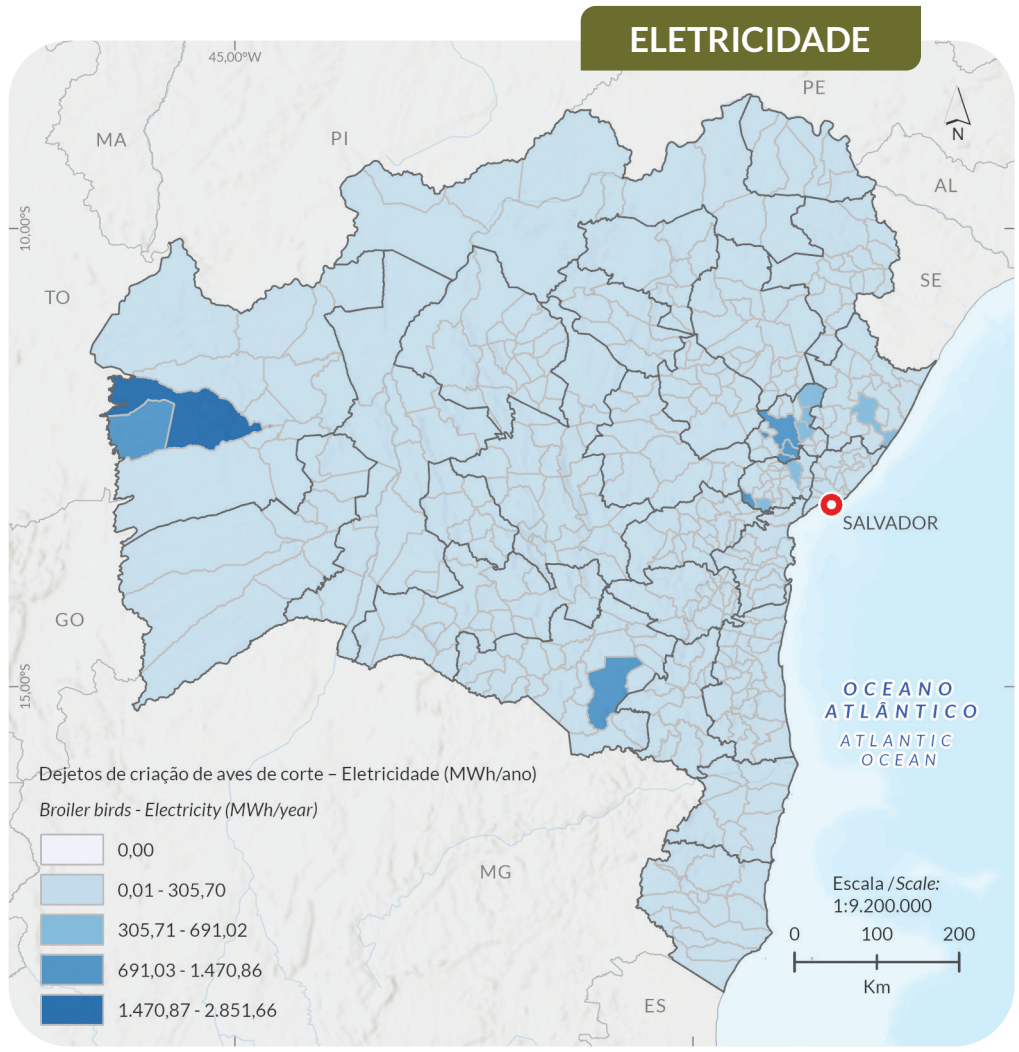
BIOGAS

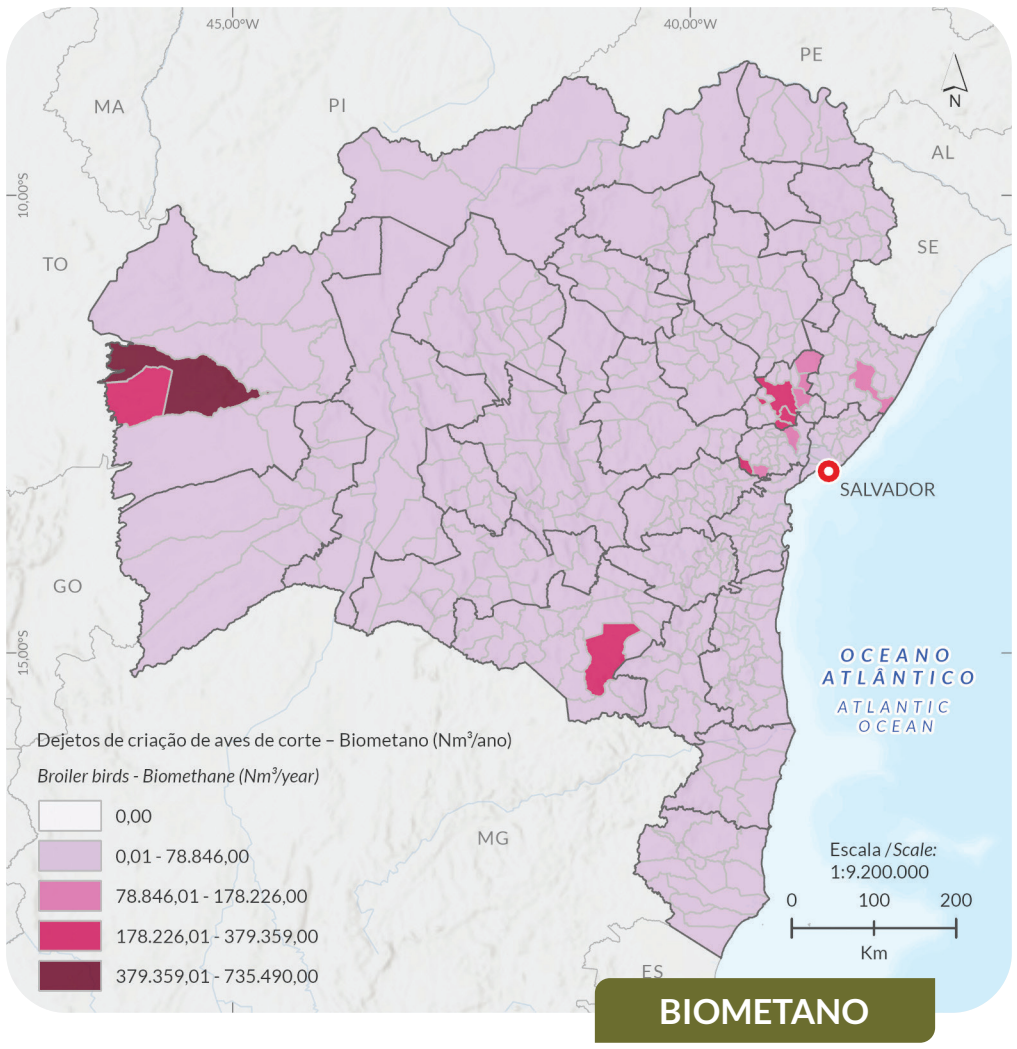
BIOGÁS



ELECTRICITY

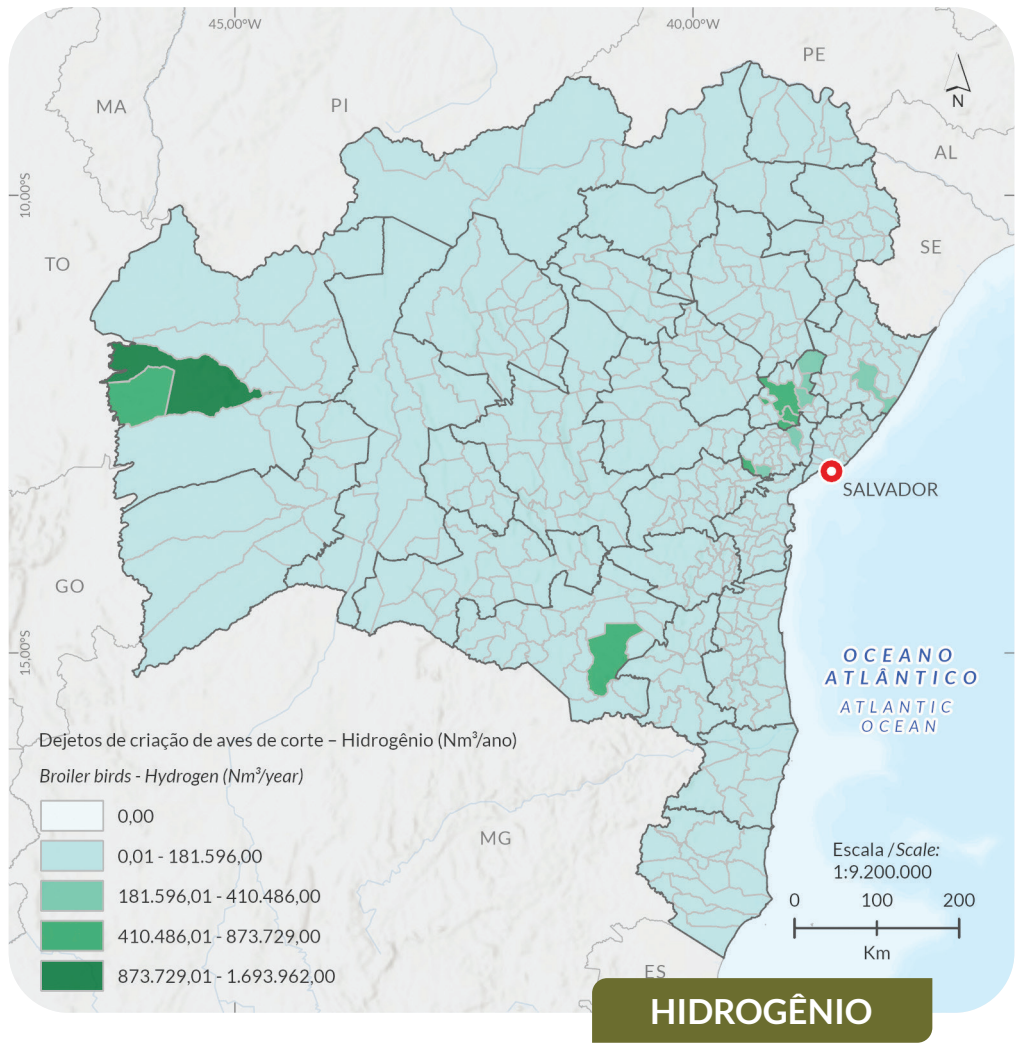
ELETRICIDADE





BIOMETHANE

BIOMETANO



HYDROGEN

HIDROGÊNIO

gas commercialized in Bahia. These percentages indicate that, although the impact is limited within the State's energy mix, there is significant potential for decentralized applications, especially to meet local or sectoral demands.

From a territorial perspective, the greatest potential for energy use from broiler manure is concentrated primarily in the Bacia do Rio Grande (especially the municipalities of Barreiras and Luís Eduardo Magalhães) and in the Portal do Sertão region (represented by the municipalities of Conceição da Feira, Feira de Santana, São Gonçalo dos Campos, Água Fria, and Irará). In addition to these centers, municipalities in the Recôncavo region (Varzedo and Santo Antônio de Jesus) and Sudoeste Baiano region (Vitória da Conquista) also stand out. This spatial distribution highlights that this resource can be explored as a strategic energy alternative in regions with a strong broilers presence, often located outside major consumption centers and characterized by limited energy infrastructure.

From an environmental perspective, the biodigestion of broiler manure contributes to mitigating greenhouse gas emissions, controlling odors, and reducing organic matter in soils and water bodies. Furthermore, the digestate generated can be used as biofertilizer, promoting more sustainable agricultural practices and adding value to the production chain.

Thus, although the global potential of broiler manure represents a modest fraction of Bahia's energy mix, its strategic use can generate significant economic, environmental, and social benefits, especially in rural areas with a strong broiler farming presence. The adoption of small- and medium-scale projects, implemented on broiler farms or cooperatives, can strengthen the circular economy, reduce dependence on external inputs, and boost sustainable regional development.

8.4.6 ENERGY POTENTIAL FROM LAYING HENS MANURE

The ten municipalities with the highest energy potential for producing biogas, biomethane, hydrogen, and electricity from laying hen waste are presented in Table 8.7

The ten municipalities with the highest energy potential for producing biogas, biomethane, hydrogen, and electricity from laying hen waste are presented in Table 8.7. Together, these municipalities produce 13.74 million Nm³/year of biogas, 7.4 million Nm³/year of biomethane, 17.1 million Nm³/year of hydrogen (produced from biomethane), and 28.8 GWh/year of electricity.

The analysis of energy potential was conducted using as a reference the annual electricity consumption in Bahia in 2024, estimated at 27.9 TWh/year [71], and the total volume of natural gas distributed in the state, approximately 1.8 billion Nm³/year (daily average of approximately 4.8 million Nm³/day). The residential/commercial sector accounted for only 1.2% of this volume. For hydrogen, the comparison is

Sob o ponto de vista ambiental, a biodigestão dos dejetos avícolas contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, o controle de odores e a redução da carga orgânica em solos e corpos hídricos. Além disso, o digestato gerado pode ser utilizado como biofertilizante, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e agregando valor à cadeia produtiva.

Assim, embora o potencial global dos resíduos de aves de corte represente uma fração modesta da matriz energética baiana, sua utilização estratégica pode gerar benefícios econômicos, ambientais e sociais relevantes, sobretudo em áreas rurais com forte presença da avicultura. A adoção de projetos de pequena e média escala, executados em propriedades avícolas ou cooperativas, pode fortalecer a economia circular, reduzir a dependência de insumos externos e impulsionar o desenvolvimento regional sustentável.

8.4.6 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS DEJETOS DE AVICULTURA DE POSTURA

Os dez municípios com os maiores potenciais energéticos para produção de biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade a partir dos resíduos da criação de aves de postura, são apresentados na *Tabela 8.7*.

Os dez municípios com os maiores potenciais energéticos para produção de biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade a partir dos resíduos da criação de aves de postura estão apresentados na *Tabela 8.7*. Juntos, esses municípios somam 13,74 milhões Nm³/ano de biogás, 7,42 milhões Nm³/ano de biometano, 17,09 milhões Nm³/ano de hidrogênio (produzido a partir do biometano) e 28,77 GWh/ano de eletricidade.

A análise dos potenciais energéticos foi feita considerando como referência o consumo anual de energia elétrica na Bahia em 2024, estimado em 27,9 TWh/ano [71], e o volume total de gás natural distribuído no Estado, de, aproximadamente, 1,8 bilhão Nm³/ano (média diária de cerca de 4,8 milhões Nm³/dia). O setor residencial/comercial respondeu por apenas 1,24% desse volume. Para o hidrogênio, a comparação é realizada em base energética, considerando o poder calorífico superior do gás natural (39,5 MJ/m³) e do hidrogênio (12,7 MJ/m³).

Em termos relativos, o potencial de biometano dos dez municípios líderes equivale a cerca de 0,41% do volume anual de gás natural distribuído na Bahia, enquanto o potencial elétrico representa aproximadamente 0,10% do consumo anual de energia elétrica do Estado. Já o hidrogênio obtido a partir desse biometano corresponderia a aproximadamente 0,30% da energia contida no gás natural distribuído.

A distribuição geográfica dos maiores potenciais mostra concentração em regiões como a Costa do Descobrimento (Eunápolis), Bacia do Rio Grande (Barreiras e Luís Eduardo Magalhães), Litoral Norte e Agreste Baiano (Entre Rios), além de polos no Recôncavo, Semiárido Nordeste II e Portal do Sertão. Essa diversidade territorial abre oportunidades para a execução de projetos de bioenergia tanto em áreas com alta densidade produtiva quanto em regiões estratégicas para a interiorização do fornecimento de energia renovável.

Tabela 8.7 Municípios com os dez maiores potenciais técnicos de biogás, biometano e eletricidade produzidos a partir dos dejetos de aves de postura.
Table 8.7 *Municipalities with the ten highest technical potential for biogas, biomethane, and electricity produced from laying hens manure.*

Território de identidade (TI) *Territory of Identity*	Município *Municipality*	Aves Postura (Cabeças) *Laying Hens (Heads)*	Biogás (Nm³/ano) *Biogas (Nm³/year)*	Biometano (Nm³/ano) *Biomethane (Nm³/year)*	Hidrogênio do Biometano (Nm³/ano) *Hydrogen from Biomethane (Nm³/year)*	Eletricidade (MWhano) *Electricity (MWh/year)*
Costa do Descobrimento	Eunápolis	1.004.682	3.846.800	2.077.272	4.784.319	9.665
Bacia do Rio Grande	Barreiras	563.420	2.157.264	1.164.922	2.683.019	5.420
Litoral Norte e Agreste baiano	Entre Rios	526.260	2.014.983	1.088.091	2.506.062	5.063
Recôncavo	Sapeaçu	260.319	996.728	538.233	1.239.645	2.087
Semiárido Nordeste II	Ribeira do Pombal	231.000	884.470	477.614	1.100.027	1.852
Itaparica	Glória	203.112	777.690	419.953	967.224	1.628
Portal do Sertão	Conceição do Jacuípe	191.307	732.490	395.545	911.008	1.534
Sudoeste baiano	Vitória da Conquista	164.670	630.500	340.470	784.162	1.320
Portal do Sertão	Água Fria	164.361	629.317	339.831	782.691	1.318
Bacia do Rio Grande	Luís Eduardo Magalhães	145.964	558.878	301.794	695.084	1.170
TOTAL TOP 10		**3.455.095**	**13.229.119**	**7.143.724**	**16.453.242**	**31.056**
BAHIA		**7.609.795**	**29.136.937**	**15.733.946**	**36.238.019**	**61.004**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 8.6 / *Map 8.6*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DOS DEJETOS DE CRIAÇÃO DE AVES POEDEIRAS

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM LAYING HENS MANURE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

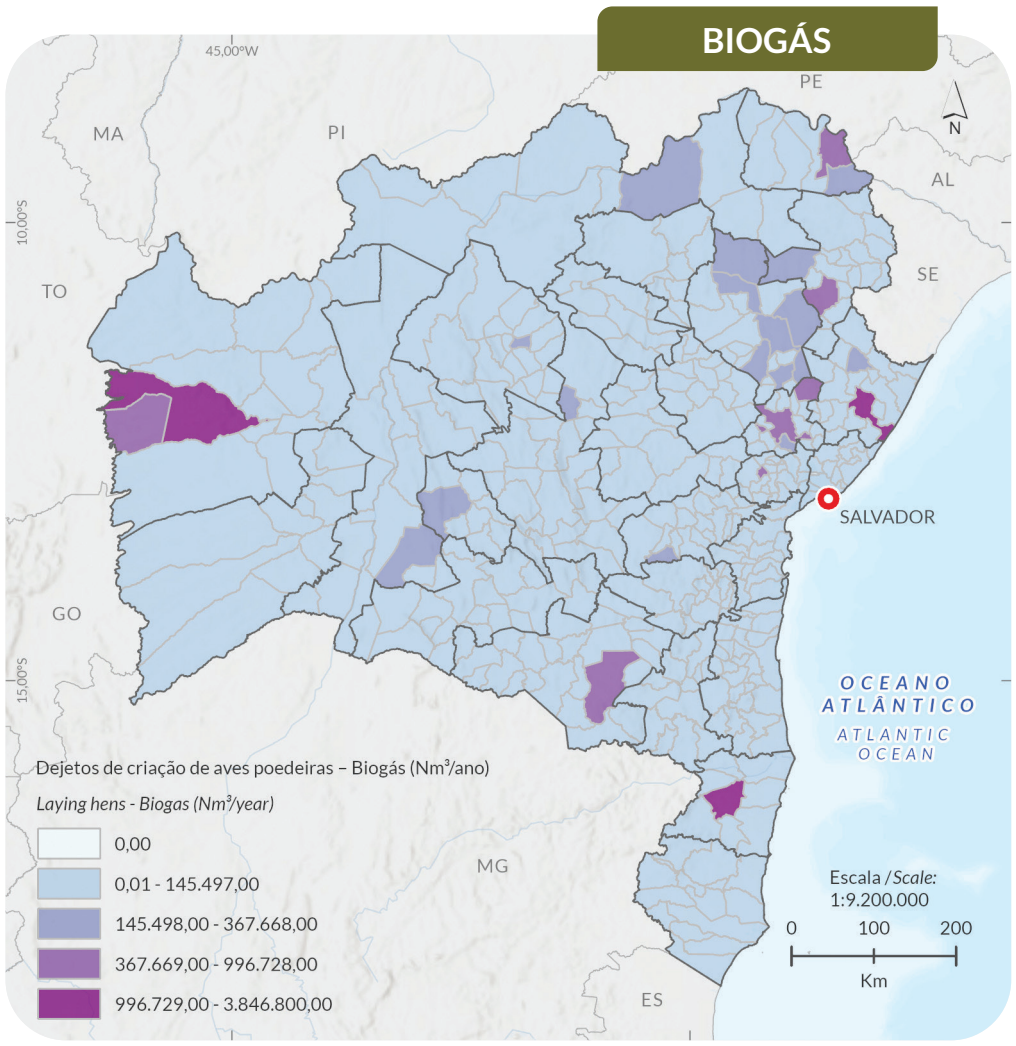
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

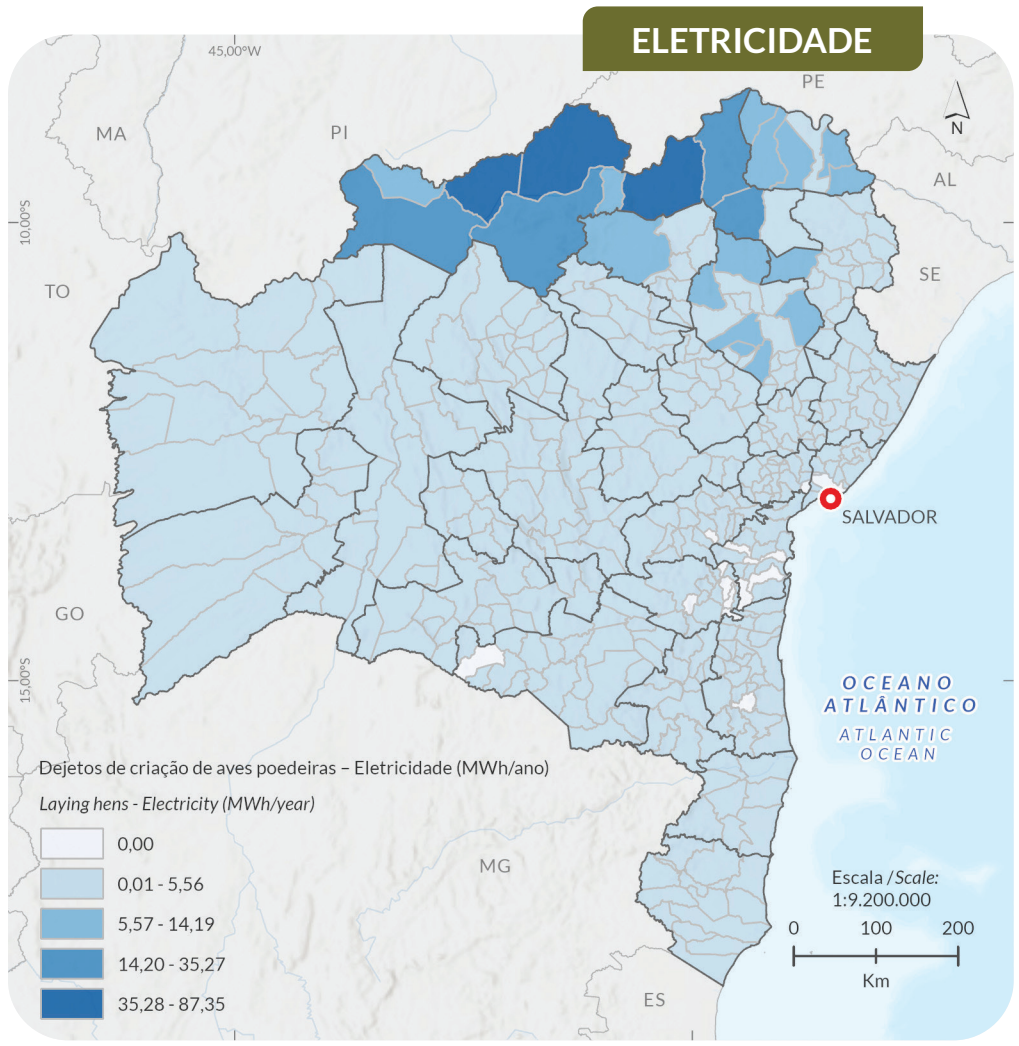
BIOGAS

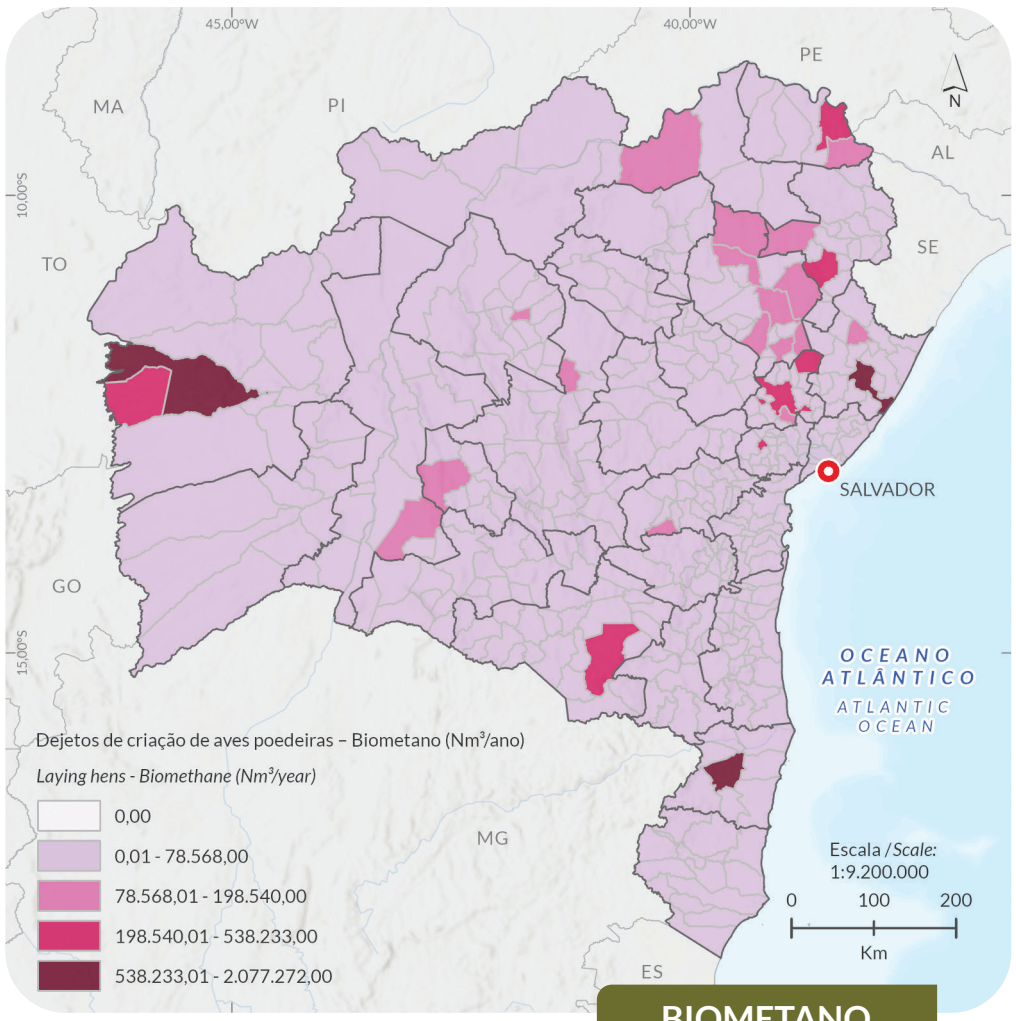
BIOGÁS



ELECTRICITY

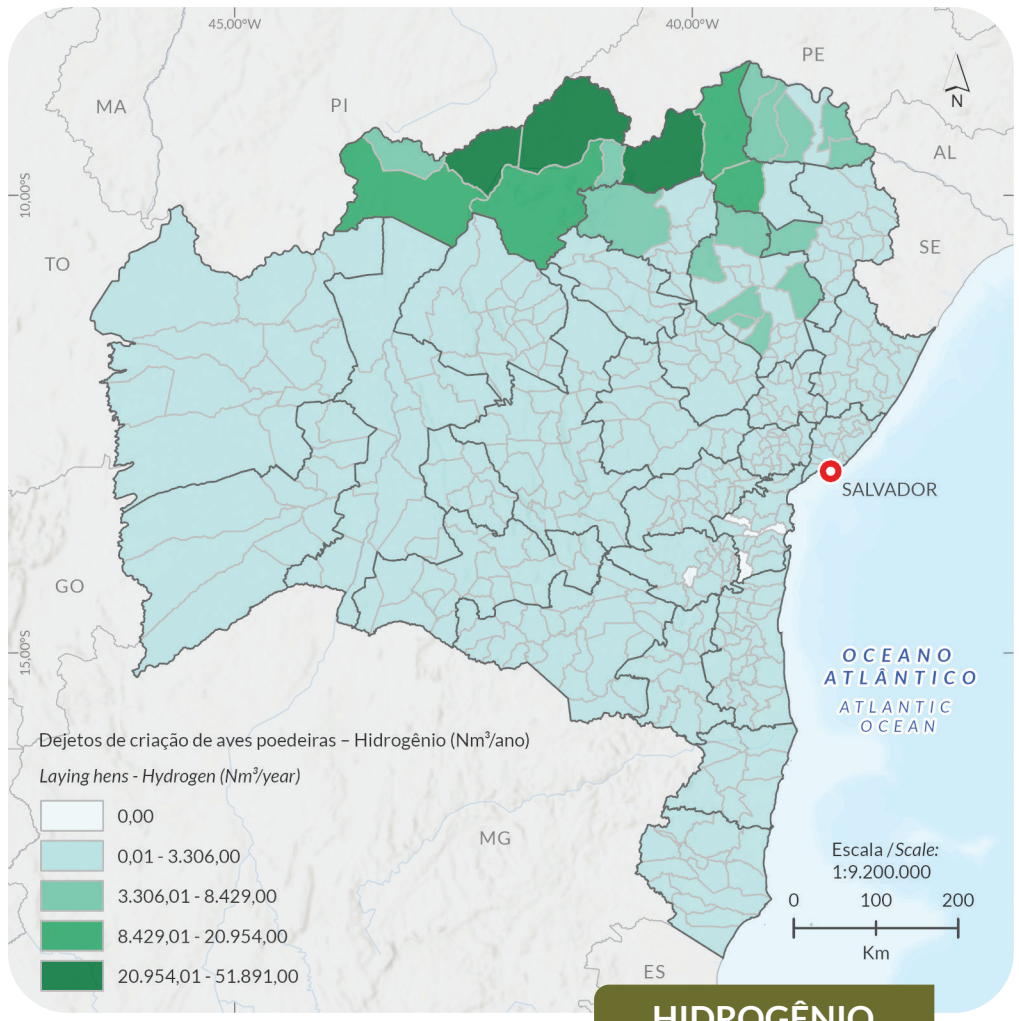
ELETRICIDADE





BIOMETHANE

BIOMETANO



HYDROGEN

HIDROGÊNIO

made on an energy basis, considering the Higher Heating Value (HHV) of natural gas (39.5 MJ/m³) and hydrogen (12.7 MJ/m³).

In relative terms, the biomethane potential of the ten leading municipalities is equivalent to approximately 0.4% of the annual volume of natural gas distributed in Bahia, while the electrical potential represents approximately 0.1% of the State's annual electricity consumption. The hydrogen obtained from this biomethane would correspond to approximately 0.3% of the energy contained in the distributed natural gas.

The geographic distribution of the greatest potential shows concentration in regions such as the Costa do Descobrimento (Eunápolis), the Bacia do Rio Grande (Barreiras and Luís Eduardo Magalhães), the North Coast and Agreste region of Bahia (Entre Rios), as well as hubs in the Recôncavo, Semiárido Nordeste II, and Portal do Sertão regions. This territorial diversity opens up opportunities for the implementation of bioenergy projects both in areas with high production density and in strategic regions for the interiorization of renewable energy supply.

From an environmental perspective, the recovery of laying hen residue through biodigestion contributes to mitigating greenhouse gas emissions, controlling odors, and preventing soil and water contamination. The digestate generated in the process can be used as biofertilizer, reinforcing the integration between energy production and agriculture and strengthening the principles of the circular economy.

Thus, despite its relative weight being lower compared to sectors such as cattle or swine farming, laying hen farming consistently contributes to the diversification of Bahia's energy mix. Investments in local or cooperative projects can maximize this potential, generating significant economic, environmental, and social benefits, especially in rural communities and poultry hubs.

8.4.7 ENERGY POTENTIAL FROM GOAT FARMING MANURE

The figures presented in Table 8.8 highlight the ten municipalities with the greatest potential for biogas, biomethane, electricity, and hydrogen from goat manure, highlighting production hubs capable of leveraging energy projects and stimulating local production chains.

The analysis of the energy potential from goat manure in Bahia highlights the relevance of this livestock segment, especially in semiarid regions such as the São Francisco Backlands and the Itaparica regions, which contain the ten municipalities with the highest estimated volumes, as shown in Table 8.8. Together, these municipalities produce 20.1 million Nm³/year of biogas, 10.8 million Nm³/year of biomethane, 24.95 million Nm³/year of hydrogen (produced from biomethane), and 48.8 GWh/year of electricity.

In relative terms, biomethane from goat waste would represent approximately 0.60% of the volume of natural gas distributed annually in Bahia, while electricity derived from biogas would correspond to ap-

Do ponto de vista ambiental, a valorização dos dejetos das aves de postura por meio da biodigestão contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, o controle de odores e a prevenção da contaminação de solos e recursos hídricos. O digestato gerado no processo pode ser aproveitado como biofertilizante, reforçando a integração entre produção de energia e agricultura e fortalecendo os princípios da economia circular.

Assim, mesmo com menor peso relativo quando comparada a cadeias como a bovinocultura ou a suinocultura, a avicultura de postura apresenta contribuição consistente para a diversificação da matriz energética baiana. Investimentos em projetos locais ou cooperativos podem maximizar esse potencial, gerando benefícios econômicos, ambientais e sociais relevantes, especialmente em comunidades rurais e polos avícolas.

8.4.7 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS DEJETOS DA CAPRINOCULTURA

Os números apresentados na *Tabela 8.8* evidencia os dez municípios com maiores potenciais para biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio provenientes dos dejetos de caprinos, destacando polos produtivos capazes de alavancar projetos de aproveitamento energético e estimular cadeias produtivas locais.

A análise do potencial energético proveniente dos dejetos de caprinos na Bahia evidencia a relevância desse segmento pecuário, sobretudo em regiões semiáridas, como o Sertão do São Francisco e o território de Itaparica, que concentram os dez municípios com maiores volumes estimados, conforme apresentados na *Tabela 8.8*. Juntos, esses municípios somam 20,06 milhões Nm³/ano de biogás, 10,83 milhões Nm³/ano de biometano, 24,95 milhões Nm³/ano de hidrogênio (produzido a partir do biometano) e 48,76 GWh/ano de eletricidade.

Em termos relativos, o biometano oriundo dos resíduos caprinos representaria cerca de 0,60% do volume de gás natural distribuído anualmente na Bahia, enquanto a eletricidade derivada do biogás corresponderia a aproximadamente 0,17% do consumo estadual estimado para 2024 (27,95 milhões de MWh/ano). Já o hidrogênio, considerando a equivalência energética, alcançaria cerca de 0,04% do consumo anual de gás natural no Estado. Embora esses percentuais possam parecer modestos frente ao total da matriz energética estadual, eles ganham relevância quando considerados no contexto da geração descentralizada, especialmente em áreas de baixa cobertura de infraestrutura energética.

A expressiva concentração geográfica do potencial, com destaque para municípios como Casa Nova, Juazeiro e Curaçá, no Sertão do São Francisco, e Macururé, Abaré e Chorrochó, no território de Itaparica, reforça a viabilidade de instalação de polos regionais de bioenergia articulados às cadeias produtivas locais. Esses polos poderiam gerar não apenas energia, mas também biofertilizantes a partir do digestato, fortalecendo sistemas agropecuários mais sustentáveis e alinhados à economia circular.

Tabela 8.8 Municípios com os dez maiores potenciais técnicos de biogás, biometano e eletricidade produzidos a partir dos dejetos de caprinos.
Table 8.8 *Municipalities with the ten greatest technical potential for biogas, biomethane, and electricity produced from goat manure.*

Território de identidade (TI) *Territory of Identity*	Município *Municipality*	Caprinos (Cabeças) *Goats (Heads)*	Biogás (Nm³/ano) *Biogas (Nm³/year)*	Biometano (Nm³/ano) *Biomethane (Nm³/year)*	Hidrogênio do Biometano (Nm³/ano) *Hydrogen from Biomethane (Nm³/year)*	Eletricidade (MWhano) *Electricity (MWh/year)*
Sertão do São Francisco	Casa Nova	725.125	9.205.607	6.137.071	14.134.744	23.129
Sertão do São Francisco	Juazeiro	371.178	4.712.179	3.141.453	7.235.313	11.839
Sertão do São Francisco	Curaçá	338.283	4.294.570	2.863.047	6.594.096	10.790
Sertão do São Francisco	Pilão Arcado	246.749	3.132.528	2.088.352	4.809.838	7.870
Sertão do São Francisco	Remanso	225.421	2.861.765	1.907.843	4.394.095	7.190
Sertão do São Francisco	Uauá	209.509	2.659.759	1.773.172	4.083.925	6.682
Sertão do São Francisco	Sento Sé	171.345	2.175.259	1.450.173	3.340.000	5.465
Itaparica	Macururé	123.907	1.573.024	1.048.683	2.415.299	3.952
Itaparica	Abaré	116.677	1.481.238	987.492	2.274.366	3.101
Itaparica	Chorrochó	105.915	1.344.612	896.408	2.064.584	2.815
TOTAL TOP 10		**2.634.109**	**33.440.540**	**22.293.693**	**51.346.261**	**82.834**
BAHIA		**3.955.274**	**50.212.994**	**33.475.329**	**77.099.517**	**117.951**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 8.7 / *Map 8.7*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DOS DEJETOS DE CRIAÇÃO DE CAPRINOS

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM GOATS MANURE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

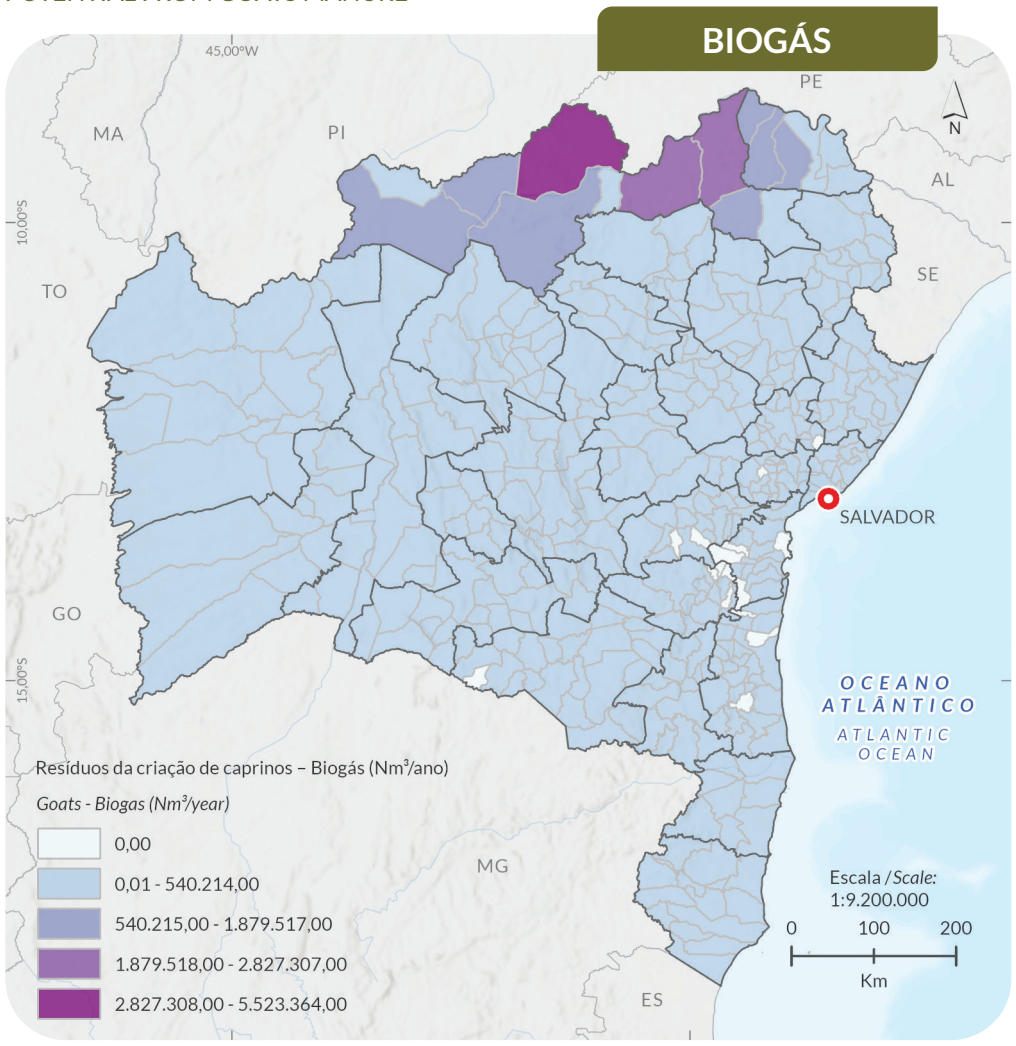
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

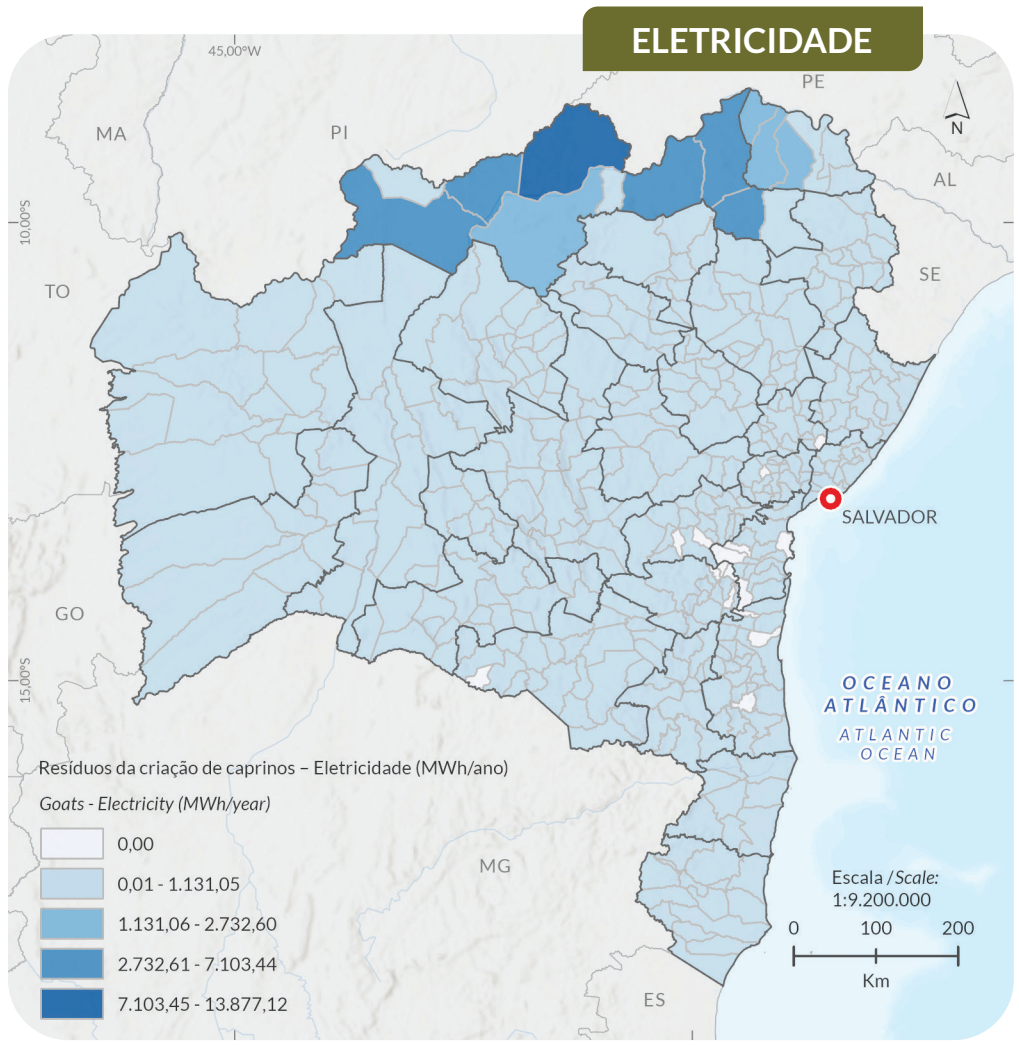
BIOGAS

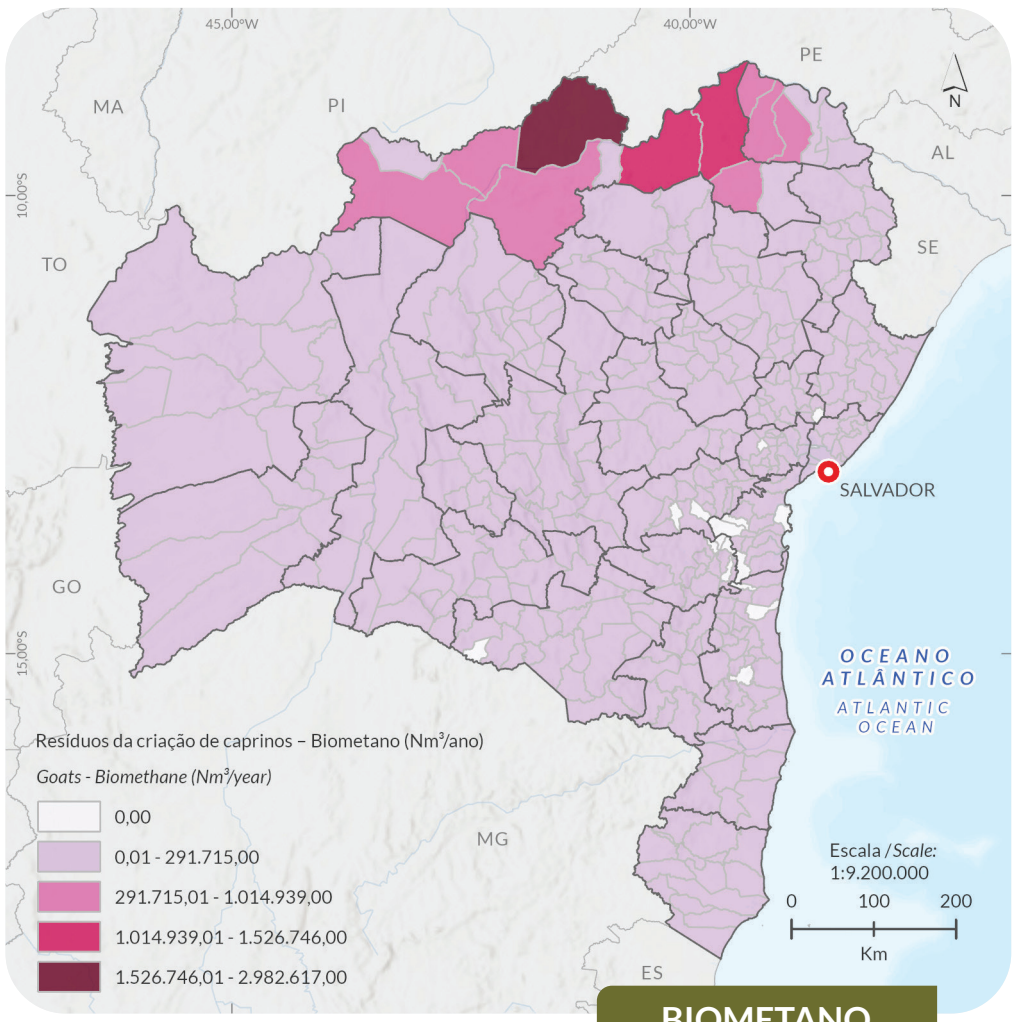
BIOGÁS



ELECTRICITY

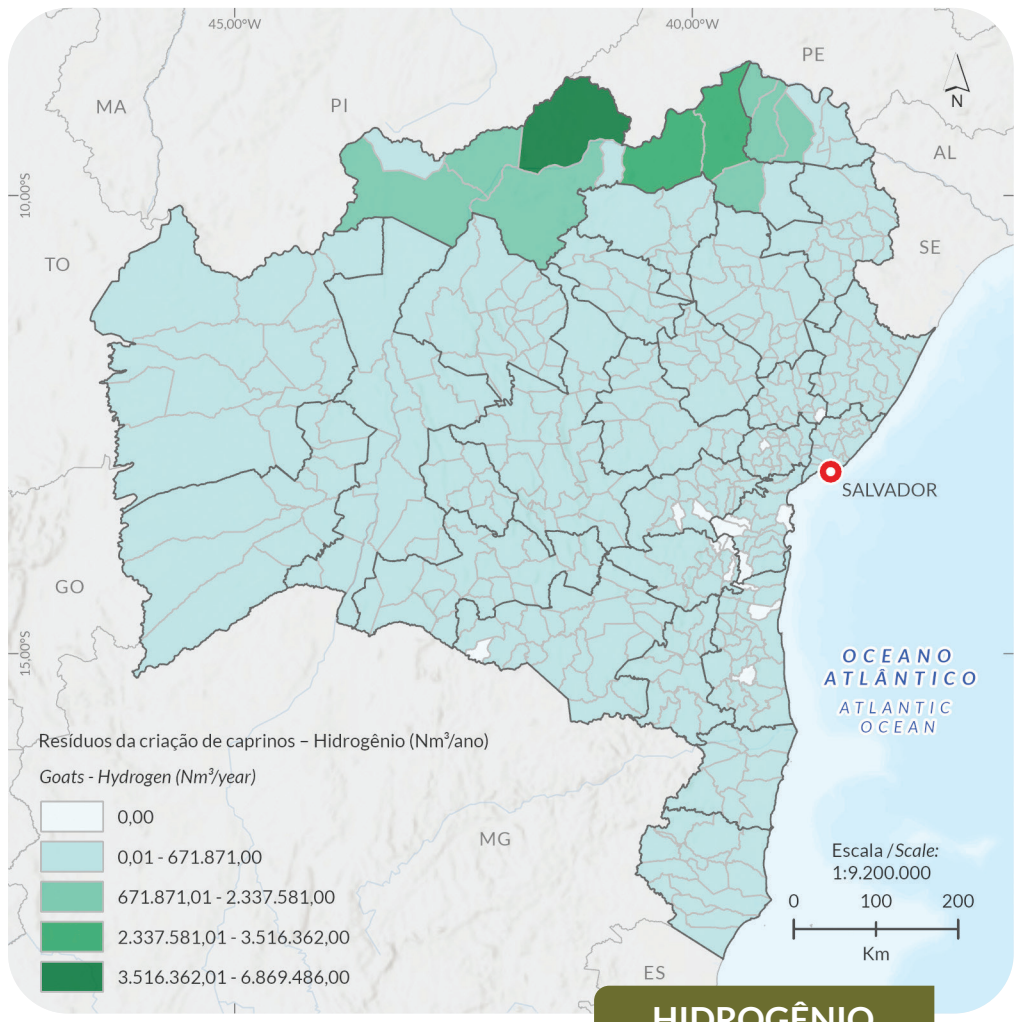
ELETRICIDADE





BIOMETHANE

BIOMETANO



HYDROGEN

HIDROGÊNIO

proximately 0.2% of the state's estimated consumption for 2024 (27.9 TWh/year). Hydrogen, considering energy equivalence, would account for approximately 0.04% of the State's annual natural gas consumption. While these percentages may seem modest compared to the State's total energy mix, they gain relevance when considered in the context of decentralized generation, especially in areas with limited energy infrastructure coverage.

The significant geographic concentration of potential, particularly in municipalities such as Casa Nova, Juazeiro, and Curaçá in the Sertão do São Francisco region, and Macururé, Abaré, and Chorrochó in the Itaparica region, reinforces the feasibility of establishing regional bioenergy hubs linked to local production chains. These hubs could generate not only energy but also biofertilizers from digestate, strengthening more sustainable agricultural systems aligned with the circular economy.

In addition to environmental benefits, such as reducing methane emissions and mitigating impacts on water resources, the energy use of goat waste can represent a strategic economic opportunity for rural communities in the semiarid region, historically more vulnerable to fluctuations in income and resource availability. Cooperative or associative projects can scale up and make energy conversion economically viable, also promoting local technical training and stimulating innovation in the use of bioenergy in the backlands of Bahia.

8.4.8 ENERGY POTENTIAL FROM SHEEP FARMING MANURE

The figures presented in Table 8.9 highlight the ten municipalities with the greatest potential for biogas, biomethane, electricity, and hydrogen from sheep manure, indicating the Sertão do São Francisco Identity Territory as a hub capable of promoting local initiatives to generate energy from manure.

An assessment of the energy potential from sheep manure in Bahia reveals a very small share of this segment in the state's energy mix. Despite the substantial herd estimated at 5 million head, the volume of waste capable of energy use results in approximately 317,000 Nm³/year of biogas, 171,000 Nm³/year of biomethane, 394,000 Nm³/year of hydrogen, and approximately 664 MWh/year of electricity.

Regarding the ten municipalities with the largest estimated volumes, as shown in Table 8.9, these municipalities together produce 164,440 Nm³/year of biogas, 88,800 Nm³/year of biomethane, 204,500 Nm³/year of hydrogen (produced from biomethane), and 344 MWh/year of electricity.

When compared to the reference values for 2024 (estimated electricity consumption of 27.9 TMWh/year and a total volume of natural gas distributed of approximately 1.8 billion m³/year), these figures represent fractions of less than 0.01% for both biomethane and electricity. Hydrogen, calculated based on the Higher Heating Value (HHV) of

Além dos benefícios ambientais, como a redução das emissões de metano e a mitigação de impactos sobre recursos hídricos, o aproveitamento energético dos resíduos caprinos pode representar uma oportunidade econômica estratégica para comunidades rurais do semiárido, historicamente mais vulneráveis a oscilações de renda e disponibilidade de recursos. Projetos cooperativos ou associativos podem ampliar a escala e viabilizar economicamente a conversão energética, promovendo também capacitação técnica local e estimulando a inovação no uso de bioenergia no sertão baiano.

8.4.8 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS DEJETOS DA OVINOCULTURA

Os números apresentados na *Tabela 8.9* evidenciam os dez municípios com maiores potenciais para biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio provenientes dos dejetos de ovinos, indicando o Território de Identidade Sertão do São Francisco como um polo com capacidade para promover iniciativas locais de valorização energética dos dejetos.

A avaliação do potencial energético proveniente dos dejetos de ovinos na Bahia evidencia uma participação bastante reduzida desse segmento na matriz energética estadual. Apesar do expressivo rebanho estimado em 5 milhões de cabeças, o volume de resíduos passível de aproveitamento energético resulta em cerca de 317 mil Nm³/ano de biogás, 171 mil Nm³/ano de biometano, 394 mil Nm³/ano de hidrogênio e, aproximadamente, 664 MWh/ano de eletricidade.

Em relação aos dez municípios com maiores volumes estimados, conforme apresentados na Tabela 8.9, juntos, esses municípios somam 164,44 mil Nm³/ano de biogás, 88,80 mil Nm³/ano de biometano, 204,5 mil Nm³/ano de hidrogênio (produzido a partir do biometano) e 344 MWh/ano de eletricidade.

Quando comparados aos valores de referência para o ano de 2024 (consumo de energia elétrica estimado em 27,9TWh/ano e volume total de gás natural distribuído de, aproximadamente, 1,8 bilhão de m³/ano), esses números representam frações inferiores a 0,01%, tanto para o biometano quanto para a eletricidade. O hidrogênio, calculado com base no poder calorífico superior do gás natural (39,5 MJ/m³) e do hidrogênio (12,7 MJ/m³), também se situa na mesma ordem de grandeza, reforçando que, em termos quantitativos, a contribuição do segmento ovino para a matriz energética estadual é marginal.

Ainda assim, a análise espacial dos dados *(Tabela 8.9)* revela que o Sertão do São Francisco concentra a maior parte do potencial identificado, reunindo municípios como Casa Nova, Juazeiro, Remanso, Curaçá, Uauá, Pilão Arcado e Sento Sé entre os dez maiores valores estimados. Essa concentração geográfica cria condições favoráveis para a implementação de projetos regionais ou cooperativos de bioenergia, capazes de agregar escala, reduzir custos e viabilizar economicamente a conversão dos resíduos em energia.

Tabela 8.9 Municípios com os dez maiores potenciais técnicos de biogás, biometano e eletricidade produzidos a partir dos dejetos de ovinos.
Table 8.9 *Municipalities with the ten greatest technical potentials for biogas, biomethane, and electricity produced from sheep manure.*

Território de identidade (TI) *Territory of Identity*	Município *Municipality*	Ovinos (Cabeças) *Sheep (Heads)*	Biogás (Nm³/ano) *Biogas (Nm³/year)*	Biometano (Nm³/ano) *Biomethane (Nm³/year)*	Hidrogênio do Biometano (Nm³/ano) *Hydrogen from Biomethane (Nm³/year)*	Eletricidade (MWhano) *Electricity (MWh/year)*
Sertão do São Francisco	Casa Nova	658.535	69.538	37.550	86.485	146
Sertão do São Francisco	Juazeiro	388.270	40.999	22.140	50.991	86
Sertão do São Francisco	Remanso	378.300	39.947	21.571	49.682	84
Sertão do São Francisco	Curaçá	265.922	28.080	15.163	34.923	59
Sertão do São Francisco	Uauá	223.198	23.569	12.727	29.313	49
Sertão do São Francisco	Pilão Arcado	210.763	22.255	12.018	27.679	47
Sertão do São Francisco	Sento Sé	169.202	17.867	9.648	22.221	37
Sisal	Monte Santo	106.975	11.296	6.100	14.049	24
Itaparica	Abaré	98.337	10.384	5.607	12.915	22
Sisal	Tucano	95.982	10.135	5.473	12.605	21
TOTAL TOP 10		**2.595.484**	**274.070**	**147.998**	**340.864**	**574**
BAHIA		**5.005.629**	**528.568**	**285.427**	**657.388**	**1.107**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 8.8 / *Map 8.8*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DOS DEJETOS DE CRIAÇÃO DE OVINOS

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM SHEEP MANURE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

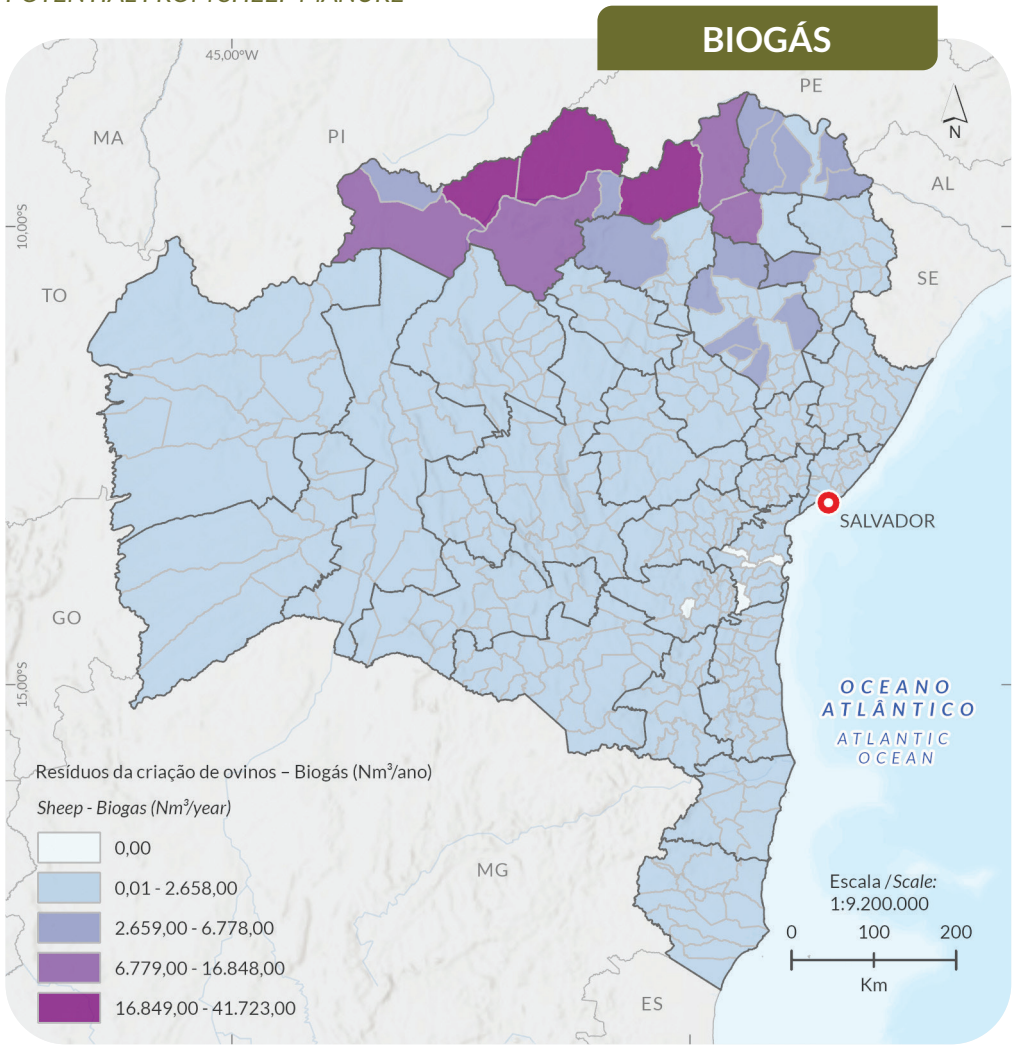
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

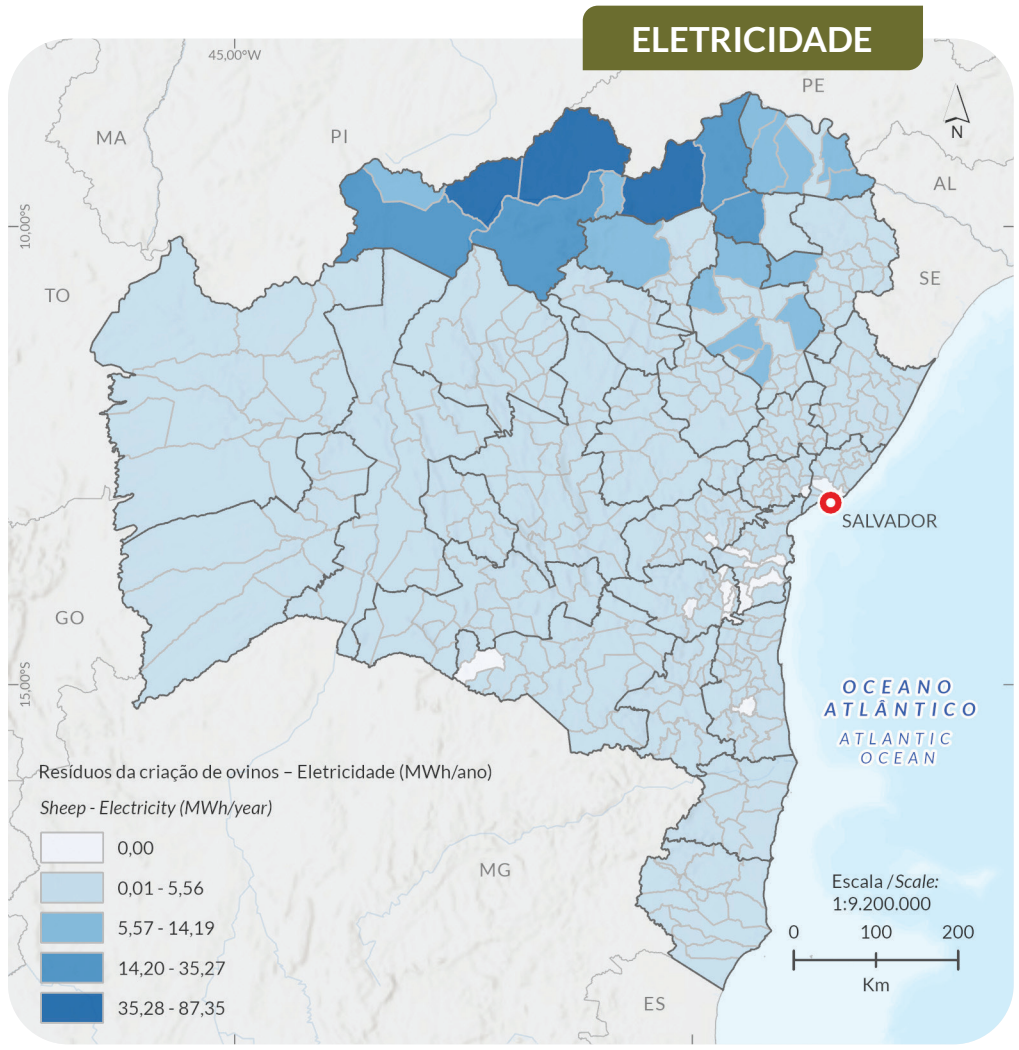
BIOGAS

BIOGÁS



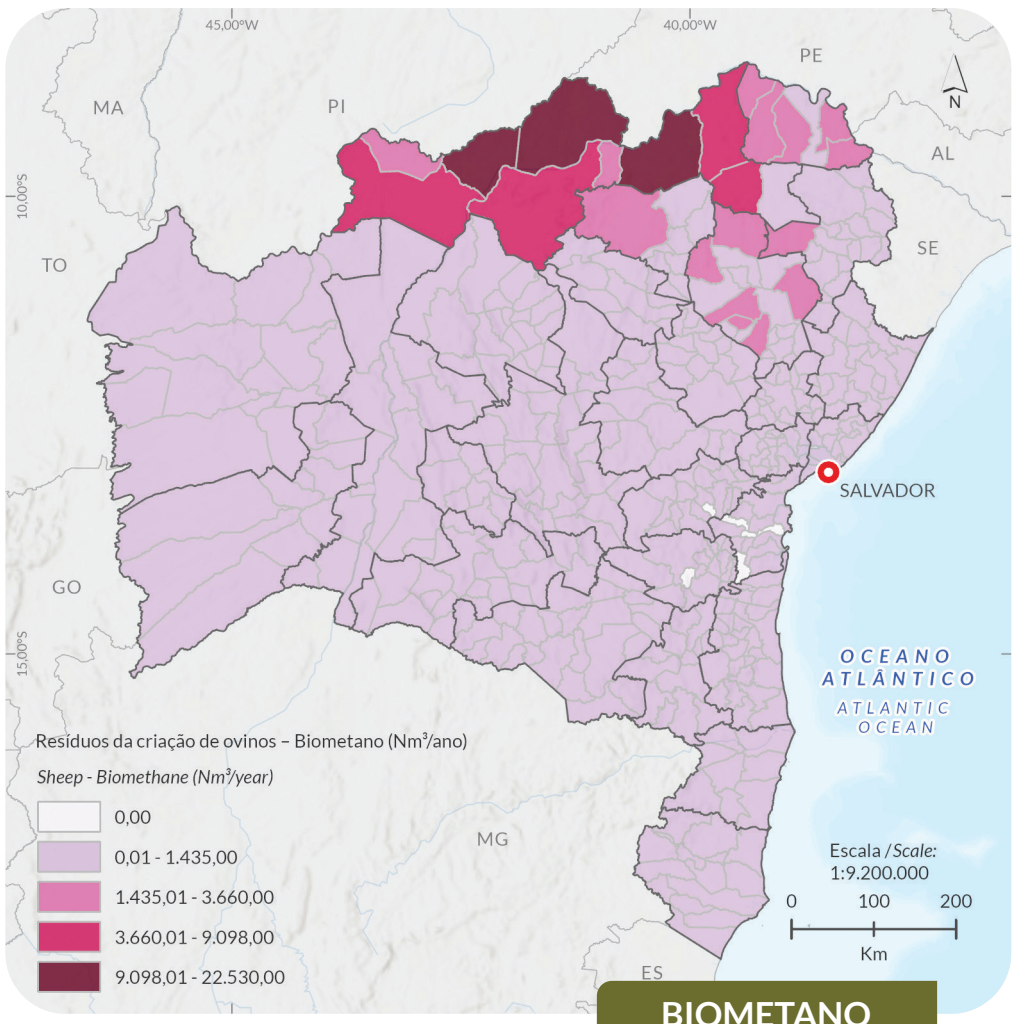
ELECTRICITY

ELETRICIDADE



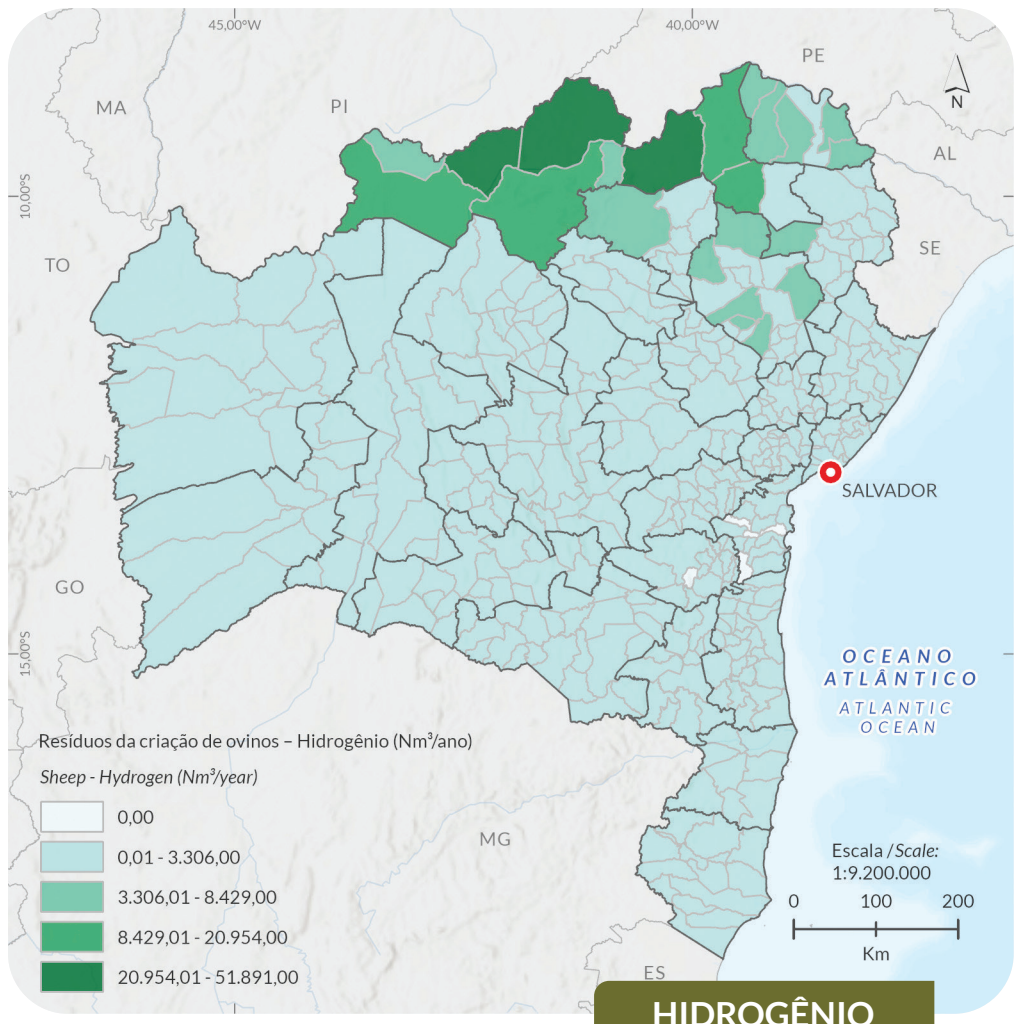
BIOMETANO

BIOMETHANE



HIDROGÊNIO

HYDROGEN



VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL NA BAHIA

natural gas (39.5 MJ/m³) and hydrogen (12.7 MJ/m³), also falls within the same order of magnitude, reinforcing that, in quantitative terms, the contribution of the sheep sector to the State's energy mix is marginal.

Nevertheless, spatial analysis of the data (Table 8.9) reveals that the Sertão do São Francisco region concentrates most of the identified potential, with municipalities such as Casa Nova, Juazeiro, Remanso, Curaçá, Uauá, Pilão Arcado, and Sento Sé among the ten highest estimated values. This geographic concentration creates favorable conditions for the implementation of regional or cooperative bioenergy projects, capable of adding scale, reducing costs and making the conversion of waste into energy economically viable.

In the local context, the energy use of sheep waste can generate significant environmental benefits, such as mitigating methane emissions, controlling odors, and producing biofertilizers from digestate, promoting improvements in soil fertility. Although its overall impact on the State's energy mix is limited, the sheep sector can play a strategic role in strengthening the circular economy, increasing energy resilience, and promoting the sustainable development of rural communities, especially in the semiarid regions of Bahia.

8.4.9 ENERGY POTENTIAL FROM BUFFALO FARMING MANURE

The ten municipalities with the greatest technical potential for producing biogas, biomethane, electricity, and hydrogen from the digestion of buffalo manure are presented in Table 8.10.

An assessment of the energy potential from buffalo manure in Bahia confirms the significantly reduced contribution of this segment to the State's energy mix. Although the herd numbers 23,374 head, the estimated energy yield corresponds to only 35,500 Nm³/year of biogas, which is equivalent to approximately 19,200 Nm³/year of biomethane, 44,200 Nm³/year of hydrogen (produced from biomethane), or 74.4 MWh/year of electricity. Compared to the state's estimated electricity consumption of 27.9 TWh/year in 2024 (15), these values represent less than 0.1%, reinforcing their quantitative insignificance on a statewide scale.

Similarly, when compared to the total volume of natural gas distributed in Bahia (approximately 1.8 billion m³/year), biomethane derived from buffalo waste does not reach 0.001% of this total. Even when considering the energy equivalence in hydrogen, taking as a reference the Higher Heating Value (HHV) of natural gas (39.5 MJ/m³) and hydrogen (12.7 MJ/m³), the potential production of 44.2 thousand Nm³/year of hydrogen remains negligible compared to the State's demand.

The spatial analysis of the ten municipalities with the highest estimated volumes, summarized in Table 8.10, indicates a combined potential of 20,500 Nm³/year of biogas, 11,100 Nm³/year of biomethane, 25,500 Nm³/year of hydrogen, and 43 MWh/year of electricity. Although they represent the best relative performances, these municipalities account for only 0.09% of the state's buffalo herd, reinforcing the limited scale of this segment in the state's energy matrix.

No contexto local, o aproveitamento energético dos resíduos ovinos pode gerar benefícios ambientais relevantes, como a mitigação das emissões de metano, o controle de odores e a produção de biofertilizantes a partir do digestato, promovendo melhorias na fertilidade do solo. Embora seu impacto global na matriz energética estadual seja limitado, o setor ovino pode desempenhar papel estratégico no fortalecimento da economia circular, no aumento da resiliência energética e no desenvolvimento sustentável de comunidades rurais, especialmente nas regiões semiáridas da Bahia.

8.4.9 POTENCIAL ENERGÉTICO DOS DEJETOS DA BUBALINOCULTURA

Os dez municípios com maiores potenciais técnicos de produção de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio a partir da digestão dos dejetos de bubalinos, são apresentados na *Tabela 8.10*.

A avaliação do potencial energético proveniente dos dejetos de bubalinos na Bahia confirma a contribuição bastante reduzida desse segmento para a matriz energética estadual. Embora o rebanho contabilize 23.374 cabeças, o aproveitamento energético estimado corresponde a apenas 35,5 mil Nm³/ano de biogás, o que equivale a cerca de 19,2 mil Nm³/ano de biometano, 44,2 mil Nm³/ano de hidrogênio (produzido a partir do biometano) ou 74,4 MWh/ano de eletricidade. Em comparação ao consumo estadual de energia elétrica, estimado em 27,9 TWh/ano em 2024 (15), esses valores representam menos de 0,0003%, reforçando seu caráter quantitativamente irrelevante em escala estadual.

De forma semelhante, quando confrontado com o volume total de gás natural distribuído na Bahia (cerca de 1,8 bilhão de m³/ano), o biometano derivado dos resíduos bubalinos não alcança 0,001% desse total. Mesmo ao se considerar a equivalência energética em hidrogênio, tomando como referência o poder calorífico superior do gás natural (39,5 MJ/m³) e do hidrogênio (12,7 MJ/m³), a produção potencial de 44,2 mil Nm³/ano de hidrogênio permanece em nível desprezível frente à demanda estadual.

A análise espacial dos dez municípios com maiores volumes estimados, sintetizada na *Tabela 8.10*, indica um potencial conjunto de 20,5 mil Nm³/ano de biogás, 11,1 mil Nm³/ano de biometano, 25,5 mil Nm³/ano de hidrogênio e 43 MWh/ano de eletricidade. Embora representem os melhores desempenhos relativos, esses municípios ainda respondem por uma fração mínima diante do potencial energético total da pecuária baiana.

Apesar da baixa representatividade em escala estadual, a valorização local dos resíduos bubalinos pode assumir relevância estratégica, sobretudo em comunidades rurais e propriedades isoladas. Nessas condições, a geração descentralizada de energia pode reduzir custos operacionais, melhorar a autossuficiência e contribuir para a mitigação de impactos ambientais. O biogás, além de atender a demandas internas como aquecimento, iluminação e operação de equipamentos, viabiliza também a produção de biofertilizantes a partir do digestato, favorecendo sinergias produtivas dentro da lógica da economia circular.

Do ponto de vista territorial, destaca-se a concentração do potencial nos territórios da Costa do Descobrimento (Porto Seguro e Itagimirim) e do Metropolitano de Salvador (São Sebastião do Passé e Mata de São João), seguidos por polos no Portal do Sertão (Terra Nova), Litoral Sul (Canavieiras) e Médio Sudoeste (Itororó e Itambé). Essa configuração sugere oportunidades para a execução de projetos-piloto em áreas com maior densidade de animais, especialmente quando integrados a sistemas multiespécies capazes de processar resíduos de diferentes cadeias pecuárias e agrícolas, ampliando a escala de produção e fortalecendo a viabilidade econômica.

Tabela 8.10 Municípios com os dez maiores potenciais técnicos de biogás, biometano e eletricidade produzidos a partir dos dejetos de bubalinos.
Table 8.10 *Municipalities with the ten greatest technical potential for biogas, biomethane, and electricity produced from buffalo manure.*

Território de identidade (TI) *Territory of Identity*	Município *Municipality*	Bubalinos (Cabeças) *Buffaloes (Heads)*	Biogás (Nm³/ano) *Biogas (Nm³/year)*	Biometano (Nm³/ano) *Biomethane (Nm³/year)*	Hidrogênio do Biometano (Nm³/ano) *Hydrogen from Biomethane (Nm³/year)*	Eletricidade (MWhano) *Electricity (MWh/year)*
Costa do Descobrimento	Porto Seguro	3.299	5.017	2.709	6.240	11
Metropolitano de Salvador	São Sebastião do Passé	3.056	4.647	2.510	5.780	10
Portal do Sertão	Terra Nova	1.751	2.663	1.438	3.312	6
Litoral Sul	Canavieiras	1.465	2.228	1.203	2.771	5
Médio Sudoeste da Bahia	Itororó	883	1.343	725	1.670	3
Litoral Norte e Agreste Baiano	Alagoinhas	772	1.174	634	1.460	2
Costa do Descobrimento	Itagimirim	687	1.045	564	1.299	2
Extremo Sul	Vereda	560	852	460	1.059	2
Médio Sudoeste da Bahia	Itambé	499	759	410	944	2
Metropolitano de Salvador	Mata de São João	498	757	409	942	2
TOTAL TOP 10		**13.470**	**20.485**	**11.062**	**25.477**	**43**
BAHIA		**23.374**	**35.546**	**19.195**	**44.209**	**74**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 8.9 / *Map 8.9*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS PROVENIENTES DOS DEJETOS DE CRIAÇÃO DE BUBALINOS

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ENERGY POTENTIAL FROM BUFFALOES MANURE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

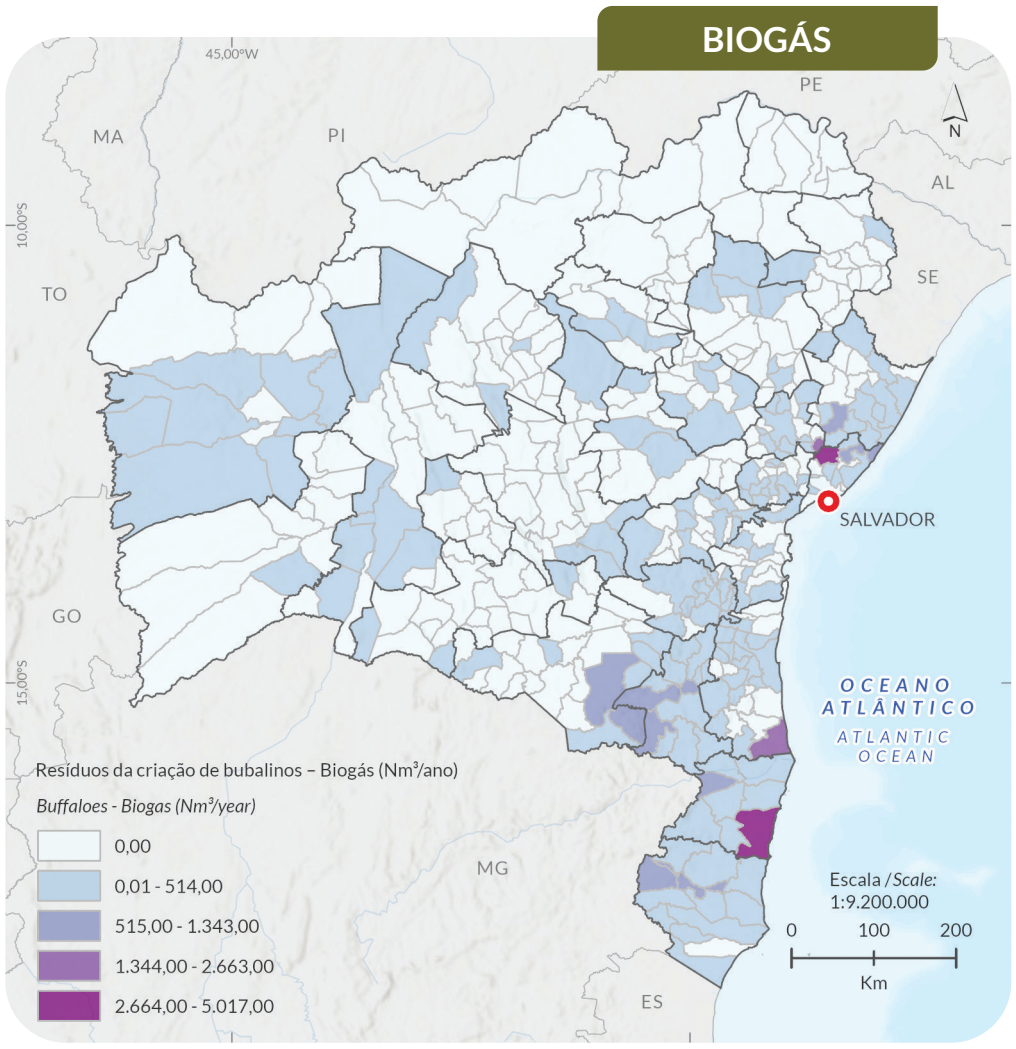
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

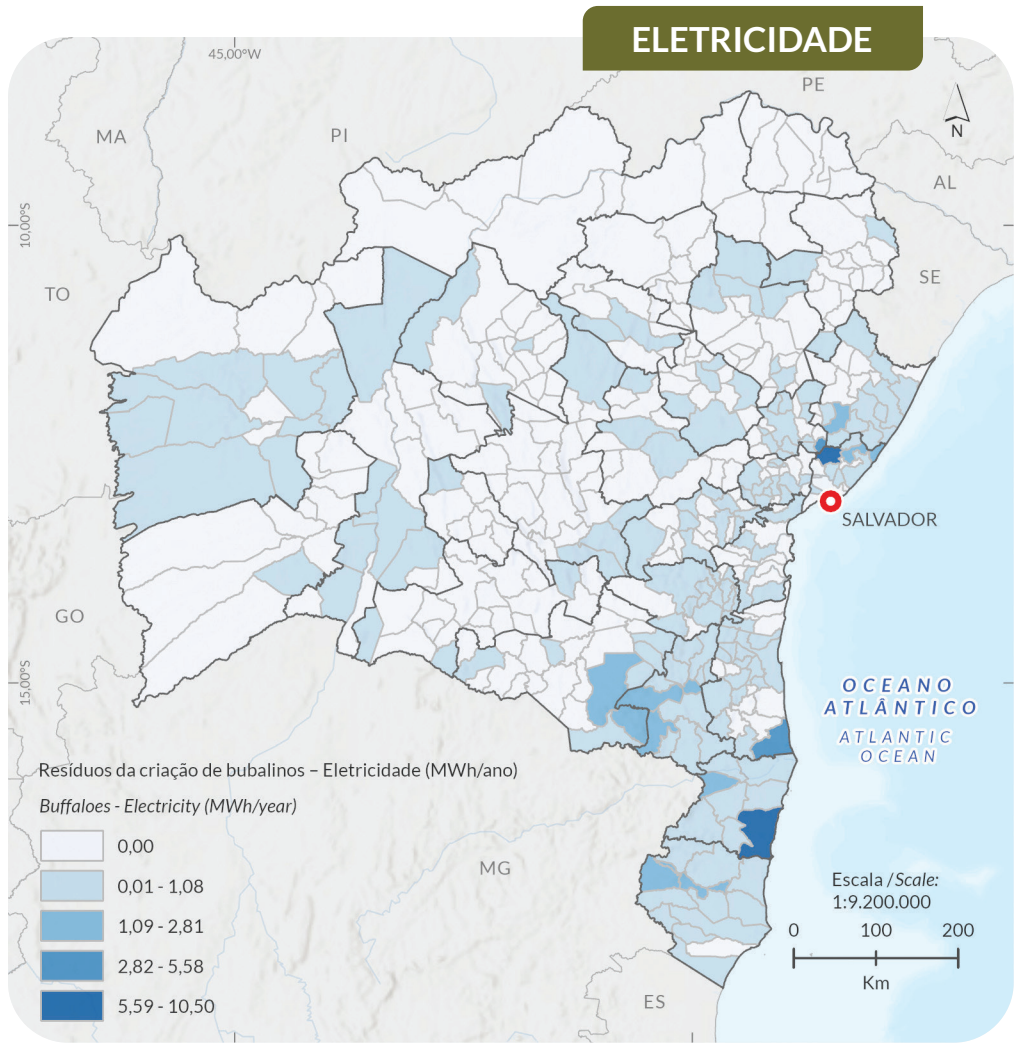
BIOGAS

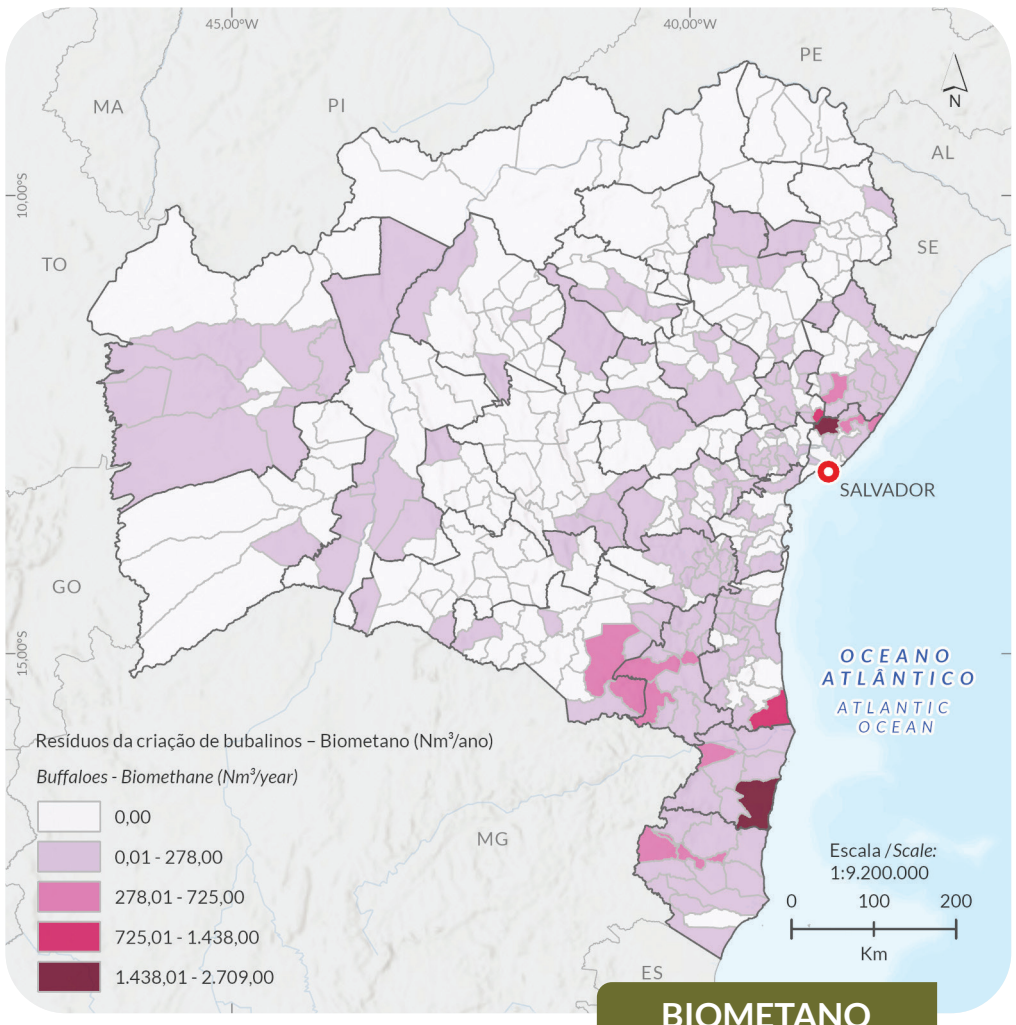
BIOGÁS



ELECTRICITY

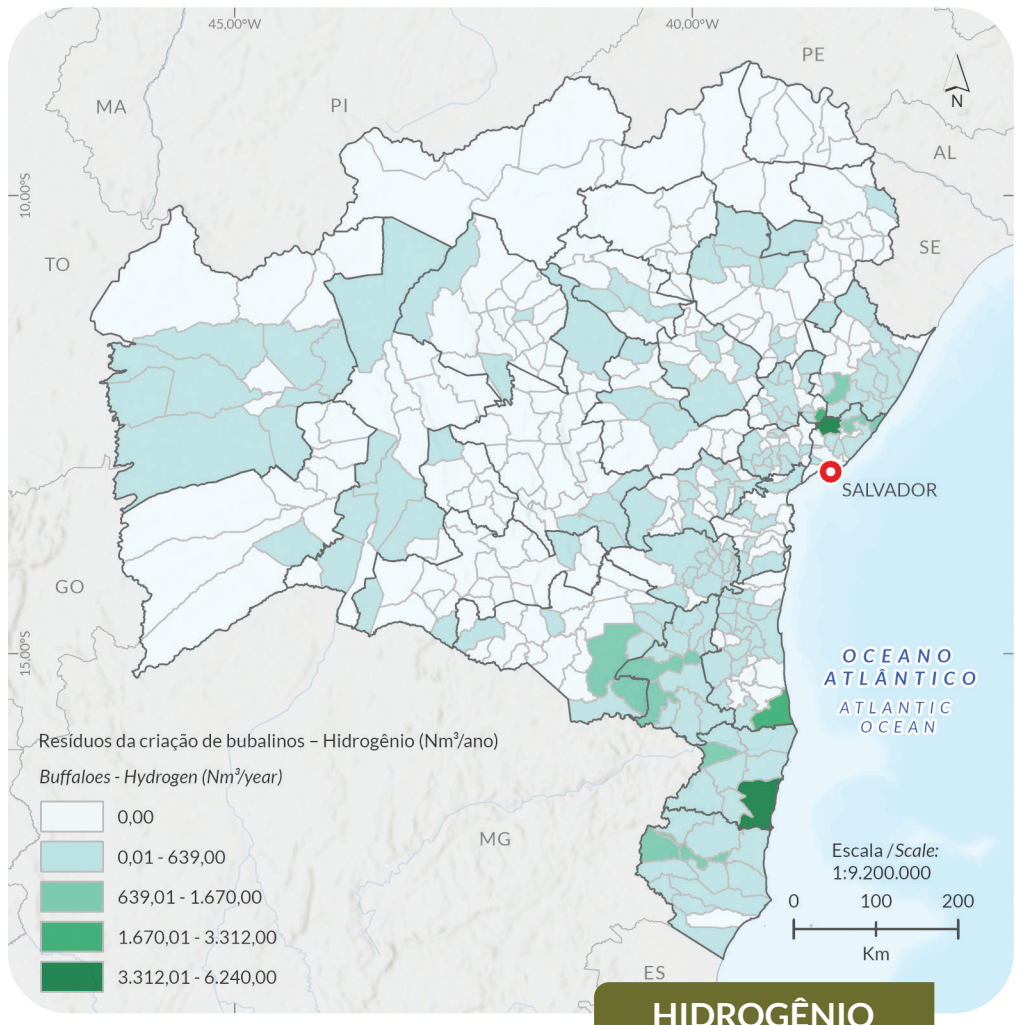
ELETRICIDADE





BIOMETANO

BIOMETHANE



HIDROGÊNIO

HYDROGEN

palities still account for a minimal fraction of the total energy potential of Bahia's livestock industry.

Despite their low statewide representation, the local recovery of buffalo waste can assume strategic importance, especially in rural communities and isolated properties. Under these conditions, decentralized energy generation can reduce operating costs, improve self-sufficiency, and contribute to mitigating environmental impacts. Biogas, in addition to meeting internal demands such as heating, lighting, and equipment operation, also enables the production of biofertilizers from digestate, favoring productive synergies within the logic of the circular economy.

From a territorial perspective, the potential is concentrated in the Costa do Descobrimento (Porto Seguro and Itagimirim) and Metropolitano de Salvador (São Sebastião do Passé and Mata de São João) regions, followed by hubs in the Portal do Sertão (Terra Nova), Litoral Sul (Canavieiras), and Médio Sudoeste da Bahia (Itororó and Itambé) regions. This configuration suggests opportunities for pilot projects in areas with higher animal density, especially when integrated with multispecies systems capable of processing waste from different livestock and agricultural chains, expanding the scale of production and strengthening economic viability.

In summary, although the energy potential of buffaloes is modest compared to other livestock segments in Bahia, their localized use can generate environmental, social, and productive gains, justifying their inclusion in regional bioenergy and sustainable development strategies.

8.4.10 TOTAL ENERGY POTENTIAL FROM LIVESTOCK MANURE

The ten municipalities with the greatest technical potential for producing biogas, biomethane, electricity, and hydrogen from livestock waste, considering the sum of the potentials of each type of livestock evaluated, are presented in Table 8.11.

An analysis of the total energy potential from livestock waste reveals a strong geographic concentration of biogas, biomethane, electricity, and hydrogen production capacity in the State of Bahia. The ten most prominent municipalities account for a combined 363.3 million Nm³/year of biogas, corresponding to approximately 10.6% of the estimated state potential (3.5 billion Nm³/year). In terms of biomethane, this group concentrates 196.17 million Nm³/year (approximately 10.5% of the state total), while the associated hydrogen potential reaches 451.8 million Nm³/year (10.5% of the total), and potential electricity generation reaches 911.4 GWh/year (10.7% of the State total).

Among the municipalities, Itarantim (Mid-Southwest Bahia) ranks 1st, with 45.9 million Nm³/year of biogas, followed by Vitória da Conquista (Southwest Bahia) with 43.4 million Nm³/year and Itanhém (Far South) with 38.3 million Nm³/year. These three municipalities, alone, represent approximately 36% of the aggregate energy potential of the group of the ten largest. This concentration suggests the existence of

Em síntese, embora o potencial energético dos bubalinos seja modesto frente a outros segmentos da pecuária baiana, sua utilização localizada pode gerar ganhos ambientais, sociais e produtivos, justificando sua inclusão em estratégias regionais de bioenergia e de desenvolvimento sustentável.

8.4.10 POTENCIAIS ENERGÉTICOS TOTAIS DOS DEJETOS DE PRODUÇÃO ANIMAL

Os dez municípios com maior potencial técnico de produção de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio a partir de resíduos da produção animal, considerando a soma dos potenciais de cada tipo de criação avaliada, são apresentados na *Tabela 8.11*.

A análise dos potenciais energéticos totais provenientes dos resíduos da produção animal evidencia uma forte concentração geográfica da capacidade de produção de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio no Estado da Bahia. Os dez municípios de maior destaque somam 363,28 milhões Nm³/ano de biogás, correspondendo a, aproximadamente, 10,55% do potencial estadual estimado (3,45 bilhões Nm³/ano). Em termos de biometano, esse grupo concentra 196,17 milhões Nm³/ano (cerca de 10,54% do total estadual), enquanto o potencial associado de hidrogênio atinge 451,78 milhões Nm³/ano (10,54% do total) e a geração elétrica possível alcança 911,42 GWh/ano (10,73% do total estadual).

Entre os municípios, Itarantim (Médio Sudoeste da Bahia) ocupa a 1ª posição, com 45,92 milhões Nm³/ano de biogás, seguido de Vitória da Conquista (Sudoeste Baiano) com 43,41 milhões Nm³/ano e Itanhém (Extremo Sul) com 38,25 milhões Nm³/ano. Esses três municípios, isoladamente, representam, aproximadamente, 36% do potencial energético agregado do grupo dos dez maiores. Essa concentração sugere a existência de polos estratégicos para instalação de unidades de aproveitamento energético dos resíduos, potencialmente viabilizando economias de escala e redução de custos logísticos.

A análise dos potenciais energéticos foi feita considerando como referência o consumo anual de energia elétrica na Bahia em 2024, estimado em 27,9 TWh/ano [71], e o volume total de gás natural distribuído no Estado, de, aproximadamente, 1,8 bilhão Nm³/ano (média diária de cerca de 4,8 milhões Nm³/dia). O setor residencial/comercial respondeu por apenas 1,24% desse volume. Para o hidrogênio, a comparação é realizada em base energética, considerando o poder calorífico superior do gás natural (39,5 MJ/m³) e do hidrogênio (12,7 MJ/m³).

Em termos relativos, o potencial de biometano dos dez municípios líderes equivale a cerca de 10,89% do volume anual de gás natural distribuído na Bahia, enquanto o potencial elétrico representa, aproximadamente, 3,26% do consumo anual de energia elétrica do Estado. Já o hidrogênio obtido a partir desse biometano corresponderia a aproximadamente 8,07% da energia contida no gás natural distribuído.

Do ponto de vista territorial, observa-se que três Territórios de Identidade, Médio Sudoeste da Bahia, Extremo Sul e Bacia do Rio Grande/Corrente, respondem por grande parte dos potenciais mais elevados, refletindo a relevância da pecuária intensiva nessas regiões. Além disso, a presença de municípios como Vitória da Conquista e Ipirá indica que o potencial não está restrito apenas a regiões de maior disponibilidade de área, mas também a localidades com atividade pecuária consolidada e diversificada.

O potencial de geração de hidrogênio a partir do biometano é particularmente expressivo, ultrapassando 57 milhões Nm³/ano apenas em Itarantim, o que reforça a importância estratégica desses municípios no contexto da transição energética e da diversificação da matriz energética estadual. A conversão para eletricidade também se mostra significativa, com valores superiores a 100 GWh/ano nos dois primeiros colocados, o que poderia abastecer dezenas de milhares de residências anualmente.

Tabela 8.11 Municípios com os dez maiores potenciais técnicos de biogás, biometano e eletricidade a partir de resíduos da produção animal, considerando a soma dos potenciais de cada tipo de criação avaliada.
Table 8.11 *Municipalities with the ten greatest technical potentials for biogas, biomethane, and electricity from livestock production waste, considering the sum of the potentials of each type of livestock evaluated.*

Território de identidade (TI) *Territory of Identity*	Município *Municipality*	Biogás (Nm³/ano) *Biogas (Nm³/year)*	Biometano (Nm³/ano) *Biomethane (Nm³/year)*	Hidrogênio do Biometano (Nm³/ano) *Hydrogen from Biomethane (Nm³/year)*	Eletricidade (MWhano) *Electricity (MWh/year)*
Médio Sudoeste da Bahia	Itarantim	45.914.794	24.794.498	57.106.050	115.332
Sudoeste baiano	Vitória da Conquista	43.438.537	23.467.116	54.048.857	108.559
Extremo Sul	Itanhém	38.246.400	20.653.517	47.568.650	95.888
Médio Sudoeste da Bahia	Itambé	37.042.738	20.005.777	46.076.790	93.033
Bacia do Rio Grande	Santa Rita de Cássia	35.394.372	19.118.729	44.033.765	88.851
Extremo Sul	Itamaraju	34.298.424	18.521.720	42.658.748	86.149
Bacia do Rio Corrente	Serra Dourada	33.631.752	18.162.543	41.831.503	84.372
Bacia do Jacuípe	Ipirá	32.612.942	17.633.736	40.613.568	81.773
Extremo Sul	Medeiros Neto	32.364.373	17.477.236	40.253.119	81.295
Costa do Descobrimento	Guaratinga	30.449.556	16.442.859	37.870.769	76.473
TOTAL TOP 10		**363.393.888**	**196.277.732**	**452.061.818**	**911.723**
BAHIA		**3.467.940.903**	**1.879.048.400**	**4.327.775.895**	**8.552.258**

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

Mapa 8.10 / *Map 8.10*

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DOS POTENCIAIS ENERGÉTICOS TOTAIS PROVENIENTES DOS DEJETOS DE CRIAÇÃO ANIMAL

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF TOTAL ENERGY POTENTIAL FROM LIVESTOCK MANURE

Salvador / *State Capital*

Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*

Limite municipal / *Municipal boundary*

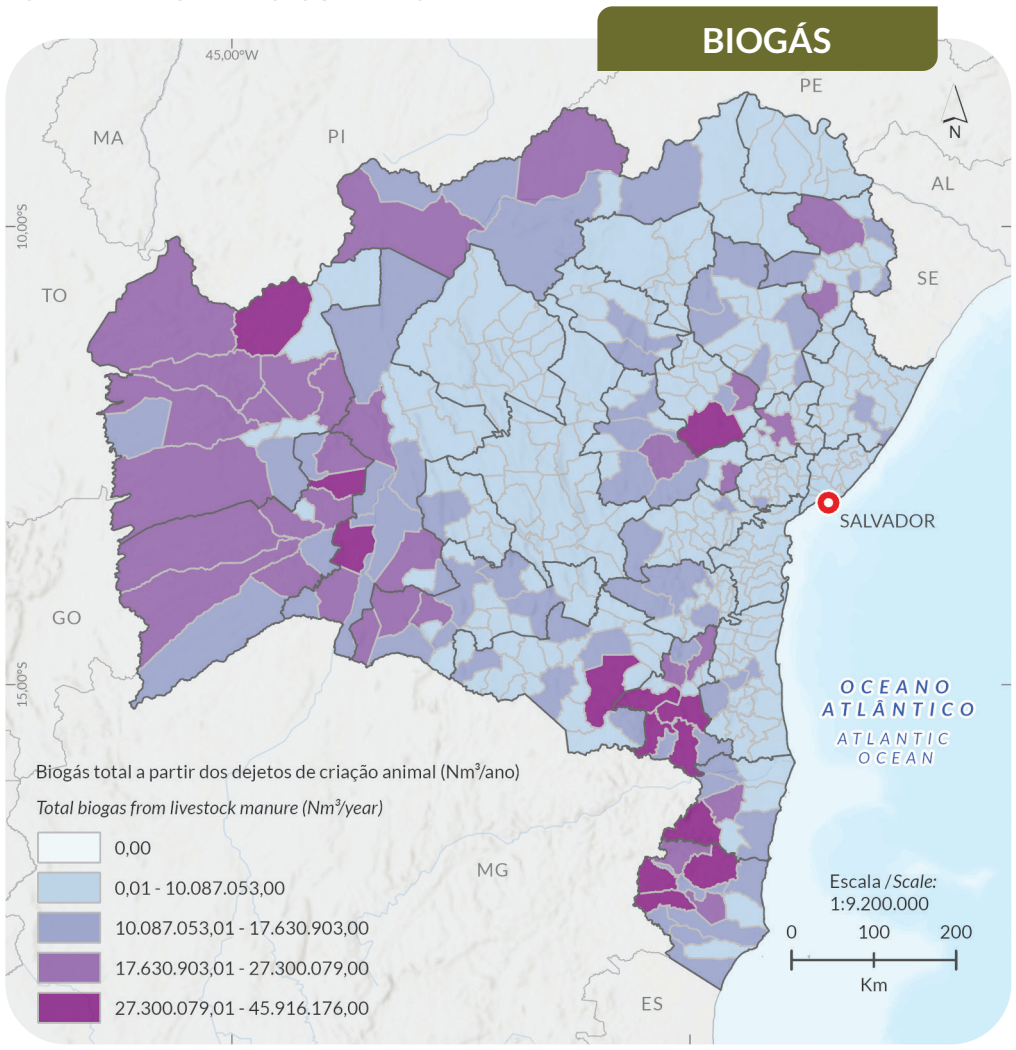
Limite estadual / *State boundary*

Fonte de Dados / *Data source:*
Municípios, Estados e Capital / *Municipal boundary, State boundary and State Capital:* (IBGE, 2024)
Territórios de Identidade / *Identity Territory boundary* (GEOBAHIA, 2024)

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

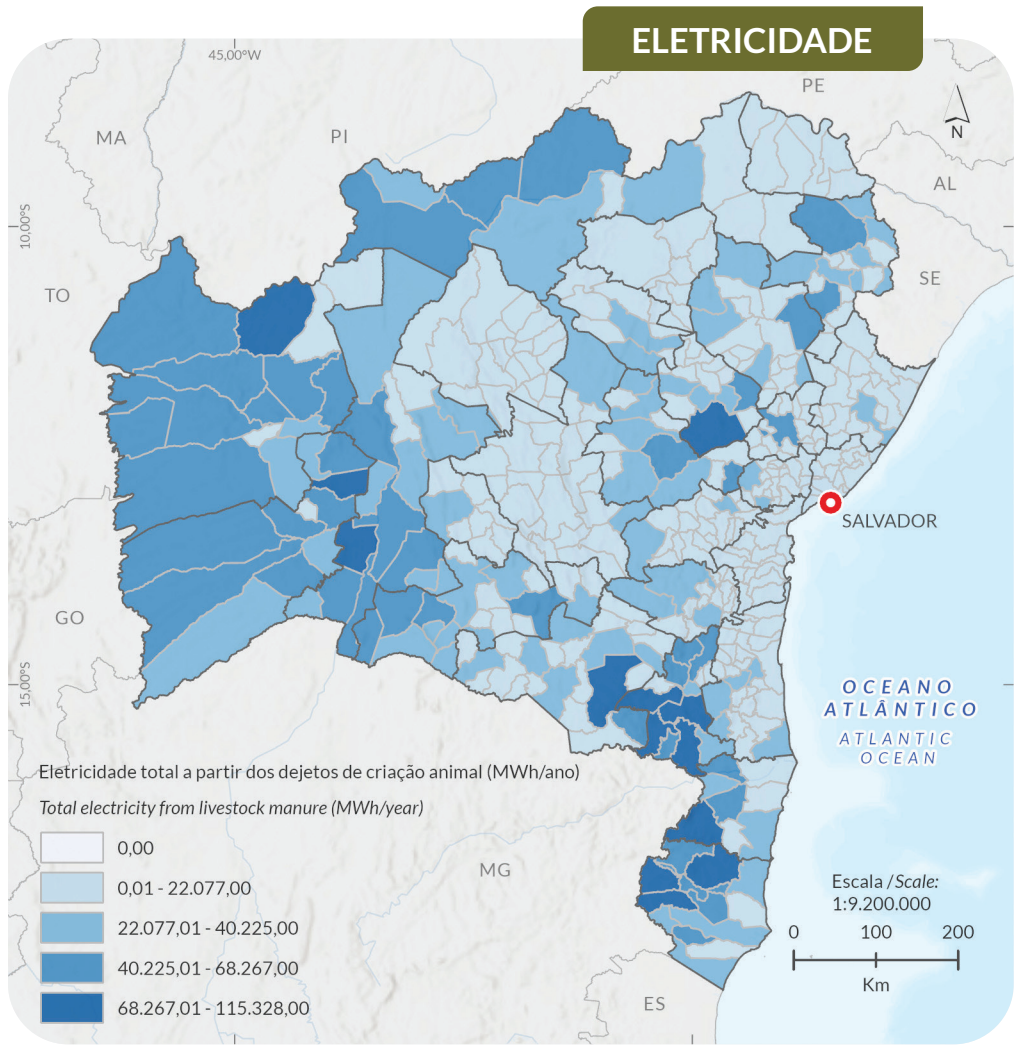
BIOGAS

BIOGÁS



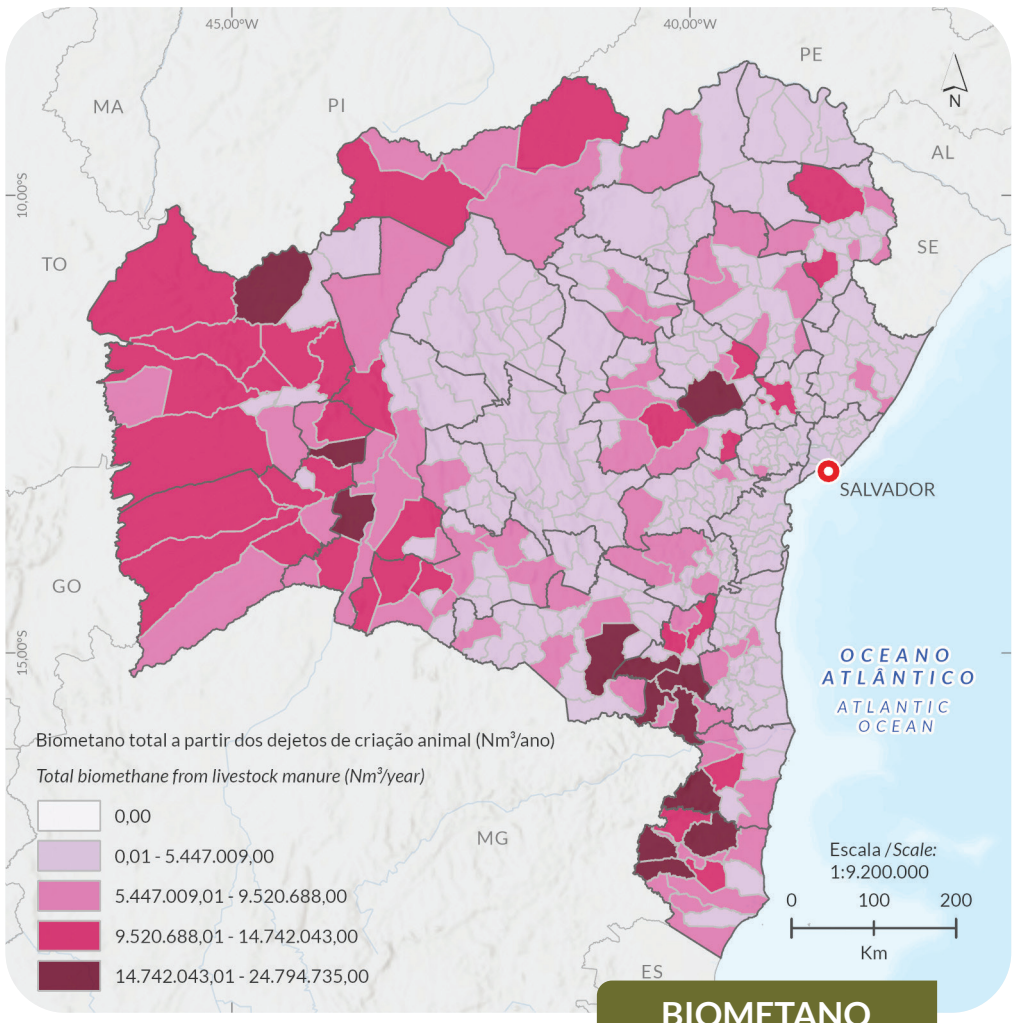
ELECTRICITY

ELETRICIDADE



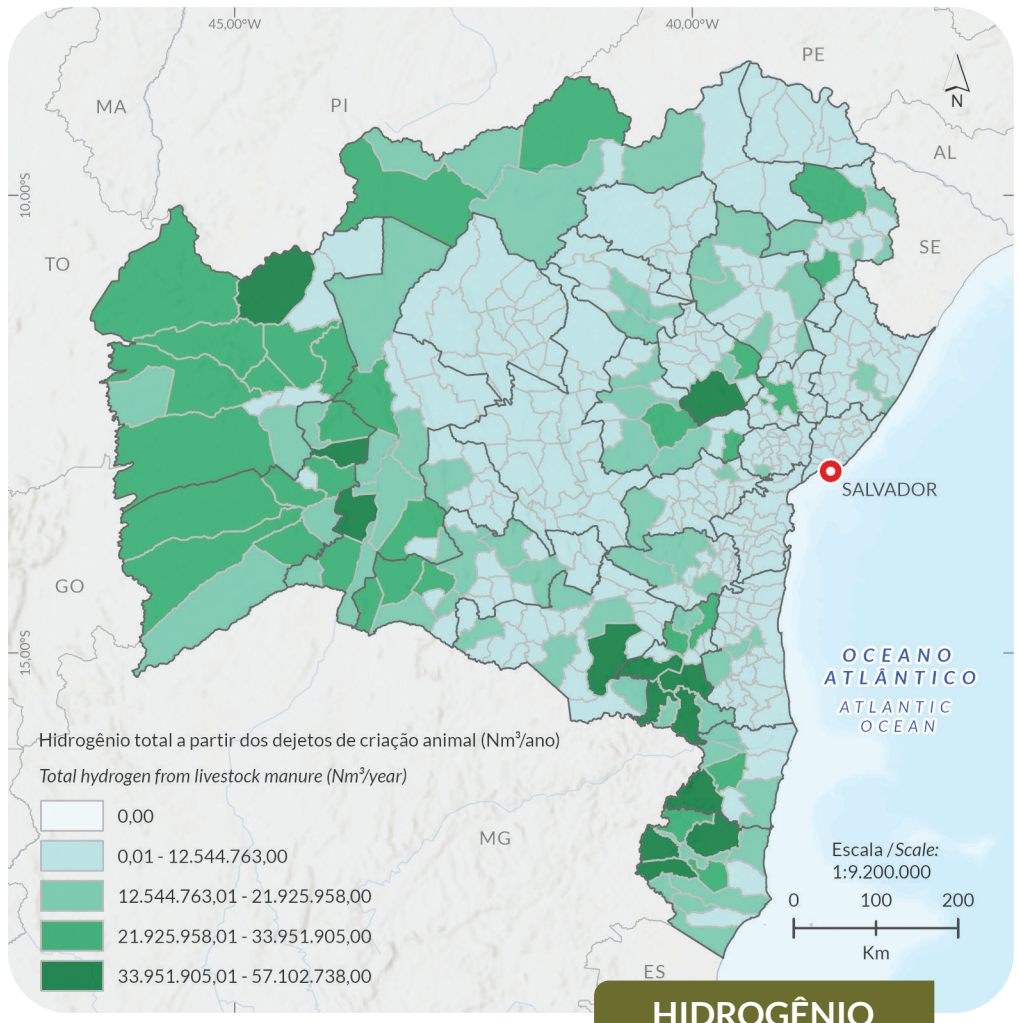
BIOMETANO

BIOMETHANE



HIDROGÊNIO

HYDROGEN



strategic hubs for the installation of waste-to-energy units, potentially enabling economies of scale and reducing logistical costs.

The analysis of energy potential was carried out considering as a reference the annual electricity consumption in Bahia in 2024, estimated at 27,9 TWh/year [71], and the total volume of natural gas distributed in the State, approximately 1.8 billion Nm³/year (daily average of approximately 4.8 million Nm³/day). The residential/commercial sector accounted for only 1.24% of this volume. For hydrogen, the comparison is made on an energy basis, considering the Higher Heating Value (HHV) of natural gas (39.5 MJ/m³) and hydrogen (12.7 MJ/m³).

In relative terms, the biomethane potential of the ten leading municipalities is equivalent to approximately 10.9% of the annual volume of natural gas distributed in Bahia, while the electrical potential represents approximately 3.3% of the state's annual electricity consumption. The hydrogen obtained from this biomethane would correspond to approximately 8.1% of the energy contained in the distributed natural gas.

From a territorial perspective, it can be seen that three Identity Territories: the Mid-Southwest of Bahia, the Extreme South, and the Rio Grande/Current Basin, account for a large portion of the highest potential, reflecting the importance of intensive livestock farming in these regions. Furthermore, the presence of municipalities such as Vitória da Conquista and Ipirá indicates that the potential is not limited to regions with greater land availability, but also to locations with consolidated and diversified livestock farming.

The potential for hydrogen generation from biomethane is particularly significant, exceeding 57 million Nm³/year in Itarantim alone, reinforcing the strategic importance of these municipalities in the context of the energy transition and the diversification of the State's energy mix. Conversion to electricity is also significant, with values exceeding 100 GWh/year in the top two municipalities, which could power tens of thousands of homes annually.

These results indicate that prioritizing investments in energy collection, transportation, and conversion infrastructure in municipalities with the greatest potential can maximize economic and environmental returns, in addition to contributing to the decentralization of renewable energy generation in Bahia. However, to make the exploitation of these resources viable, it will be necessary to overcome logistical challenges, establish efficient supply chains, and promote public policies to encourage the energy recovery of livestock waste.

8.5 BAHIA'S LIVESTOCK INDUSTRY AND THE FUTURE OF BIOENERGY: A STRATEGIC LOOK

Bahia's livestock industry, due to its diversity and significant size, is emerging as a key player in the State's transition to a cleaner, more resilient, and decentralized energy mix. The significant herds of dairy cattle, poultry, swine, goats, and sheep are distributed across different microregions of the State, favoring the development of multiple production hubs for biogas, biomethane, hydrogen, and renewable electricity, anchored in the use of agricultural waste.

The internalization of gas use, especially in the form of biomethane, finds fertile ground in the municipalities of Bahia's interior, where livestock production chains generate significant and constant waste throughout the year. These waste, often seen only as environmental liabilities, takes on new meaning when converted into energy, creating concrete opportunities for economic development, income generation, and strengthening local production systems.

By integrating biogas and biomethane production into rural dynamics, it is possible not only to promote the decentralized use of gas, reducing dependence on fossil fuels and long distribution pipelines, but also to drive the creation of production hubs that add value to regional production chains. These hubs, based on technical knowledge, innovation, and cooperative partnerships, become catalysts for the expansion of renewable energy in the interior, generating environmental, economic, and social benefits by encouraging families to settle in rural areas and boosting the regional labor market.

Esses resultados indicam que a priorização de investimentos em infraestrutura de coleta, transporte e conversão energética nos municípios com maiores potenciais pode maximizar o retorno econômico e ambiental, além de contribuir para a descentralização da geração de energia renovável na Bahia. Contudo, para viabilizar a exploração desses recursos, será necessário superar desafios logísticos, estabelecer cadeias de suprimento eficientes e promover políticas públicas de incentivo à valorização energética dos resíduos pecuários.

8.5 A PECUÁRIA BAIANA E O FUTURO DA BIOENERGIA: UM OLHAR ESTRATÉGICO

A pecuária baiana, pela sua diversidade e expressividade, desponta como uma peça-chave na transição estadual para uma matriz energética mais limpa, resiliente e descentralizada. O significativo rebanho de bovinos leiteiros, aves, suínos, caprinos e ovinos distribui-se por diferentes microrregiões do Estado, o que favorece a formação de múltiplos polos de produção de biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade renovável, ancorados no aproveitamento dos resíduos agropecuários.

A interiorização do uso de gás, em especial na forma de biometano, encontra terreno fértil nos municípios do interior da Bahia, onde as cadeias produtivas da pecuária geram resíduos em volume relevante e constante ao longo do ano. Esses resíduos, frequentemente vistos apenas como passivos ambientais, adquirem novo significado quando convertidos em energia, criando oportunidades concretas de desenvolvimento econômico, geração de renda e fortalecimento de arranjos produtivos locais.

Ao integrar a produção de biogás e biometano às dinâmicas rurais, é possível não apenas promover o uso descentralizado do gás, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e longos dutos de distribuição, mas também impulsionar a criação de polos produtores que agregam valor às cadeias produtivas regionais. Esses polos, assentados no conhecimento técnico, inovação

Figura 8.7 Planta de digestão anaeróbia de dejetos animais.
Figure 8.7 *Animal waste anaerobic digestion plant.*



e no associativismo, tornam-se catalisadores da interiorização das energias renováveis, gerando benefícios ambientais, econômicos e sociais, ao estimular a fixação de famílias no campo e a dinamização do mercado regional de trabalho.

O modelo de polos produtores, aliado à integração dos resíduos de diferentes espécies, permite ganhos de escala e sinergias tecnológicas, ampliando o impacto da pecuária na matriz energética baiana. Tal estratégia reforça a valorização dos resíduos agropecuários, potencializando avanços em sustentabilidade, resiliência energética e inovação.

A formação de polos produtores de energia a partir de resíduos agropecuários representa uma estratégia eficaz para elevar a eficiência no aproveitamento dos dejetos, especialmente em um cenário onde os estabelecimentos rurais encontram-se dispersos pelo território baiano. Essa difusão geográfica, típica da pecuária regional, pode dificultar a coleta, o processamento e a utilização dos resíduos de forma isolada, reduzindo o potencial energético que cada unidade produtora poderia gerar individualmente.

Ao reunir diferentes produtores em polos estruturados, cria-se uma rede colaborativa capaz de centralizar o processamento dos resíduos, otimizar a logística da coleta e ampliar o volume de matéria-prima disponível para geração de biogás, biometano e eletricidade. Essa organização permite ganhos de escala, reduz custos operacionais e facilita a implementação de tecnologias mais avançadas de digestão anaeróbia e purificação dos gases. Além disso, a integração dos resíduos de múltiplos estabelecimentos favorece o controle ambiental, diminui impactos negativos no entorno e estimula o desenvolvimento de cadeias produtivas locais especializadas. Portanto, a criação de polos produtivos não apenas supera os desafios impostos pela distribuição difusa dos estabelecimentos, como transforma essa heterogeneidade em força, potencializando o aproveitamento dos resíduos e consolidando um modelo de desenvolvimento rural dinâmico e sustentável para a Bahia.

The production hub model, combined with the integration of residues from different species, allows for economies of scale and technological synergies, expanding the impact of livestock farming on Bahia's energy mix. This strategy reinforces the valorization of agricultural residues, leveraging advances in sustainability, energy resilience, and innovation.

The formation of energy production hubs from agricultural residues represents an effective strategy for increasing the efficiency of residues utilization, especially in a scenario where rural establishments are dispersed throughout Bahia. This geographic dispersion, typical of regional livestock farming, can hinder the collection, processing, and utilization of residues in isolation, reducing the energy potential that each production unit could generate individually.

By bringing together different producers in structured hubs, a collaborative network is created that can centralize residues/waste processing, optimize collection logistics, and increase the volume of feedstock available for generating biogas, biomethane, and electricity. This organization allows for economies of scale, reduces operating costs, and facilitates the implementation of more advanced anaerobic digestion and gas upgrading technologies. Furthermore, integrating residues/waste from multiple establishments promotes environmental control, reduces negative impacts on the surrounding area, and stimulates the development of specialized local production chains. Therefore, the creation of production hubs not only overcomes the challenges posed by the scattered distribution of establishments but also transforms this heterogeneity into a strength, enhancing waste and residues utilization and consolidating a dynamic and sustainable rural development model for Bahia.



Foto / *Photo*: EyeEm / Freepik

Atlas Bioenergia Bahia

CONSIDERAÇÕES FINAIS

FINAL CONSIDERATIONS

FINAL CONSIDERATIONS

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O *Atlas Bioenergia Bahia* representa um marco no mapeamento e na análise do potencial técnico de aproveitamento energético das diversas biomassas disponíveis no território baiano, constituindo uma ferramenta estratégica para o planejamento energético, a formulação de políticas públicas e a atração de investimentos privados. O estudo contemplou um amplo espectro de fontes, incluindo resíduos agrícolas, agroindustriais, florestais, da pecuária, resíduos sólidos urbanos (RSU) e efluentes líquidos, além de avaliar tecnologias consolidadas e emergentes para conversão energética, como biodigestão, incineração, gaseificação, combustão e produção de biocombustíveis.

A abordagem metodológica adotada permitiu estimar o potencial técnico com base na disponibilidade teórica de cada resíduo, ponderando aspectos de sazonalidade, logística, padrões de sustentabilidade e usos competitivos. As análises georreferenciadas possibilitaram identificar áreas prioritárias e oportunidades para a formação de *hubs* de bioenergia, integrando diferentes cadeias produtivas e otimizando sinergias entre setores. O detalhamento por território de identidade e por município fornece subsídios para estratégias regionais diferenciadas, capazes de maximizar o aproveitamento energético e reduzir desigualdades no acesso a soluções tecnológicas.

A análise revela que a Bahia dispõe de um portfólio diversificado e expressivo de recursos bioenergéticos, com potencial para contribuir significativamente para a transição energética, a segurança no suprimento e a descentralização da geração de energia.

Entre os setores avaliados, o sucroenergético se destaca pela escala de produção e pelo potencial técnico para geração de biogás, biometano, hidrogênio e eletricidade, com polos relevantes identificados no Extremo Sul e no Sertão do São Francisco. Além disso, o setor proporciona excedentes de biomassa capazes de ampliar, significativamente, a oferta de energia elétrica a municípios com usinas de açúcar e álcool instaladas.

O setor florestal e madeireiro apresenta oportunidades estratégicas para uso de resíduos de processamento e biomassa excedente, enquanto a pecuária intensiva e a avicultura oferecem volumes consideráveis de dejetos passíveis de biodigestão, agregando valor à atividade, ampliando a geração distribuída em regiões rurais e reduzindo emissões de metano.

O setor agrícola diversificado da Bahia, incluindo culturas como café, cacau e coco da Bahia, também representa um vetor complementar de fornecimento de biomassa residual.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) e o esgoto sanitário apresentam potencial relevante para a recuperação energética e mitigação de impactos ambientais, sobretudo considerando a necessidade de avanço nas metas de saneamento. A valorização da fração orgânica dos RSU (Forsu) pode contribuir de forma expressiva para a produção de biogás, biometano e eletricidade, além de reduzir emissões de gases de efeito estufa e destinar adequadamente resíduos que, atualmente, têm como destino final os aterros sanitários.

O potencial energético total do Estado, o qual corresponde à somatória dos potenciais de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio obtidos a partir das diferentes fontes de biomassa avaliadas neste estudo, é apresentado na *Tabela 9.1*. Esse total representa o aproveitamento integral dos recursos disponíveis, englobando o esgoto sanitário, os resíduos sólidos urbanos (RSU), os resíduos agropecuários, os resíduos do setor sucroenergético e os provenientes das indústrias de papel e celulose. No caso dos RSU, foi considerado o cenário ideal da conversão da fração orgânica

(Forsu) por rota biológica e das tecnologias térmicas de aproveitamento energético *(Waste-to-Energy – WtE)*, como incineração e gaseificação. Para o esgoto sanitário, adotou-se igualmente o cenário ideal de aproveitamento do potencial energético. Quanto aos resíduos do setor sucroenergético, considerou-se na somatória o potencial de excedente de energia de 126 kWh/tc por ser o cenário com a tecnologia mais eficiente. Os resultados consolidados subsidiaram a elaboração dos mapas do potencial total de biogás, eletricidade, biometano e hidrogênio *(Mapa 9.1)*, que destacam os principais polos produtivos do Estado.

A integração desses recursos em *hubs* regionais de bioenergia, combinando diferentes fontes, tecnologias e cadeias produtivas, surge como estratégia central para maximizar ganhos econômicos, ambientais e sociais. O mapeamento georreferenciado apresentado aqui permite identificar áreas prioritárias para a instalação de unidades de aproveitamento energético, otimizando a logística e potencializando sinergias entre setores produtivos.

Os mapas interativos e camadas georreferenciadas, disponibilizados como produto complementar do projeto, constituem instrumentos de grande relevância para investidores, gestores públicos e pesquisadores, permitindo cruzar informações de potencial energético com infraestrutura existente, restrições ambientais e oportunidades logísticas. Essa ferramenta fortalece a possibilidade de implementar modelos descentralizados de geração de energia, integrando bioenergia à matriz estadual de forma mais resiliente e sustentável.

Entretanto, a concretização desse potencial esbarra em desafios significativos, os quais envolvem barreiras econômicas, como os elevados custos de investimento e operação; logísticas, relacionadas ao transporte e armazenamento de biomassa e biocombustíveis; e regulatórias, decorrentes da ausência ou limitação de políticas específicas para biometano, hidrogênio e geração distribuída a partir de biomassa.

Superar esses entraves exige a adoção de políticas públicas consistentes, associadas a incentivos à inovação, mecanismos de financiamento adequados e marcos regulatórios que reconheçam e valorizem atributos ambientais, a sazonalidade e a proximidade da geração em relação aos centros de consumo. Também demanda a estruturação de modelos de negócios que viabilizem a cooperação entre produtores de biomassa, setor público e iniciativa privada, incentivando a formação de *hubs* regionais; a ampliação da infraestrutura de coleta, transporte e processamento, especialmente em municípios de médio e pequeno portes, garantindo escala e viabilidade técnica aos projetos; e a capacitação técnica e disseminação de conhecimento para operadores, gestores e comunidades, fortalecendo a adesão e a eficiência dos sistemas implantados.

Os resultados apresentados reforçam que, embora a participação percentual dos biocombustíveis e da bioeletricidade possa parecer modesta frente ao consumo total do estado, seu impacto é estratégico em termos de diversificação da matriz energética, interiorização da oferta e resiliência do sistema. Além disso, a bioenergia apresenta forte potencial de gerar benefícios socioeconômicos, como criação de empregos, dinamização de cadeias produtivas e fortalecimento da economia local.

Assim, o *Atlas Bioenergia Bahia* não apenas identifica e quantifica o potencial bioenergético do Estado, mas oferece subsídios concretos para a formulação de políticas, atração de investimentos e desenvolvimento de modelos de negócio sustentáveis, alinhados às metas de descarbonização e à promoção de uma economia de baixo carbono. Sua implementação efetiva pode consolidar a Bahia como referência nacional na produção e uso sustentável da bioenergia, contribuindo para um futuro energético mais limpo, inclusivo e seguro.

Tabela 9.1 Síntese dos potenciais de biogás, biometano, eletricidade e hidrogênio por setor (Cenário Ideal).
Table 9.1 *Summary of Biogas, Biomethane, Electricity, and Hydrogen Potentials by Sector (Ideal Scenario).*

Setor *Sector*	Fonte *Source*	Potencial de biogás *Biogas potential*	Potencial de eletricidade *Electricity potential*	Potencial de biometano *Biomethane potential*	Potencial de hidrogênio a partir do biometano *Hydrogen potential from biomethane*
		(Nm³/ano) *(Nm³/year)*	(MWh/ano) *(MWh/year)*	(Nm³/ano) *(Nm³/year)*	(Nm³/ano) *(Nm³/year)*
Resíduos Sólidos Urbanos *Municipal Solid Waste*	Forsu (cenário ideal) *OFMSW (Ideal Scenario)*	210.046.373	375.589	88.385.183	203.566.479
	Tecnologias Térmicas WtE (cenário ideal) *Thermal WtE Technologies (Ideal Scenario)*		1.010.970		884.449.105
Esgoto Sanitário *Sanitary Sewage*	Esgoto Sanitário (cenário ideal) *Sanitary Sewage (ideal scenario)*	70.500.418	156.501	37.752.974	10.365.941
Resíduos Agrícolas *Agricultural Residues*	Resíduos agrícolas (algodão, banana, cacau, café, cana, citros, coco da baía, dendê, feijão, mandioca, milho e soja) *Agricultural residues (cotton, banana, cocoa, coffee, sugarcane, citrus, coconut, oil palm, beans, cassava, corn, and soy)*		9.465.521		
Papel e Celulose *Pulp and Paper*	Efluente líquido *Liquid effluent*	8.985.353	21.428	5.685.732	1.561.147
Dejetos da Produção Animal *Livestock Manure*	Dejetos da produção animal (bovinos, suínos, aves, caprinos, ovinos e bubalinos) *Livestock manure (cattle, pigs, poultry, goats, sheep, and buffalo)*	3.467.940.903	8.552.258	1.879.048.400	4.327.775.895
Sucroenergético *Sugar-energy*	*Vinhaça + Torta de filtro* *Vinasse + Filter cake*	163.146.189 (Nm³/safra) *(Nm³/crop)*	402.242 (MWh/safra) *(MWh/crop)*	86.525.474 (Nm³/safra) *(Nm³/crop)*	199.283.245 (Nm³/safra) *(Nm³/crop)*
	Excedente de eletricidade (cenário de 126 kWh/tc) *Surplus electricity (Scenario of 126 kWh/tc)*		895.805 (MWh/safra) *(MWh/crop)*		
TOTAL		3.920.619.236	20.880.314	2.097.397.763	5.627.001.812

Fonte: elaborada pelos autores (2025). / *Source: prepared by the authors (2025).*

The Bahia Bioenergy Atlas represents a milestone in mapping and analyzing the technical potential for energy recovery from the various types of biomasses available across Bahia's territory. It serves as a strategic tool for energy planning, public policy formulation, and the attraction of private investment. The study covered a broad range of sources, including agricultural, agro-industrial, forestry, livestock, municipal solid waste (MSW), and liquid effluents, in addition to evaluating both consolidated and emerging technologies for energy conversion, such as anaerobic digestion, incineration, gasification, combustion, and biofuel production.

The methodological approach adopted allowed the estimation of technical potential based on the theoretical availability of each residue, considering aspects such as seasonality, logistics, sustainability standards, and competing uses. Georeferenced analyses made it possible to identify priority areas and opportunities for the formation of bioenergy hubs, integrating different production chains and optimizing synergies among sectors. The detailed breakdown by Identity Territory and municipality provides input for region-specific strategies capable of maximizing energy recovery and reducing inequalities in access to technological solutions.

The analysis shows that the State of Bahia has a diverse and significant bioenergy resource portfolio, with strong potential to contribute to the energy transition, supply security, and decentralization of power generation.

Among the sectors analyzed, the sugar-energy industry stands out for its production scale and technical potential to generate biogas, biomethane, hydrogen, and electricity, with major hubs identified in Extremo Sul and Sertão do São Francisco Identity Territories. The sector also generates biomass surpluses that can substantially increase electricity supply in municipalities where sugar and ethanol plants are already installed.

The forestry and timber industries present strategic opportunities for the use of processing residues and surplus biomass, while intensive livestock and poultry farming provide considerable volumes of waste suitable for anaerobic digestion, adding value to production, expanding distributed generation in rural areas, and reducing methane emissions.

Bahia's diversified agricultural sector, including crops such as coffee, cocoa, and coconut, also represents a complementary vector for residual biomass supply.

Municipal solid waste (MSW) and sanitary sewage also demonstrate relevant potential for energy recovery and mitigation of environmental impacts, particularly considering the need for progress in achieving sanitation targets. The recovery of the organic fraction of MSW (OFMSW) can make a significant contribution to biogas, biomethane, and electricity production, while also reducing greenhouse gas emissions and diverting waste currently destined for sanitary landfills.

The total energy potential of the state, corresponding to the sum of the potentials of biogas, biomethane, electricity, and hydrogen derived from the different biomass sources evaluated in this study, is presented in the Table 9.1. This total represents the full utilization of available resources, including sanitary sewage, municipal solid waste (MSW), agricultural residues, residues from the sugar-energy sector, and those from the pulp and paper industries. For MSW, the ideal scenario was considered, including the conversion of the organic fraction (OFMSW) through biological routes and thermal Waste-to-Energy (WtE) technologies such as incineration and gasification. For sanitary sewage, the ideal scenario for energy potential utilization was also adopted. Regarding residues from the sugar-energy sector, the total considered the electricity surplus potential of 126 kWh/tc, as it represents the scenario with the most efficient technology. The consolidated results enabled the development of total potential maps for biogas, electricity, biomethane, and hydrogen (Figure 9.1), highlighting the main productive hubs of the state.

Integrating these resources into regional bioenergy hubs, combining different feedstocks, technologies, and production chains, emerges as a central strategy to maximize economic, environmental, and social gains. The georeferenced mapping presented in the Bahia Bioenergy Atlas identifies priority areas for the installation of energy recovery units, optimizing logistics and enhancing synergies among productive sectors.

The interactive maps and georeferenced layers, made available as a complementary output of the project, constitute valuable tools for investors, public managers, and researchers. They enable cross-referencing of energy potential data with existing infrastructure, environmental constraints, and logistical opportunities, strengthening the implementation of decentralized generation models and promoting a more resilient and sustainable integration of bioenergy into the state's energy mix.

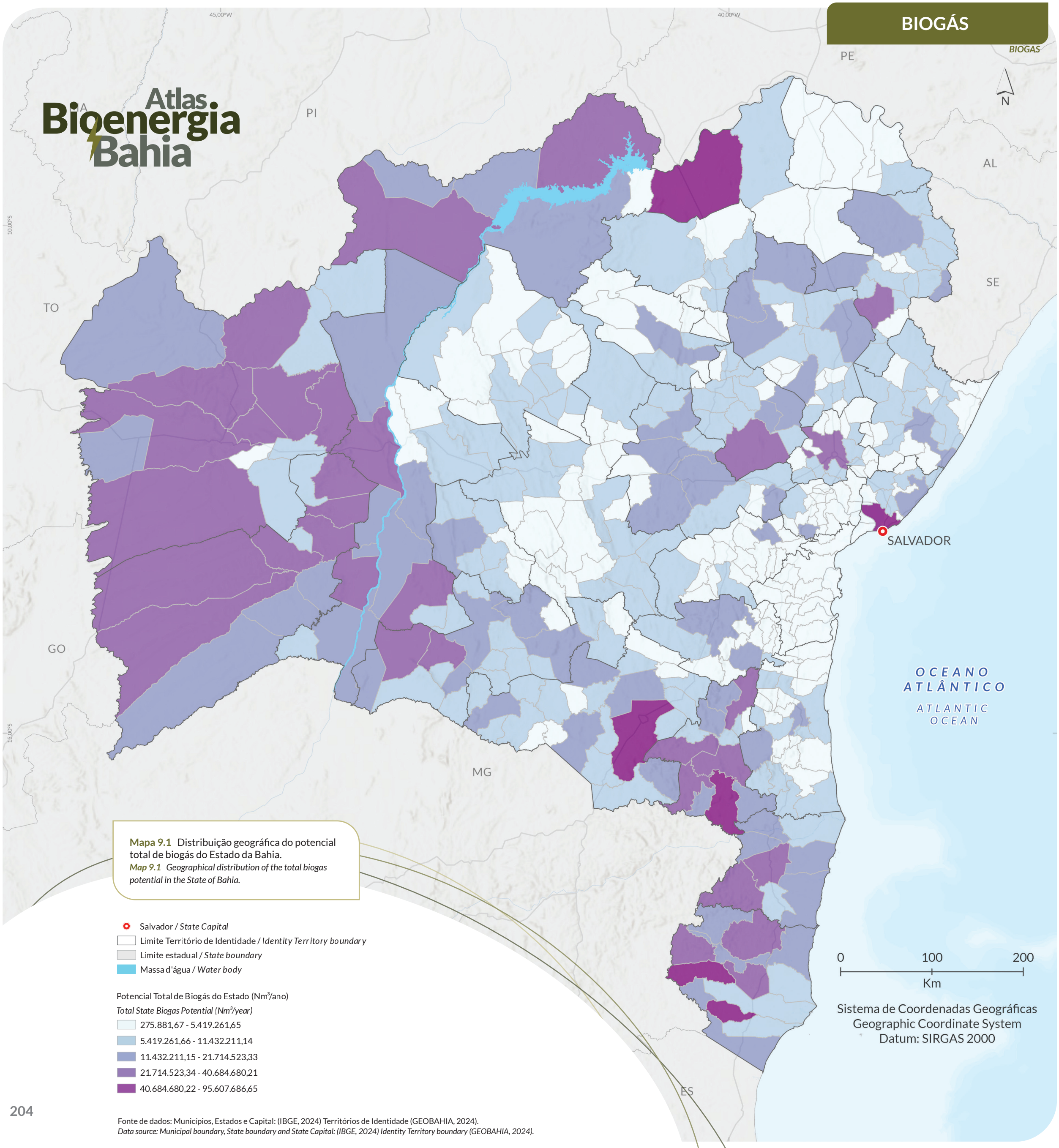
However, realizing these potential faces significant challenges, including economic barriers such as high investment and operational costs, logistical barriers related to biomass and biofuel transport and storage, and regulatory barriers stemming from the absence or limitation of specific policies for biomethane, hydrogen, and distributed generation from biomass.

Overcoming these obstacles requires consistent public policies combined with innovative incentives, appropriate financing mechanisms, and regulatory frameworks that recognize and value environmental attributes, seasonality, and proximity between generation and consumption centers. It also demands business models that enable cooperation among biomass producers, the public sector, and private initiatives, as well as the expansion of collection, transport, and processing infrastructure, especially in medium and small municipalities, to ensure scale and technical feasibility. Technical training and knowledge dissemination for operators, managers, and communities are also essential to strengthen participation and improve the efficiency of implemented systems.

The results confirm that although the percentage share of biofuels and bioelectricity may seem modest compared to the state's total energy consumption, their impact is strategic in diversifying the energy mix, expanding supply to inland regions, and increasing system resilience. Moreover, bioenergy has strong potential to generate socioeconomic benefits such as job creation, value chain development, and the strengthening of local economies.

Thus, the Bahia Bioenergy Atlas not only identifies and quantifies the state's bioenergy potential but also provides concrete support for policy formulation, investment attraction, and the development of sustainable business models aligned with decarbonization targets and the promotion of a low-carbon economy. Its effective implementation can consolidate Bahia as a national benchmark in the sustainable production and use of bioenergy, contributing to a cleaner, more inclusive, and secure energy future.

Atlas Bioenergia Bahia



Mapa 9.1 Distribuição geográfica do potencial total de biogás do Estado da Bahia.
Map 9.1 *Geographical distribution of the total biogas potential in the State of Bahia.*

Salvador / *State Capital*
Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*
Limite estadual / *State boundary*
Massa d'água / *Water body*

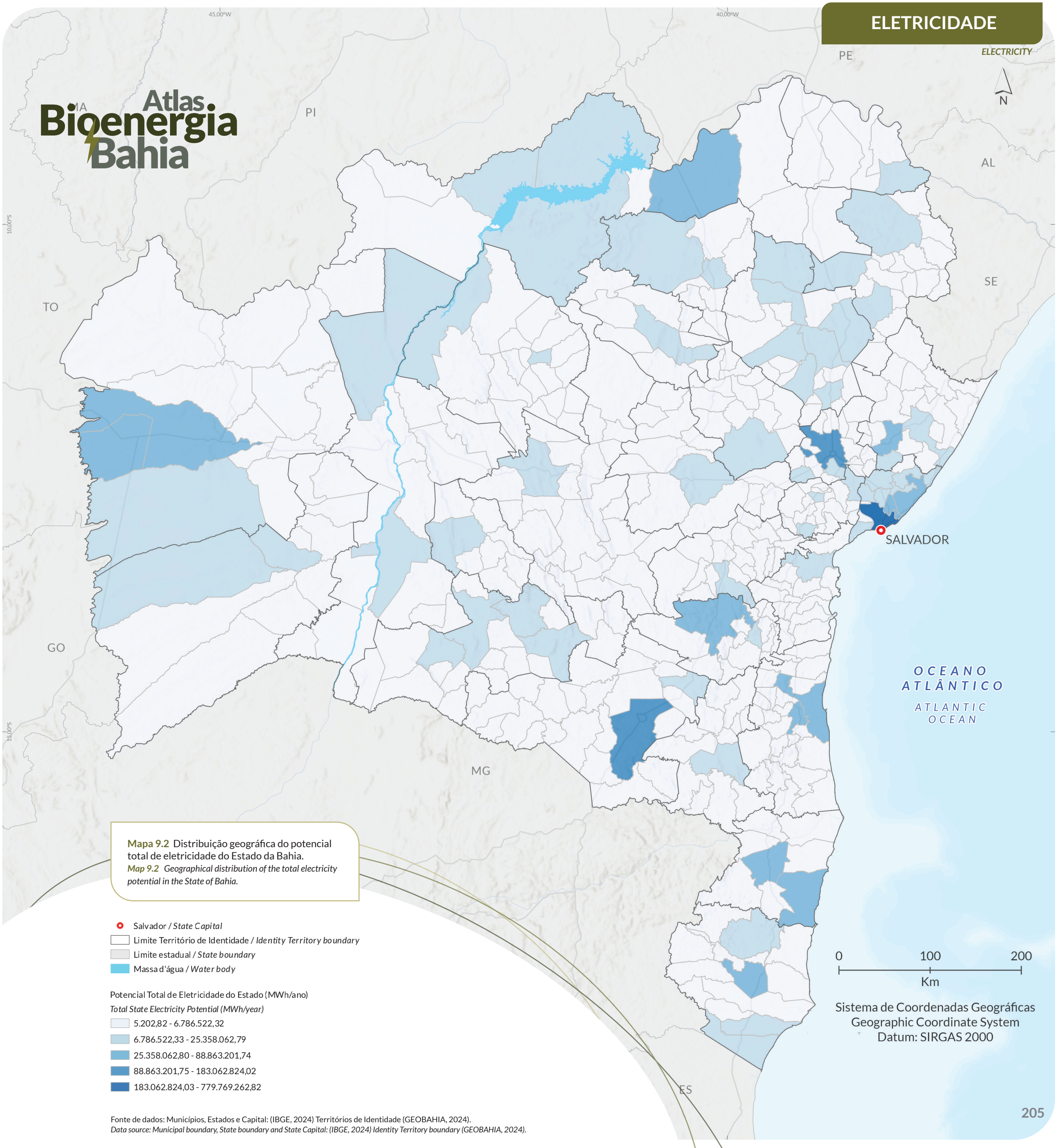
Potencial Total de Biogás do Estado (Nm^3/ano)
Total State Biogas Potential (Nm^3/year)
275.881,67 - 5.419.261,65
5.419.261,66 - 11.432.211,14
11.432.211,15 - 21.714.523,33
21.714.523,34 - 40.684.680,21
40.684.680,22 - 95.607.686,65

Fonte de dados: Municípios, Estados e Capital: (IBGE, 2024) Territórios de Identidade (GEOBAHIA, 2024).
Data source: Municipal boundary, State boundary and State Capital: (IBGE, 2024) Identity Territory boundary (GEOBAHIA, 2024).

ELETRICIDADE

ELECTRICITY

Atlas Bioenergia Bahia



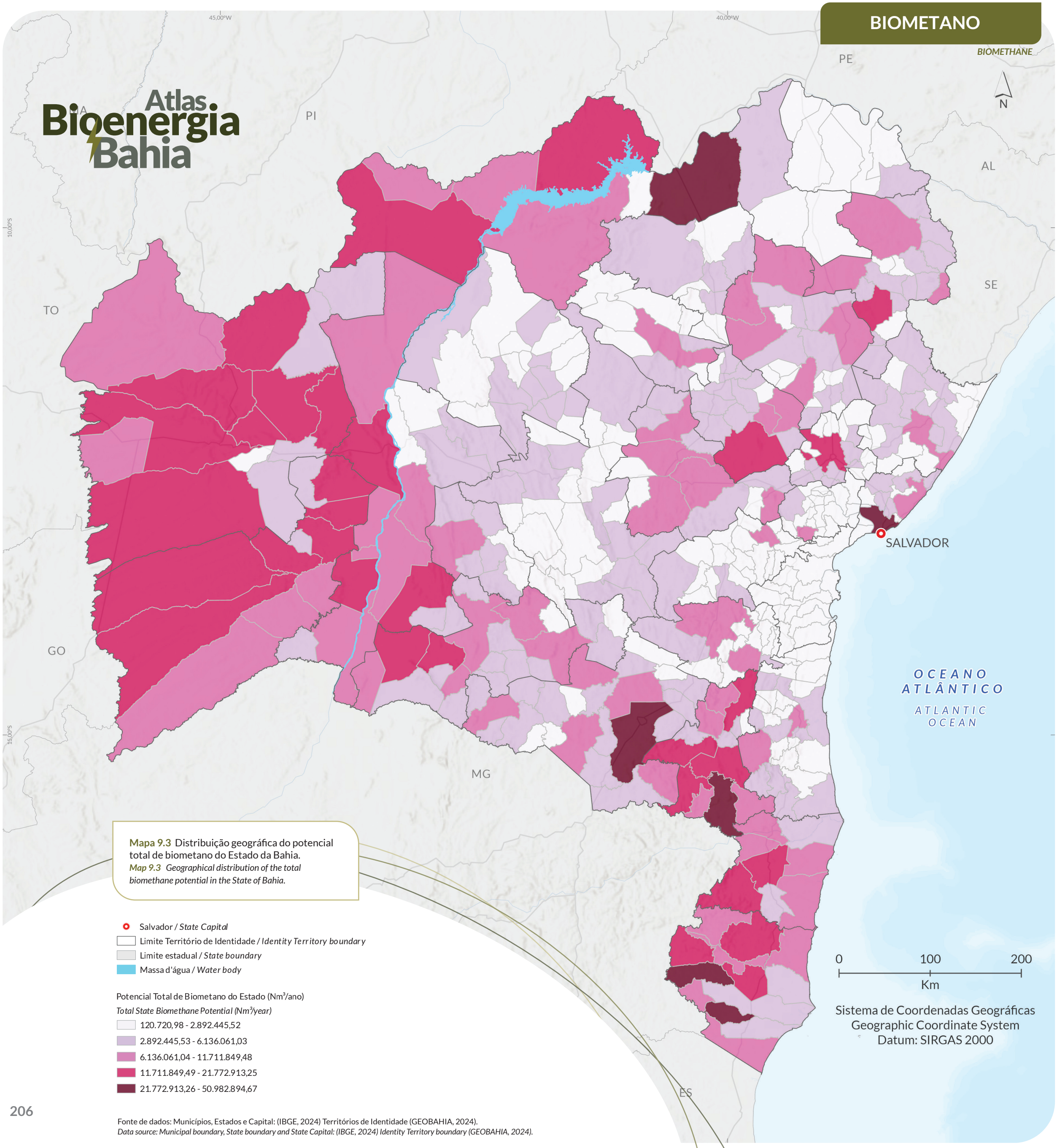
Mapa 9.2 Distribuição geográfica do potencial total de eletricidade do Estado da Bahia.
Map 9.2 *Geographical distribution of the total electricity potential in the State of Bahia.*

Salvador / *State Capital*
Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*
Limite estadual / *State boundary*
Massa d'água / *Water body*

Potencial Total de Eletricidade do Estado (MWh/ano)
Total State Electricity Potential (MWh/year)
5.202,82 - 6.786.522,32
6.786.522,33 - 25.358.062,79
25.358.062,80 - 88.863.201,74
88.863.201,75 - 183.062.824,02
183.062.824,03 - 779.769.262,82

Fonte de dados: Municípios, Estados e Capital: (IBGE, 2024) Territórios de Identidade (GEOBAHIA, 2024).
Data source: Municipal boundary, State boundary and State Capital: (IBGE, 2024) Identity Territory boundary (GEOBAHIA, 2024).

Atlas Bioenergia Bahia



Mapa 9.3 Distribuição geográfica do potencial total de biometano do Estado da Bahia.
Map 9.3 *Geographical distribution of the total biomethane potential in the State of Bahia.*

Salvador / *State Capital*
Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*
Limite estadual / *State boundary*
Massa d'água / *Water body*

Potencial Total de Biometano do Estado (Nm^3/ano)
Total State Biomethane Potential (Nm^3/year)
120.720,98 - 2.892.445,52
2.892.445,53 - 6.136.061,03
6.136.061,04 - 11.711.849,48
11.711.849,49 - 21.772.913,25
21.772.913,26 - 50.982.894,67

Fonte de dados: Municípios, Estados e Capital: (IBGE, 2024) Territórios de Identidade (GEOBAHIA, 2024).
Data source: Municipal boundary, State boundary and State Capital: (IBGE, 2024) Identity Territory boundary (GEOBAHIA, 2024).

Atlas Bioenergia Bahia

45,00°W
40,00°W
10,00°S
15,00°S
N
PE
PI
AL
SE
TO
GO
MG
ES
SALVADOR
OCEANO ATLÂNTICO
ATLANTIC OCEAN

Mapa 9.4 Distribuição geográfica do potencial total de hidrogênio do Estado da Bahia - tecnologias térmicas WtE e biometano.
Map 9.4 *Geographical distribution of the total hydrogen potential in the State of Bahia - thermal WtE technologies and biomethane.*

Salvador / *State Capital*
Limite Território de Identidade / *Identity Territory boundary*
Limite estadual / *State boundary*
Massa d'água / *Water body*

Potencial Total de Hidrogênio do Estado – WtE + Biometano (Nm³/ano)
Total State Hydrogen Potential – WtE + Biomethane (Nm³/year)
1.259.495,36 - 9.194.512,45
9.194.512,46 - 19.426.199,35
19.426.199,36 - 34.020.664,31
34.020.664,32 - 62.549.662,58
62.549.662,59 - 119.715.703,57

0 100 200
Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Geographic Coordinate System
Datum: SIRGAS 2000

Fonte de dados: Municípios, Estados e Capital: (IBGE, 2024) Territórios de Identidade (GEOBAHIA, 2024).
Data source: Municipal boundary, State boundary and State Capital: (IBGE, 2024) Identity Territory boundary (GEOBAHIA, 2024).

Atlas Bioenergia Bahia

APÊNDICES

APPENDICES

A. MODELO MATEMÁTICO E PARÂMETROS USADOS NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).

A. MATHEMATICAL MODEL AND PARAMETERS USED IN THE ENERGY RECOVERY FROM MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW).

- **RSU em aterros sanitários** / ***MSW in sanitary landfills***

A fração de carbono orgânico degradável (DOC) nos resíduos sólidos urbanos foi determinada considerando a composição gravimétrica dos RSU, conforme descrito a seguir [1]: / *The fraction of degradable organic carbon (DOC) in municipal solid waste was determined considering the gravimetric composition of MSW, as described below [1]:*

$$DOC = \sum (DOC_i \times W_i)$$

Equação A.1
Equation A.1

Onde: / *Where*:
DOC = Fração de carbono orgânico degradável nos RSU (tC/tRSU); / *Fraction of degradable organic carbon in MSW (tC/tMSW)*;
DOC_i = Fração de carbono orgânico degradável no tipo de resíduo i, de acordo com os valores de [1], apresentados na *Tabela A.1*; / *Fraction of degradable organic carbon in waste type i, according to the values in [1], presented in Table A.1*;
W_i = Fração do tipo de resíduo i por categoria de resíduo. / *Fraction of waste type i by waste category.*

Tabela A.1 - Valores da fração de carbono degradável de acordo com os componentes no fluxo de resíduos do Estado da Bahia. / *Table A.1 - Values of the fraction of degradable carbon according to the components in the waste stream of the State of Bahia.*

Categoria / *Category*	**DOC (%) Resíduos úmidos** / *Wet waste*
Matéria Orgânica / *Organic Material*	15
Papel/papelão / *Paper/cardboard*	40
Têxteis / *Textiles*	24
Resíduos Sanitários / *Sanitary Waste*	24

Fonte: Adaptado de [1]. / *Source: Adapted from [1].*

O potencial específico de geração de metano (L_0) foi calculado considerando o envio integral dos resíduos mistos para aterros sanitários e desconsiderando emissões de anos anteriores, conforme a equação a seguir: / *The specific methane generation potential (L_0) was calculated considering the full shipment of mixed waste to sanitary landfills and disregarding emissions from previous years, according to the following equation:*

$$L_o = \frac{\left(MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times \left(\frac{16}{12}\right)\right)}{\rho_{CH_4}}$$

Equação A.2
Equation A.2

Onde / *Where*:
L_o = Potencial de geração de metano de RSU depositado em aterro sanitário (Nm^3 CH_4/ tRSU); / *Methane generation potential of MSW deposited in a sanitary landfill (Nm^3 CH_4/ tMSW)*;
MCF = Fator de correção de metano; igual a 1 para aterro bem gerenciado [1]; / *Methane correction factor; equal to 1 for a well-managed sanitary landfill [1]*;
DOC = Fração de carbono orgânico degradável no RSU (tC/tRSU); / *Fraction of degradable organic carbon in MSW (tC/tMSW)*;
DOC_f = Fração do DOC degradada (t/tRSU); igual a 0,50 [1]; / *Fraction of degraded DOC (t/tMSW); equal to 0.50 [1]*;
F = Porcentagem de metano presente no biogás de aterro sanitário: 50% conforme [2]; / *Percentage of methane present in sanitary landfill biogas: 50% according to [2]*;
(16/12) = Conversão de carbono (C) em metano (CH_4); / *Conversion of carbon (C) to methane (CH_4)*;
CH_4 = Densidade do metano; igual a 0,00071680 tCH_4/ Nm^3 CH_4. / *Density of methane; equal to 0.00071680 tCH_4/ Nm^3 CH_4.*

O potencial de biometano, considerando pureza de 90% de metano no gás purificado, foi obtido conforme a seguinte equação: / *The biomethane potential, adopting a methane purity of 90% in the upgraded gas, was calculated according to the following equation:*

$$V_{biometano} = V_{biogás} \times [CH_4]_{biogás} \times \eta \times FO$$
$$V_{biom} = V_{biogas} \times [CH_4]_{biogas} \times \eta \times OF$$

Equação A.3
Equation A.3

Onde / *Where*:
V_{biom} = Volume de biometano produzido por ano, em cada município para os cenários real e ideal (Nm^3/ano); / *Volume of biomethane produced per year in each municipality for the actual and ideal scenarios (Nm^3/year)*;
$V_{biogás}$ = Volume de biogás captado em aterro sanitário, em cada município para os cenários real e ideal (Nm^3 biogás captado/ano); adotou-se 75% de captura, considerando a eficiência do sistema de extração [2]; / *Volume of biogas captured in sanitary landfills in each municipality under the real-world and ideal scenarios (Nm^3 of captured biogas per year). A 75% capture rate was adopted, considering the extraction system efficiency according to [2]*;
CH_4biogás = Concentração de metano presente no biogás de aterro sanitário: 50% conforme [2]; / *Methane concentration present in sanitary landfill biogas: 50% according to [2]*;
η = eficiência de purificação do biometano (90%) [3]; / *upgrading efficiency of biomethane (90%) [3]*
FO= Fator de operação do sistema (85%) / *OF : System operating factor (85%)*

O potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás captado foi obtido conforme equação abaixo: / *The potential for generating electricity from the captured biogas was obtained according to the equation below:*

$$EE = \frac{V_{biogás} \times [CH_4]_{biogás} \times PCI_{CH_4} \times Ef_{ele}}{1.000} \times FO$$
$$EE = \frac{V_{biogas} \times [CH_4]_{biogas} \times LHV_{CH_4} \times Ef_{ele}}{1{,}000} \times OF$$

Equação A.4
Equation A.4

Onde / Where:
EE = Potencial geração de energia elétrica por ano a partir do biogás gerado em aterros sanitários, em cada município para os cenários real e ideal (MWh/ano); / *Potential annual electricity generation from biogas generated in landfills, in each municipality for the real-world and ideal scenarios (MWh/year);*
$V_{biogás}$ = Volume de biogás captado em aterro sanitário, em cada município para os cenários real e ideal (Nm^3 biogás captado/ano) - presume-se que 75% do biogás é captado, considerando a eficiência do sistema de extração, conforme [2]; / *Volume of biogas captured in landfills, in each municipality for the real-world and ideal scenarios (Nm^3 captured biogas/year) - it is assumed that 75% of the biogas is captured, considering the efficiency of the extraction system, according to [2];*
CH_4biogás = Concentração de metano presente no biogás de aterro sanitário: 50% conforme [2]; / *Methane concentration present in landfill biogas: 50% according to [2]*;
PCI_{CH_4}= Poder Calorífico Inferior do metano: 9,97 kWh/m^3CH_4, conforme [4]; / *LHV_{CH_4} Lower Heating Value of methane: 9.97 kWh/m^3CH_4, according to [4]*;
Ef_{ele} = Eficiência de conversão energética para motor ciclo Otto a biogás (0,35 para vazões de biogás de até 5.000 Nm^3/dia e de 0,42 para vazões acima 5.000 Nm^3/dia, conforme metodologia fornecida por [5]; / = *Energy conversion efficiency for a biogas-powered Otto cycle engine (0.35 for biogas flow rates up to 5,000 Nm^3/day and 0.42 for flow rates above 5,000 Nm^3/day, according to the methodology provided by [5]*;
1.000 =Conversão de kWh para MWh; / *1,000 = Conversion from kWh to MWh*;
FO = Fator de operação do sistema de produção de biometano (85%)./ *OF = Operating factor of the biomethane production system (85%).*

Para a produção de hidrogênio a partir de biometano, a eficiência de conversão do processo foi determinada com base na produção de 1 kg de hidrogênio, conforme estabelecido na *Equação A5*, utilizando os dados técnicos apresentados na *Tabela A.2.* / *For hydrogen production from biomethane, the process conversion efficiency was determined based on the production of 1 kg of hydrogen, as established in Equation A5, using the technical data presented in Table A.2.*

$$\eta_{proc.} = \frac{m_{H_2}.PCI_{H_2}}{V_{bio}.\rho_{bio}.PCI_{bio} + DE_{proc.}}$$
$$\eta_{proc.} = \frac{m_{H_2} \times LHV_{H_2}}{V_{biom} \times \rho_{biom} \times LHV_{biom} + ED_{proc.}}$$

Equação A.5
Equation A.5

Onde / *Where:*
$\eta_{proc.}$ = Eficiência de conversão de energia na produção de hidrogênio; / *Energy conversion efficiency in hydrogen production;*
m_{H_2} = Potencial de produção de hidrogênio (1 kg); / *Hydrogen production potential (1 kg);*
PCI_{H_2} = Poder Calorífico Inferior do hidrogênio (kcal/kg); / *Lower Heating Value of hydrogen (kcal/kg);*
V_{biom} = Volume de biometano necessário para produzir 1 kg de H_2 (Nm^3); / *Volume of biomethane required to produce 1 kg of H_2 (Nm^3);*
P_{biom} = Densidade mássica do biometano (kg/Nm^3); / = *Mass density of biomethane (kg/Nm^3);*
PCI_{biom}= Poder Calorífico Inferior da matéria-prima (kcal/kg); / *Lower Heating Value of the feedstock (kcal/kg);*
$DE_{proc.}$ = Demanda Energética no processo para produzir 1 kg de H_2 (kcal). / $ED_{proc.}$ *= Energy Demand in the process to produce 1 kg of H_2 (kcal).*

Tabela A.2 - Especificações técnicas usadas para estimativa de produção de hidrogênio. / *Table A.2 - Technical specifications used to estimate hydrogen production.*

Matéria-prima *Feedstock*	**Biometano** *Biomethane*
Consumo de matéria-prima / *Feedstock consumption*	4,85 Nm^3/kg H_2
Consumo de água / *Water consumption*	0,035 m^3 H_2O/kg H_2
Demanda de energia no processo / *Energy demand in the process*	557 kcal/kg H_2
Processo de purificação do H_2* / *H_2 upgrading process**	PSA
Poder Calorífico Inferior / *Lower Heating Value*	10.960 kcal/kg
Eficiência do gás (CGE) / *Gas efficiency*	71,9%
Densidade Mássica / *Mass density*	0,7541 kg/Nm^3

*PCI_{H_2}: 28.700 kcal/kg; densidade mássica H_2: 0,0899 kg/Nm^3 (101,3 kPa; 30 °C).
Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [4,6,7,8].
*: *28,700 kcal/kg; H_2 mass density: 0.0899 kg/Nm^3 (101.3 kPa; 30 °C).*
Source: prepared by the authors based on data from [4,6,7,8].

A estimativa do conteúdo térmico do hidrogênio produzido *(Thermal Content of the Hydrogen Product – TP)* foi realizada com base na equação a seguir: / *The thermal content of the hydrogen product (TP) was estimated using the following equation:*

$$\eta_{CGE} = \frac{TP}{TI} \times 100$$

Equação A.6
Equation A.6

Onde / *Where:*
ηCGE = Eficiência do gás (%): 71,9% conforme [7]; / = *Gas efficiency (%): 71.9% according to [7];*
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (MJ/ano); / *Hydrogen thermal content (MJ/year);*
TI = Entrada térmica no sistema (MJ/ano) - determinada com base na taxa de alimentação do biometano (kg/ano) multiplicada pelo poder calorífico inferior (PCI) do biometano, conforme indicado na *Tabela A.2.* / *Thermal input in the system (MJ/year) - determined based on the biomethane feed rate (kg/year) multiplied by the biomethane's lower heating value (LHV), as shown in Table A.2.*

Para o cálculo da potência líquida do sistema (Pnet) aplicou-se a equação: / *To calculate the system's net power, the following equation was applied:*

$$\eta_{proc} = \frac{TP + Pnet}{TI} \times 100$$

Equação A.7
Equation A.7

Onde / *Where:*
$\eta_{proc.}$ = Eficiência de conversão de energia na produção de hidrogênio; / *Energy conversion efficiency in hydrogen production;*
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (MJ/ano); / *Hydrogen thermal content (MJ/year);*
Pnet: Potência Líquida do Sistema (MJ/ano); / *System´s net power (MJ/year);*
TI = Entrada térmica no sistema (MJ/ano) - determinada com base na taxa de alimentação do biometano (kg/ano) multiplicada pelo poder calorífico inferior (PCI) do biometano, conforme indicado na *Tabela A.2.* / *Thermal input in the system (MJ/year) - determined based on the biomethane feed rate (kg/year) multiplied by the biomethane's lower heating value (LHV), as shown in Table A.2.*

Por fim, o potencial de produção de hidrogênio via reforma a vapor do biometano foi estimado a partir da seguinte equação: / *Finally, the hydrogen production potential via steam reforming of biomethane was estimated using the following equation:*

$$m_{H_2} = \frac{TP}{PCI_{H_2}}$$

$$m_{H_2} = \frac{TP}{LHV_{H_2}}$$

Equação A.8
Equation A.8

Onde / Where:
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (kcal/ano); / *Hydrogen thermal content (kcal/year);*
m_{H_2} = Fluxo mássico de hidrogênio (kg/ano); / *Hydrogen mass flow rate (kg/year);*
PCI_{H_2} = Poder Calorífico Inferior do hidrogênio (kcal/kg). / *Hydrogen lower heating value (kcal/kg).*

- **Fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (Forsu) / *Organic fraction of municipal solid waste (OFMSW)***

O potencial de produção de biogás a partir do tratamento anaeróbio da matéria orgânica dos RSU foi obtido conforme *Equação A.9.* / *The potential for biogas production from the anaerobic treatment of organic matter in MSW was obtained according to Equation A.9.*

$$V_{biogás} = MO_{RSU} \times F_{MO}$$

$$V_{biogas} = OM_{MSW} \times F_{OM}$$

Equação A.9
Equation A.9

Onde / *Where:*
$V_{biogás}$ = Volume do biogás produzido a partir do tratamento anaeróbio da matéria orgânica do RSU (Nm^3/ano); / *Volume of biogas produced from the anaerobic treatment of organic matter in MSW (Nm^3/year);*
MO RSU = Quantidade de matéria orgânica presente no RSU (t/ano); / *Quantity of organic matter present in MSW (t/year);*
F_{MO} = Fator de produção de biogás a partir do tratamento anaeróbio da matéria orgânica do RSU (101,5 Nm^3/t de resíduo, com 55% de CH_4) [9]. / *Biogas production factor from the anaerobic treatment of organic matter in MSW (101.5 Nm^3/t of waste, with 55% CH_4) [9].*

O modelo matemático utilizado para estimar o biometano disponível, derivado do biogás gerado no tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU, está descrito na equação: / *The mathematical model used to estimate the available biomethane, derived from the biogas generated in the anaerobic treatment of the organic fraction of MSW, is described in the equation*

$$V_{biometano} = V_{biogás} \times [CH_4]_{biogás} \times \eta \times FO$$

$$V_{biom} = V_{biogas} \times [CH_4]_{biogas} \times \eta \times OF$$

Equação A.10
Equation A.10

Onde / *Where:*
$V_{biometano}$ = Volume de biometano produzido por ano, em cada município para ambos os cenários (real e ideal) (Nm^3/ano); / *Volume of biomethane produced per year in each municipality for both scenarios (real-world and ideal) (Nm^3/year);*
$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido por ano (Nm^3/ano); / *Volume of biogas produced per year (Nm^3/year);*
$CH_{4biogás}$ = Concentração de metano presente no biogás do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU: 55% conforme [9]; / *Methane concentration present in the biogas from the anaerobic treatment of the organic fraction of MSW: 55% according to [9];*
η = eficiência de purificação do biometano (90%) [3]; / *upgrading efficiency of biomethane (90%) [3];*
FO = Fator de operação do sistema (85%). / *System operating factor (85%).*

O potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás captado foi obtido conforme equação abaixo: / *The potential for generating electricity from the captured biogas was obtained according to the equation below:*

$$EE = \frac{V_{biogás} \times [CH_4]_{biogás} \times PCI_{CH_4} \times Ef_{ele}}{1000} \times FO$$

$$EE = \frac{V_{biogas} \times [CH_4]_{biogas} \times LHV_{CH_4} \times Ef_{ele}}{1{,}000} \times OF$$

Equação A.11
Equation A.11

Onde / *Where:*
EE = Potencial de geração de energia elétrica por ano a partir do biogás oriundo do tratamento anaeróbio da Forsu, em cada município para ambos os cenários (real e ideal) (MWh/ano); / *Potential for generating electricity per year from biogas from OFMSW anaerobic treatment, in each municipality for both scenarios (actual and ideal) (MWh/year);*
$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido (Nm^3/ano); / *Volume of biogas produced (Nm^3/year);*
$CH_{4biogás}$ = Concentração de metano presente no biogás oriundo do tratamento anaeróbio da Forsu: 55% conforme [9]; / *Methane concentration present in biogas from OFMSW anaerobic treatment: 55% according to [9];*
PCI_{CH_4} = Poder Calorífico Inferior do metano (kWh/Nm^3CH_4): 9,97 kWh/m^3CH_4, conforme [4]; / *Lower Heating Value of methane (kWh/Nm^3CH_4): 9.97 kWh/m^3CH_4, according to [4];*
Ef_{ele} = Eficiência de conversão energética para motor ciclo Otto a biogás: 0,35 para vazões de biogás de até 5 mil Nm^3/dia e de 0,42 para vazões acima 5 mil Nm^3/dia, conform.e [5] ; / *Energy conversion efficiency for a biogas-powered Otto cycle engine: 0.35 for biogas flow rates up to 5,000 Nm^3/day and 0.42 for flow rates above 5,000 Nm^3/day, according to [5];*
FO = Fator de operação do sistema de produção de biometano (85%); *Operating factor of the biomethane production system (85%);*
1000 = Conversão de kWh para MWh. / *1,000 = Conversion from kWh to MWh.*

Para o potencial de produção de hidrogênio a partir do biometano, seguem-se as equações A.5 a A.8. / *For the potential hydrogen production from biomethane, equations A.5 to A.8 follow.*

- **Modelo matemático usado na valorização dos rejeitos dos RSU / *Mathematical model used in the valorization of residual waste fom MSW***

A energia de entrada do sistema de gaseificação foi estimada considerando os dados disponíveis em [11], conforme apresentado na *Tabela A.3.* Aplicando-se a equação a seguir: / *The input energy of the gasification system was estimated considering the data available in [11], as presented in Table A.3. Applying the following equation:*

$$Ee = \dot{m}_{RSU} \times \eta_{conv} \times PCI_{CDRU}$$

$$Ee = \dot{m}_{MSW} \times \eta_{conv} \times LHV_{RDF}$$

Equação A.12
Equation A.12

Onde / *Where:*
Ee= Energia de entrada (MJ/h); / *Input energy (MJ/h);*
m_{RSU}= Fluxo mássico de CDRU (kg/h); / *Mass flow rate of MSW (kg/h);*
PCI_{CDRU}= Poder Calorífico Inferior do CDRU, base úmida (MJ/kg); / *Lower Heating Value of RDF, wet basis (MJ/kg);*
ηconv= Eficiência de conversão do RSU em CDRU (%). / *Conversion efficiency of MSW to RDF (%).*

Tabela A.3 - Condições de operação dos sistemas térmicos. /
Table A.3 - Operating conditions of thermal systems.

Gaseificação *Gasification*			**Incineração** *Incineration*	
PCI do *syngas* (MJ/Nm^3) *Syngas LHV (MJ/Nm^3)*		5,95	PCI do RSU (MJ/kg) *LHV of MSW (MJ/kg)*	10
Eficiência de conversão de RSU a CDRU (%) / *MSW to RDF conversion efficiency (%)*		56	Eficiência de conversão elétrica (%) / *Electrical conversion efficiency (%)*	30
PCI_{CDRU} (MJ/kg) LHV_{RDF} *(MJ/kg)*	Leito fluidizado / *Fluidized bed*	20,50	Fator de capacidade de operação (h/ano) (efic.80%) /*Operating capacity factor (h/year)(80% efficiency)*	7.008
	Leito fixo / *Fixed bed*	26,70		
Fator de carga (%) / *Load factor (%)*		87		
Eficiência de conversão de CDRU a *syngas* (%) / *RDF to syngas conversion efficiency (%)*		70		

Fonte: Elaborado pelos autores com base em dados de [2,10,11].
Source: Prepared by the authors based on data from [2,10,11].

A vazão volumétrica do *syngas* do sistema de gaseificação foi estimada conforme metodologia de [2], aplicando-se a equação a seguir e considerando os dados apresentados na *Tabela A.3.* / *The syngas volumetric flow rate of the gasification system was estimated according to the methodology in [2], applying the following equation and considering the data presented in Table A.3.*

$$\dot{Q} = \frac{Ee}{PCI_{syngas}}$$

$$\dot{Q} = \frac{E_e}{LHV_{syngas}}$$

Equação A.13
Equation A.13

Onde / *Where:*
Q̇ = Vazão do *syngas* (Nm^3/h); / *Syngas flow rate (Nm^3/h);*
Ee = Energia de entrada (MJ/h); / *Input energy (MJ/h);*
PCI_{syngas} = Poder calorífico inferior do *syngas* (MJ/Nm^3). / *Lower Heating Value of syngas (MJ/Nm^3).*

O cálculo da potência elétrica do *syngas* da gaseificação foi realizado aplicando-se a equação: / *The electrical power of the gasification syngas was calculated by applying the equation:*

$$P = \left(\frac{Q \times PCI_{syngas} \times \eta_{motor}}{fc}\right) \times FC_{motor}$$

$$P = \left(\frac{Q \times LHV_{syngas} \times \eta_{motor}}{cf}\right) \times CF_{motor}$$

Equação A.14
Equation A.14

Onde / *Where:*
P = Potência disponível (MW); / *Available power (MW);*
Q = Vazão do *syngas* (Nm^3/h); / *Syngas flow rate (Nm^3/h);*
PCI_{syngas} = Poder Calorífico Inferior do *syngas* (MJ/Nm^3); / *Lower Heating value of syngas (MJ/Nm^3);*
η_{Motor} = Eficiência térmica do motor (%); / *Motor thermal efficiency (%);*
FC_{motor} = Fator de capacidade do motor (95%); / *Motor capacity factor (95%);*
Fc = fator de conversão de MJ/h para MW (3.600). / *MJ/h to MW conversion factor (3,600).*

A geração de energia elétrica disponível a partir da gaseificação foi calculada considerando-se os dados apresentados na *Tabela A.3*, aplicados à equação: / *The available electricity generation potential from gasification was calculated using the data presented in Table A.3, and applied to the equation:*

$$E = P \times FO$$

$$E = P \times OF$$

Equação A.15
Equation A.15

Onde / *Where:*
E = Energia elétrica disponível (MWh/ano); / *Available electricity generation potential (MWh/year);*
P = Potência disponível (MW); / *Available power (MW);*
FO = Fator de operação (7.446 h/ano). / *Operating factor (7,446 h/year).*

Para o cálculo da geração de energia elétrica disponível a partir da incineração, consideraram-se os dados apresentados na *Tabela A.3*, aplicados à equação: / *For the calculation the available electricity generation potential from incineration, the data presented in Table A.3, were applied to the equation:*

$$E = t_{RSU} \times PCI_{RSU} \times \eta \times FO$$

$$E = t_{MSW} * LHV_{msw} * \eta * OF$$

Equação A.16
Equation A.16

Onde / *Where:*
E = Energia elétrica disponível (MWh); / *Available electrical energy (MWh);*
t_{RSU} = Tonelada de RSU (t/ano); / *Tons of MSW (t/year);*
PCI_{RSU} = Poder calorífico inferior do RSU (MWh/t); / *Lower Heating Value of MSW (MWh/t);*
η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%); / *System electrical conversion efficiency (%);*
FO = Fator de operação do sistema (80%). / *System operating factor (80%).*

Por fim, a potência elétrica disponível a partir da incineração foi estimada a partir da equação: / *Finally, the electric power available from incineration was estimated from the equation:*

$$P = \frac{E}{fc}$$

Equação A.17
Equation A.17

Onde / *Where:*
E = Energia elétrica disponível (MWh); / *E = Available electrical energy (MWh);*
P = Potência anual (MW); / *P = Annual power (MW);*
fc = Fator de capacidade de operação (h/ano) (efic.80%). / *fc = Operating capacity factor (h/year) (80% efficiency).*

- **Hidrogênio a partir da gaseificação de CDRU / *Hydrogen from RDF gasification***

A vazão do *syngas* foi obtida a partir da equação a seguir: / *The syngas flow rate was obtained from the following equation:*

$$\dot{Q} = \frac{Ee}{PCI_{syngas}}$$

$$\dot{Q} = \frac{Ee}{LHV_{syngas}}$$

Equação A.18
Equation A.18

Onde / *Where:*
$\dot{Q}$ = Vazão do *syngas* (Nm^3/ano); / *Syngas flow rate (Nm^3/year);*
Ee = Energia de entrada (MJ/ano); / *Input energy (MJ/year);*
PCI_{syngas} = Poder Calorífico Inferior do *syngas* (MJ/Nm^3). / *Lower Heating Value of syngas (MJ/Nm^3).*

Para a obtenção da vazão de hidrogênio aplicou-se a seguinte equação: / *To obtain the hydrogen flow rate, the following equation was applied:*

$$H_2 = \left(Q \times x_{H_2} + (Q \times x_{CO}) \times \eta_{conv.RX}\right) \times \eta$$

Equação A.19
Equation A.19

Onde / *Where:*
H_2 = Vazão de hidrogênio (Nm^3/ano); / *Hydrogen flow rate (Nm^3/year);*
Q = Vazão do *syngas* (Nm^3/ano); / *Syngas flow rate (Nm^3/year);*
x_{H_2} = Fração molar de hidrogênio no *syngas*; / *Mole fraction of hydrogen in the syngas;*
x_{CO} = Fração molar do monóxido de carbono no *syngas*; / *Mole fraction of carbon monoxide in the syngas;*
$\eta_{conv.RX}$ = Eficiência de conversão da reação WGS (75%); / *Conversion efficiency of the WGS reaction (75%);*
η = Eficiência de recuperação de hidrogênio (75%). / *Hydrogen recovery efficiency (75%).*

B. MODELO MATEMÁTICO E PARÂMETROS USADOS NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE ESGOTO SANITÁRIO.

B. MATHEMATICAL MODEL AND PARAMETERS USED IN THE ENERGY RECOVERY FROM SANITARY SEWAGE.

O cálculo do volume de esgoto sanitário produzido ou coletado em cada município analisado neste estudo foi realizado por meio da seguinte equação: / *The calculation of the volume of sanitary sewage produced or collected in each municipality analyzed in this study was performed using the following equation:*

$$EC = (n^{o}_{hab} \times GM_{esg} \times \%coleta \times 365)$$

$$EC = (n^{o}_{inhab} \times AG_{swg} \times \%collect \times 365)$$

Equação B.1
Equation B.1

Onde / *Where:*
EC = Volume de esgoto sanitário coletado/tratado por município em metros cúbicos por ano (m^3/ano); / *Volume of sanitary sewage collected/treated per municipality in cubic meters per year (m^3/year);*
$n°_{hab}$ = Número total de habitantes residentes no município (hab); / *Total number of residents in the municipality (inhab);*
GM_{esg} = Geração média per capita de esgoto sanitário (m^3/hab/dia); / *Average per capita sanitary sewage generation (m^3/inhab/day);*
$\%_{coleta}$ = Porcentagem coletada de esgoto sanitário em cada município (para o cenário real considera-se o percentual de coleta de esgoto sanitário e para o cenário ideal considera-se 100% de coleta do esgoto sanitário produzido); / *Percentage of sanitary sewage collected in each municipality (for the actual scenario, the percentage of sewage collection is considered, and for the ideal scenario, 100% collection of the sewage produced is considered);*
365 = Dias por ano (dia/ano). / *Days per year (day/year).*

A quantificação da geração de metano (CH_4) a partir do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário foi obtida com base na equação apresentada a seguir: / *The quantification of methane (CH_4) generation from the anaerobic treatment of sanitary sewage was obtained based on the following equation:*

$$V_{metano} = EC \times DQO_{média} \times P_{CH_4} \times Ef_{rem}$$

$$V_{methane} = SC \times COD_{average} \times P_{CH_4} \times Ef_{rem}$$

Equação B.2
Equation B.2

Onde / *Where:*
V_{metano} = Volume de metano produzido por ano a partir do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário, em cada município para ambos os cenários (real e ideal) (Nm^3/ano); / *Volume of methane produced per year from the anaerobic treatment of sanitary sewage, in each municipality for both scenarios (actual and ideal) (Nm^3/year);*
EC = Volume de esgoto sanitário coletado/tratado em metros cúbicos por ano (m^3/ano), em cada município para ambos os cenários (real e ideal); / *Volume of sanitary sewage collected/treated in cubic meters per year (m^3/year), in each municipality for both scenarios (actual and ideal);*
$DQO_{média}$ = Demanda Química de Oxigênio média do esgoto sanitário (kg DQO/m^3 esgoto); / *Average Chemical Oxygen Demand of sanitary sewage (kg DQO/m^3 sewage);*
P_{CH_4} = Potencial de geração de metano (Nm^3CH_4/kg DQO removida); / *Methane generation potential (Nm^3CH_4/kg COD removed);*
Ef_{rem} = Eficiência de remoção de DQO (65%, conforme dados enviados pelo Senai Cimatec e Embasa). / *COD removal efficiency (65%, according to data submitted by Senai/Cimatec and Embasa).*
O estado da Bahia ainda não dispõe de uma estimativa específica para a produção de metano a partir do biogás gerado no tratamento de esgoto sanitário. Nesse contexto, a *Embasa* recomendou a adoção do valor de referência utilizado pela Sabesp, 0,1115 Nm^3CH_4/kgDQOremovida, o mesmo empregado no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo [2]. / *The State of Bahia does not yet have a specific estimate for methane production from biogas generated in the treatment of sanitary sewage. In this context, Embasa recommended adopting the reference value used by* Sabesp, *0.1115 Nm^3CH_4/kgDQOremovida, the same one used in the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [2].
Para a estimativa do volume de metano produzido por ano a partir do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário, considerou-se o valor de 70% de metano presente no biogás, percentual adotado em razão da ausência de análise específica para o estado da Bahia, sendo esse o valor de referência sugerido pela *Embasa* com base no utilizado pela Sabesp e aplicado no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo [12]. / *For the estimation of the volume of methane produced per year from the anaerobic treatment of sanitary sewage, the value of 70% methane present in biogas was considered, a percentage adopted due to the absence of specific analysis for the State of Bahia, this being the reference value suggested by Embasa based on that used by* Sabesp *and applied in the Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo* [12].

O modelo matemático utilizado para estimar o biometano disponível, derivado do biogás gerado no tratamento anaeróbio do esgoto sanitário, está descrito na equação abaixo. / *The mathematical model used to estimate the available biomethane, derived from the biogas generated in the anaerobic treatment of sanitary sewage, is described in the equation below.*

$$V_{biometano} = V_{biogás} \times [CH_4]_{biogás} \times \eta \times FO$$

$$V_{biomethane} = V_{biogas} \times [CH_4]_{biogas} \times \eta \times \text{OF}$$

Equação B.3
Equation B.3

Onde / *Where:*
$V_{biometano}$ = Volume de biometano produzido por ano por município, em ambos os cenários (Nm^3/ano); / *Volume of biomethane produced per year per municipality, in both scenarios (Nm^3/year);*
$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido por ano por município, em ambos os cenários (Nm^3biogás produzido/ano); / *Volume of biogas produced per year per municipality, in both scenarios (Nm^3biogas produced/year);*
$CH_{4biogás}$ = Concentração de metano presente no biogás da biodigestão anaeróbia do esgoto sanitário: 70%, conforme [12]; / *Methane concentration present in biogas from anaerobic digestion of sewage: 70%, according to [12];*
η = eficiência de purificação do biometano (90%) [3]. / *upgrading efficiency of biomethane (90%) [3].*
FO = Fator de operação do sistema de produção de biometano (85%). / *Operating factor of the biomethane production system (85%).*

Considerando o aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica, a avaliação do potencial elétrico do esgoto sanitário em cada município foi realizada por meio da Equação B.4, em ambos os cenários, com base no biogás produzido e na utilização de motogeradores ciclo Otto, tecnologia importada, porém comercialmente disponível no Brasil [2]. / *Considering the use of biogas for generating electricity, the assessment of the electrical potential of the sanitary sewage in each municipality was carried out by means of Equation B.4, in both scenarios, based on the biogas produced and the use of Otto cycle motor-generators, an imported technology, but commercially available in Brazil [2].*

$$\text{EE} = \left[\frac{(V_{biogás} \times [CH_4]_{biogás} \times PCI_{CH_4} \times Ef_{ele})}{1.000}\right] \times FO$$

$$\text{EE} = \left[\frac{(V_{biogas} \times [CH_4]_{biogas} \times PCI_{CH_4} \times Ef_{ele})}{1.000}\right] \times OF$$

Equação B.4
Equation B.4

Onde / *Where:*
EE = Potencial geração de energia elétrica por ano a partir do biogás gerado no tratamento anaeróbio de esgoto sanitário, em cada município para ambos os cenários (real e ideal) (MWh/ano); / *Potential annual electricity generation from biogas generated in the anaerobic treatment of sanitary sewage, in each municipality for both scenarios (actual and ideal) (MWh/year);*
$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido no tratamento anaeróbio de esgoto sanitário, em cada município para ambos os cenários (real e ideal) (Nm^3biogás produzido/ano); / *Volume of biogas produced in the anaerobic treatment of sanitary sewage, in each municipality for both scenarios (real-world and ideal) (Nm^3biogas produced/year);*
$CH_{4biogás}$ = Concentração de metano presente no biogás da biodigestão anaeróbia do esgoto sanitário: 70%, conforme [12]; / *Methane concentration present in biogas from anaerobic digestion of sewage: 70%, according to [12];*
PCI_{CH_4} = Poder Calorífico Inferior do metano (kWh/Nm^3CH_4) (utilizou-se o fator de 9,97 kWh/m^3CH_4, conforme apresentado por [4]; / *Lower Heating Value of methane (kWh/Nm^3CH_4) (the factor of 9.97 kWh/m^3CH_4 was used, as shown in [4];*
Ef_{ele} = Eficiência de conversão energética para motor ciclo Otto a biogás (utilizaram-se os fatores de 0,35 para vazões de biogás de até 5 mil Nm^3/dia e de 0,42 para vazões acima 5 mil Nm^3/dia, conforme metodologia fornecida por [5]; / *Energy conversion efficiency for an Otto cycle biogas motor (the factors of 0.35 were used for biogas flow rates up to 5,000 Nm^3/day and 0.42 for flow rates above 5,000 Nm^3/day, according to the methodology provided in [5]);*
1.000 = conversão de kWh para MWh; / *conversion from kWh to MWh;*
FO = Fator de operação do sistema de geração de eletricidade (85%). / Operating factor of the electricity generation system (85%).

Para a produção de hidrogênio a partir de biometano, a eficiência de conversão do processo foi determinada com base na produção de 1 kg de hidrogênio, conforme estabelecido na *Equação B.5*, utilizando os dados técnicos apresentados na *Tabela B.1.* / *For hydrogen production from biomethane, the process conversion efficiency was determined based on the production of 1 kg of hydrogen, as established in Equation B.5, using the technical data presented in Table B.1.*

$$\eta_{proc.} = \frac{m_{H_2}.PCI_{H_2}}{V_{bio}.\rho_{bio}.PCI_{bio} + DE_{proc.}}$$

$$\eta_{proc.} = \frac{m_{H_2} \times LHV_{H_2}}{V_{biom} \times \rho_{biom} \times LHV_{biom} + ED_{proc.}}$$

Equação B.5
Equation B.5

Onde / *Where:*
$\eta_{proc.}$ = Eficiência de conversão de energia na produção de hidrogênio; / *Energy conversion efficiency in hydrogen production;*
m_{H_2} = Potencial de produção de hidrogênio (1 kg); / *Hydrogen production potential (1 kg);*
PCI_{H_2} = Poder Calorífico Inferior do hidrogênio (kcal/kg); / *Lower Heating Value of hydrogen (kcal/kg);*
V_{biom} = Volume de biometano necessário para produzir 1 kg de H_2 (Nm^3); / *Volume of biomethane required to produce 1 kg of H_2 (Nm^3);*
ρbiom = Densidade mássica do biometano (kg/Nm^3); / *Mass density of biomethane (kg/Nm^3);*
PCI_{biom} = Poder Calorífico Inferior da matéria-prima (kcal/kg); / *Lower Heating Value of the feedstock (kcal/kg);*
$DE_{proc.}$ = Demanda Energética no processo para produzir 1 kg de H_2 (kcal). / *Energy Demand in the process to produce 1 kg of H_2 (kcal).*

Tabela B.1 - Especificações técnicas usadas para estimativa de produção de hidrogênio. / *Table B.1 - Technical specifications used to estimate hydrogen production.*

Matéria-prima *Feedstock*	**Biometano** *Biomethane*
Consumo de matéria-prima / *Feedstock consumption*	4,85 Nm^3/kg H_2
Consumo de água / *Water consumption*	0,035 m^3H_2O/kg H_2
Demanda de energia no processo / *Energy demand in the process*	557 kcal/kg H_2
Processo de purificação do H_2* / *H_2 upgrading process**	PSA
Poder Calorífico Inferior / *Lower Heating Value*	10.960 kcal/kg
Eficiência do gás (CGE) / *Gas efficiency*	71,9%
Densidade Mássica / *Mass density*	0,7541 kg/Nm^3

*PCI_{H_2}: 28.700 kcal/kg; densidade mássica H_2: 0,0899 kg/Nm^3 (101,3 kPa; 30 °C).
Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [4,6,7,8].
*: *28,700 kcal/kg; H_2 mass density: 0.0899 kg/Nm^3 (101.3 kPa; 30 °C).*
Source: prepared by the authors based on data from [4,6,7,8].

A estimativa do conteúdo térmico do hidrogênio produzido *(Thermal Content of the Hydrogen Product – TP)* foi realizada com base na equação a seguir: / *The thermal content of the hydrogen product (TP) was estimated using the following equation:*

$$\eta_{CGE} = \frac{TP}{TI} \times 100$$

Equação B.6
Equation B.6

Onde / *Where:*
ηCGE = Eficiência do gás (%): 71,9% conforme [7]; / *Gas efficiency (%): 71.9% according to [7];*
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (MJ/ano); / *Hydrogen thermal content (MJ/year);*
TI = Entrada térmica no sistema (MJ/ano) - determinada com base na taxa de alimentação do biometano (kg/ano) multiplicada pelo poder calorífico inferior (PCI) do biometano, conforme indicado na *Tabela B.1.* / *Thermal input in the system (MJ/year) - determined based on the biomethane feed rate (kg/year) multiplied by the biomethane's lower heating value (LHV), as shown in Table B.1.*

Para o cálculo da potência líquida do sistema (Pnet) aplicou-se a equação: / *To calculate the system's net power, the following equation was applied:*

$$\eta_{proc} = \frac{TP + Pnet}{TI} \times 100$$

Equação B.7
Equation B.7

Onde / *Where:*
$\eta_{proc.}$ = Eficiência de conversão de energia na produção de hidrogênio; / *Energy conversion efficiency in hydrogen production;*
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (MJ/ano); / *Hydrogen thermal content (MJ/year);*
Pnet: Potência líquida do sistema (MJ/ano); *System's net power (MJ/year);*
TI = Entrada térmica no sistema (MJ/ano) - determinada com base na taxa de alimentação do biometano (kg/ano) multiplicada pelo poder calorífico inferior (PCI) do biometano, conforme indicado na *Tabela B.1.* / *Thermal input in the system (MJ/year) - determined based on the biomethane feed rate (kg/year) multiplied by the biomethane's lower heating value (LHV), as shown in Table B.1.*

Por fim, o potencial de produção de hidrogênio via reforma a vapor do biometano foi estimado a partir da seguinte equação: / *Finally, the hydrogen production potential via steam reforming of biomethane was estimated using the following equation:*

$$m_{H_2} = \frac{TP}{PCI_{H_2}}$$

$$m_{H_2} = \frac{TP}{LHV_{H_2}}$$

Equação B.8
Equation B.8

Onde / Where:
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (kcal/ano); / *Hydrogen thermal content (kcal/year);*
m_{H_2} = Fluxo mássico de hidrogênio (kg/ano); / *Hydrogen mass flow rate (kg/year);*
PCI_{H_2} = Poder Calorífico Inferior do hidrogênio (kcal/kg). / *Hydrogen lower heating value (kcal/kg).*

C. MODELO MATEMÁTICO E PARÂMETROS USADOS NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS.

C. MATHEMATICAL MODEL AND PARAMETERS USED IN THE ENERGY RECOVERY FROM AGRICULTURAL RESIDUES.

O potencial de geração de eletricidade a partir de resíduos agrícolas foi calculado / *The electricity generation potential from agricultural residues was calculated*

$$E = m_{res} \times \%_{disp} \times PCI \times \eta \times FO$$

$$E = m_{res} \times \%_{available} \times LHV \times \eta \times OF$$

Equação C.1
Equation C.1

Onde / *Where*:
E = Energia disponível (MJ ou MWh); *Available energy (MJ or MWh)*;
m_{res} = Quantidade total de resíduos gerados (em kg); / *Total amount of generated residues (in kg);*
$\%_{disp}$ = Disponibilidade de aproveitamento dos resíduos (%); / *Availability of use of residues (%);*
PCI = Poder calorífico inferior da biomassa, em MJ/kg (Megajoule por quilograma) ou MWhth/t (Megawatt hora térmico por tonelada de biomassa); / *Lower heating value of biomass, in MJ/kg (Megajoules per kilogram) or MWhth/t (Thermal megawatt-hours per ton of biomass);*
η = Eficiência do sistema de conversão; / *Conversion system efficiency;*
FO = fator de operação (80% o que corresponde a 7.008 horas de operação anuais). / *Operating factor (80%, corresponding to 7,008 hours of annual operation).*

PARÂMETROS UTILIZADOS / *PARAMETERS USED*

Algodão / *Cottton*

Neste estudo, foram considerados dois tipos de resíduo da cultura do algodão: os provenientes da etapa agrícola (caules) e os gerados no beneficiamento (casca do caroço). Em cultivos de algodão conduzidos de forma adequada, a relação entre a biomassa seca que permanece no campo e a que é colhida é, aproximadamente, de 1:1, segundo Embrapa [13]. Esse mesmo índice é adotado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [14]. Apesar de a destruição dos restos culturais do algodoeiro após a colheita ser recomendada como medida profilática para o controle de pragas [15], considerou-se, neste estudo, um fator de disponibilidade de resíduo de 40% e o poder calorífico inferior dos resíduos da colheita do algodão (caules) de 14,6 GJ/t, equivalente a 4,05 MWh/t [14].

O resíduo do beneficiamento do algodão, conhecido como caroço de algodão, é um subproduto resultante do processamento da fibra, após a extração do óleo. Trata-se de um material fibroso, com potencial tanto para a alimentação animal quanto para aproveitamento energético. Esse resíduo representa cerca de 60% do volume colhido da cultura [16]. Resíduos obtidos diretamente do processamento industrial da fibra do algodão apresentaram teor de umidade de 9,93% e PCS de 17,25 $MJ.kg^{-1}$ (PCU de 15,28 $MJ.kg^{-1}$ ou 4.24 MWh/t) [17], valores utilizados neste trabalho.

In this study, two types of cotton crop residue were considered: those from the agricultural stage (stalks) and those generated during processing (cottonseed hulls). In properly managed cotton crops, the ratio between dry biomass remaining in the field and harvested biomass is approximately 1:1, according to Embrapa [13]. This same ratio is adopted by the Energy Research Company (EPE) [14]. Although the destruction of cotton crop residues after harvest is recommended as a prophylactic measure for pest control [15], this study considered a residue availability factor of 40% and the lower calorific value of cotton harvest residues (stalks) of 14.6 GJ/t, equivalent to 4.05 MWh/t [14].

Cottonseed residue is a byproduct resulting from fiber processing after oil extraction. It is a fibrous material with potential for both animal feed and energy use. This residue represents approximately 60% of the harvested volume of the crop [16]. Residues obtained directly from the industrial processing of cotton fiber presented a moisture content of 9.93% and HHV of 17.25 $MJ.kg^{-1}$ (LHV of 15.28 $MJ.kg^{-1}$ or 4.24 MWh/t) [17], values used in this work.

Banana / *Banana*

Para cada tonelada de banana colhida, são geradas, aproximadamente, 4 t de resíduos: os valores médios no Brasil são de 3 t de pseudocaule, 0,65 t de cascas e 0,32 t de frutos rejeitados para cada tonelada de banana colhida [18]. É importante destacar que, para o aproveitamento energético dos resíduos da bananicultura, é fundamental que esses materiais passem por um processo prévio de secagem, devido à sua elevada umidade. As folhas de bananeira, por exemplo, podem apresentar umidade superior a 43%, enquanto o pseudocaule pode ultrapassar 90% [19]. Após a secagem, esses resíduos apresentam poder calorífico inferior (PCI) de 15,6 MJ/kg (equivalente a 4,33 MWhth/t) para as folhas e 12,2 MJ/kg (3,38 MWhth/t) para o pseudocaule. Esses valores foram utilizados no cálculo do potencial energético da biomassa residual da banana. Além disso, considerou-se que apenas 40% da massa total desses resíduos estaria disponível para aproveitamento energético, uma vez que os 60% restantes devem ser mantidos no campo para auxiliar na conservação da umidade e na reposição de nutrientes ao solo.

For every ton of banana harvested, approximately 4 tons of waste are generated: the average values in Brazil are 3 tons of pseudostems, 0.65 tons of peels, and 0.32 tons of discarded fruit for every ton of banana harvested [18]. It is important to highlight that, for banana crop residues to be used for energy, they must undergo a prior drying process due to their high moisture content. Banana leaves, for example, can have a moisture content of over 43%, while pseudostems can exceed 90% [19]. After drying, these residues have a lower heating value (LHV) of 15.6 MJ/kg (equivalent to 4.33 MWh/t) for leaves and 12.2 MJ/kg (3.38 MWh/t) for pseudostems. These values were used to calculate the energy potential of banana residual biomass. Furthermore, it was considered that only 40% of the total mass of this residue would be available for energy use, since the remaining 60% must be kept in the field to help conserve moisture and replenish nutrients in the soil.

Cacau / *Cocoa*

A casca do cacau pode representar até 74% da massa total do fruto [20]. O estudo também indicou que 1 kg de casca seca (com 14% de umidade) é proveniente de 11,6 kg de casca úmida. Ao final, os autores concluíram que, para cada 1 kg de amêndoa seca produzida, é gerado, aproximadamente, 0,394 kg de casca (seca). Os autores também encontraram que o poder calorífico da casca seca foi estimado em 17.462,9 kJ/kg, equivalente a 4,85 MWh térmicos por tonelada. Esses dados foram utilizados na elaboração dos cálculos. Além disso, considerou-se o valor fornecido por IBGE [21] sobre quantidade de cacau produzida no ano de 2023 (cacau em amêndoa), refere-se ao produto já beneficiado (amêndoa seca).

Cocoa husks can represent up to 74% of the total mass of the fruit, according to Kilama et. al. (2019)[20]. The study also indicated that 1 kg of dry husks (with 14% moisture content) comes from 11.6 kg of wet husks. The authors concluded that for every 1 kg of dry beans produced, approximately 0.394 kg of dry husks are generated. The authors also found that the heating value of dry husks was estimated at 17,462.9 kJ/kg, equivalent to 4.85 MWh of thermal energy per ton. This data was used in the calculations. Furthermore, the value provided by IBGE [21] regarding the quantity of cocoa produced in 2023 (cocoa beans) was considered, which refers to the already processed product (dry beans).

Café / *Coffee*

Neste estudo, foram adotadas as mesmas premissas para as variedades de café *Arábica* e *Canephora*. Foi considerado que toda a casca gerada durante o processo de beneficiamento seria aproveitada energeticamente, uma vez que esse resíduo tem pouca aplicação na alimentação animal [2]. Durante o beneficiamento, a casca representa cerca de 50% do peso do grão de café [22,23]. Para fins de cálculo do potencial energético, foi adotado o poder calorífico útil de 3.040 kcal/kg, considerando um teor de umidade de 13,5% [24].

In this study, the same assumptions were adopted for the Arabica and Canephora coffee varieties. It was considered that all the husk generated during the processing would be used energetically, since this residue has little application in animal feed [2]. During processing, the husk represents approximately 50% of the weight of the coffee bean [22,23]. For the purposes of calculating the energy potential, the useful heating value of 3,040 kcal/kg was adopted, considering a moisture content of 13.5% [24].

Coco-da-baía / *Coconut*

A base de dados do IBGE [21] não faz distinção entre as variedades de coco-da-baía em suas estatísticas, nem especifica a quantidade de produção em toneladas, apresentando os dados em mil frutos. De acordo com o Sindicato Nacional dos Produtores de Coco [25], 70% da produção é de coco da variedade gigante, 20% da variedade anã e 10% da variedade híbrida. Considerando os pesos médios dos frutos de 900 g para o coco anão, 1.200 g para o híbrido e 1.400 g para o gigante [26], o peso médio do fruto foi adotado foi de 1,28 kg. As cascas representam entre 80% e 85% do peso bruto total do fruto [27,28] e, neste estudo, foi adotado o valor de 80%. A umidade da casca de coco verde pode ultrapassar os 90% [29], no entanto, foi considerado o valor de 85% de umidade, conforme [30]. Em relação ao aproveitamento energético foi utilizado o valor de poder calorífico inferior (PCI) de 13,90 MJ/kg para a casca de coco, o que equivale a 3,86 MWhth/t com 9,87% de umidade, ou 4,23 MWhth/t considerando o PCI a 0% de umidade [31]. Por fim, para o cálculo do potencial técnico, assumiu-se que 100% das cascas seriam destinadas ao aproveitamento energético.

The IBGE database [21] does not distinguish between coconut varieties in its statistics, nor does it specify production quantity in tons, presenting data per thousand fruits. According to the National Union of Coconut Producers [25], 70% of production is of the giant coconut variety, 20% of the dwarf coconut variety, and 10% of the hybrid coconut variety. Considering the average fruit weights of 900 g for the dwarf coconut, 1,200 g for the hybrid coconut, and 1,400 g for the giant coconut [26], the average fruit weight was 1.28 kg. The husks represent between 80% and 85% of the total gross weight of the fruit [27,28] and in this study, the value of 80% was adopted. The moisture content of the green coconut husk can exceed 90% [29], however, the value of 85% moisture was assumed, as per [30]. Regarding energy recovery, the lower heating value (LHV) of 13.90 MJ/kg was used for coconut husks, which is equivalent to 3.86 MWhth/t with 9.87% moisture content, or 4.23 MWhth/t considering the LHV at 0% moisture content [31]. Finally, to calculate the technical potential, it was assumed that 100% of the husks would be used for energy recovery.

Cana-de-açúcar / *Sugarcane*

De acordo com o *Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo*, recomenda-se manter de 50% a 60% da palha da cana-de-açúcar no campo, a fim de preservar as condições do solo. Para os cálculos realizados neste estudo, adotou-se um percentual de aproveitamento de 40% da palha [2]. Estima-se que cada tonelada de cana-de-açúcar colhida gere 140 kg de palha, na base seca, o que significa 164,7 kg de palha a uma umidade de 15% por tonelada de

cana colhida, com PCI de 3,6 MWhth/t (com a umidade da palha a 15%) [32], o que permitiu a avaliação do potencial energético técnico disponível a partir desse resíduo agrícola.

According to the Bioenergy Atlas of the State of São Paulo, it is recommended to keep 50% to 60% of sugarcane straw in the field in order to preserve soil conditions. A 40% straw utilization percentage was adopted for the calculations performed in this study [2]. It is estimated that each ton of harvested sugarcane generates 140 kg of straw, on a dry basis, which means 164.7 kg of straw at a moisture content of 15% per ton of harvested sugarcane, with a LHV of 3.6 MWhth/t (with straw moisture content at 15%) [32], which allowed for the evaluation of the technical energy potential available from this agricultural residue.

Laranja, limão e tangerina / *Orange, lemon and tangerine*

Estima-se que cada hectare cultivado com laranja, limão ou tangerina gere, anualmente, cerca de 3,5 t de galhos [33,34]. Esses resíduos apresentam um poder calorífico inferior (PCI) de, aproximadamente, 3.100 kcal/kg, equivalente a 3,61 MWhth por tonelada de biomassa [35]. Para simplificar a análise, adotaram-se os mesmos fatores de geração e aproveitamento de resíduos para as culturas de limão, laranja e tangerina, assumindo-se, inicialmente, o aproveitamento integral (100%) da biomassa residual.

It is estimated that each hectare cultivated with orange, lemon or tangerine crops generates approximately 3.5 tons of branches annually [33,34]. These residues have a lower heating value (LCV) of approximately 3,100 kcal/kg, equivalent to 3.61 MWh per ton of biomass [35]. To simplify the analysis, the same generation and utilization factors were adopted for lemon, orange, and tangerine crops, initially assuming full utilization (100%) of the residual biomass.

Dendê / *Oil palm*

Para os cálculos, considerou-se que 30% do peso total do cacho de dendê (frutos + cacho) corresponde ao cacho vazio, conforme indicado no estudo de Hora [36]. Foram adotados também os valores médios de teor de umidade (5,6%) e de poder calorífico (4.466,43 kcal/kg em base seca, equivalente a 5,19 MWhth/t) [37].

For the calculations, it was assumed that 30% of the total weight of the oil palm bunch (fruits + bunch) corresponds to the empty bunch, as indicated in the study by Hora [36]. The average values for moisture content (5.6%) and heating value (4,466.43 kcal/kg on a dry basis, equivalent to 5.19 MWh/t) [37] were also adopted.

Feijão / *Beans*

Foi considerado o aproveitamento da palha residual remanescente da colheita do feijão. Foram adotados os mesmos parâmetros utilizados pela EPE [14], que indica a geração de 1,16 t de resíduos na base seca para cada tonelada de feijão colhido, poder calorífico inferior (PCI) de 3,88 MWhth/t de palha e um aproveitamento de 40% dos resíduos, tendo em vista a recomendação de que 60% permaneçam no campo para a conservação do solo e reciclagem de nutrientes.

The use of residual straw remaining from the bean harvest was considered. The same parameters used by the EPE [14] were adopted, which indicate the generation of 1.16 t of residue on a dry basis for each ton of beans harvested, a lower heating value (LHV) of 3.88 MWh/t of straw, and a 40% utilization of the residue, considering the recommendation that 60% remain in the field for soil conservation and nutrient recycling.

Mandioca / *Cassava*

Visto o consumo das raízes, foi considerado o potencial energético das partes aéreas da planta (ramas). De acordo com a EPE [14], estima-se que, para cada tonelada de mandioca colhida, sejam gerada 0,65 t de biomassa seca da parte aérea. Considerou-se um aproveitamento de 40% desse material, uma vez que se recomenda manter os 60% restantes no campo, a fim de preservar a fertilidade do solo e promover a reciclagem de nutrientes. Para o cálculo do potencial energético, adotou-se um poder calorífico inferior (PCI) de 16,0 MJ/kg, equivalente a 4,72 MWhth/t [14].

Given the consumption of the roots, the energy potential of the plant's aerial parts (branches) was considered. According to the EPE [14], it is estimated that for each ton of cassava harvested, 0.65 tons of dry biomass is generated from the aerial part. A 40% utilization of this material was assumed, as it is recommended to keep the remaining 60% in the field in order to preserve soil fertility and promote nutrient recycling. To calculate the energy potential, a lower heating value (LHV) of 16.0 MJ/kg was adopted, equivalent to 4.72 MWhth/t [14].

Milho/ *Corn*

Foi considerado o aproveitamento dos resíduos provenientes da colheita, incluindo a palha da espiga, as folhas, o colmo e o sabugo. No caso dos resíduos da colheita, recomenda-se deixar 60% do total gerado no campo, como forma de manter a cobertura vegetal e contribuir para a conservação das condições físico-químicas do solo [14]. Assim, apenas 40% desses resíduos seriam tecnicamente disponíveis para fins energéticos. Para a quantificação de biomassa em base seca gerada por tonelada de milho produzido foi utilizada o valor adotado por EPE [14] de 1,68 t de biomassa residual (na base seca) para cada tonelada de milho produzido. Além disso adotou-se o mesmo poder calorífico descrito de 4,91 MWhth/t.

The use of harvest residues, including corncob straw, leaves, stalks, and cobs, was considered. In the case of harvest residues, it is recommended to leave 60% of the total generated in the field in order to maintain vegetation cover and contribute to the preservation of soil physical and chemical conditions [14]. Thus, only 40% of this residue would be technically available for energy purposes. The value adopted by EPE [14] of 1.68 t of residual biomass (on a dry basis) for each ton of corn produced was used to quantify the dry biomass generated per ton of corn produced. Furthermore, the same heating value described as 4.91 MWhth/t was adopted.

Soja / *Soybean*

Adotou-se um percentual de aproveitamento de 30% da palha, tendo em vista que o restante deve ser mantido no campo para preservação das características do solo [2]. A quantidade de palha gerada foi estimada com base em estudos prévio de (338,23), que indicam uma produção de resíduos equivalente a 120% do peso dos grãos, em base seca. Para o cálculo do potencial energético, foi adotado o poder calorífico inferior (PCI) da palha de soja de 4,05 MWhth/t [14].

A 30% straw utilization percentage was adopted, considering that the remainder must be kept in the field to preserve soil characteristics [2]. The amount of straw generated was estimated based on previous studies by [338,23], which indicate a production of residues equivalent to 120% of the weight of the grains, on a dry basis. The lower heating value (LHV) of soybean straw of 4.05 MWhth/t [14] was adopted to calculate the energy potential.

D. MODELO MATEMÁTICO E PARÂMETROS USADOS NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS EFLUENTES LÍQUIDOS DA INDÚSTRIA DE CELULOSE.

D. MATHEMATICAL MODEL AND PARAMETERS USED IN THE ENERGY RECOVERY OF LIQUID EFFLUENTS FROM PULP INDUSTRY.

Para a quantificação da geração de metano (CH_4) a partir do tratamento anaeróbio do efluente líquido gerado pela indústria de celulose, foi adotada a mesma metodologia utilizada para o esgoto sanitário, conforme Equação D.1 [5,2]. / *The same methodology used for sanitary sewage was adopted to quantify methane (CH_4) generation from the anaerobic treatment of pulp industry liquid effluent, according to Equation D.1 [5,2].*

$$CH_4 = EC \times DQO_{média} \times P_{CH_4} \times Ef_{rem}$$

$$CH_4 = EC \times COD_{average} \times P_{CH_4} \times Ef_{rem}$$

Equação D.1
Equation D.1

Onde / *Where:*
CH_4 = Volume de metano produzido por ano a partir do tratamento anaeróbio do efluente líquido gerado pela indústria de celulose nos municípios do Estado (Nm^3/ano); / *Volume of methane produced per year from the anaerobic treatment of pulp industry liquid effluent in the State's municipalities (Nm^3/year);*
EC = Volume de efluente líquido gerado pela indústria de celulose nos municípios do Estado, em metros cúbicos por ano (m^3/ano); / *Volume of pulp industry liquid effluent in the State's municipalities, in cubic meters per year (m^3/year);*
$DQO_{média}$ = Demanda química de oxigênio média do efluente líquido gerado pela indústria de celulose (kg DQO/m^3efluente); / *Average chemical oxygen demand of pulp industry liquid effluent (kg COD/m^3effluent);*
PC_{H_4} = Potencial de geração de metano (Nm^3 CH_4/kg DQOremovida); / *Methane generation potential (Nm^3 CH_4/kg CODremoved);*
Ef_{rem} = Eficiência de remoção de DQO. / *COD removal efficiency.*

Parâmetros utilizados / *Parameters used*

- **DQO do efluente líquido gerado pela indústria de celulose:** dados fornecidos por Suzano Papel e Celulose e Bracell - Bahia Specialty Cellulose S.A.; / *COD of liquid effluent generated by the pulp industry: data provided by Suzano Papel e Celulose and Bracell - Bahia Specialty Cellulose S.A.;*

- **Eficiência de remoção da DQO:** 85% [39]; / *COD removal efficiency: 85% [39];*

- **Potencial de geração de metano:** 0,3 Nm^3 CH_4/kg DQOremovida [39]; *Methane generation potential: 0.3 Nm^3 CH_4/kg DQOremoved [39];*

- **% de metano presente no biogás gerado:** 67% [39]. / *% methane present in the generated biogas: 67% [39].*

O modelo matemático utilizado para estimar o biometano disponível a partir do biogás gerado no tratamento anaeróbio do efluente líquido da indústria de celulose, está descrito na equação abaixo. / *The mathematical model used to estimate the biomethane available from the biogas generated in the anaerobic treatment of liquid effluent from the pulp industry is described in the equation below.*

$$V_{biometano} = V_{biogás} \times [CH_4]_{biogás} \times \eta \times FO$$

$$V_{biomethane} = V_{biogas} \times [CH_4]_{biogas} \times \eta \times OF$$

Equação D.2 *Equation D.2*

Onde: / *Where:*
$V_{biometano}$ = Volume de biometano produzido por ano por indústria (Nm^3/ano); / *Volume of biomethane produced per year by the industry (Nm^3/year);*
$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido por ano por indústria (Nm^3biogás produzido/ano); / *Volume of biogas produced per year by industry (Nm3produced biogas/year);*
$CH_{4biogás}$ = Concentração de metano presente no biogás da biodigestão anaeróbia do efluente líquido da indústria de celulose: 67%, conforme [39]; / *Methane concentration present in biogas from anaerobic digestion of liquid effluent from the pulp industry: 67%, as per [39];*
η = eficiência de purificação do biometano (90%) [3]; / *upgrading efficiency of biomethane (90%) [3];*
FO = Fator de operação do sistema de produção de biometano (85%). / *Operating factor of the biomethane production system (85%).*

Considerando o aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica, a avaliação do potencial elétrico do esgoto sanitário em cada município foi realizada por meio da Equação D.3, em ambos os cenários, com base no biogás produzido e na utilização de motogeradores ciclo Otto, tecnologia importada, porém comercialmente disponível no Brasil [2]. / *Considering the use of biogas for electricity generation, the electrical potential of sanitary sewage in each municipality was assessed using Equation D.3, in both scenarios, based on the produced biogas and the use of Otto cycle motor-generator, an imported technology commercially available in Brazil [2].*

$$\text{EE} = \left[\frac{\left(V_{biogás} \times [CH_4]_{biogás} \times PCI_{CH_4} \times Ef_{ele}\right)}{1.000}\right] \times FO$$

$$\text{EE} = \left[\frac{\left(V_{biogas} \times [CH_4]_{biogas} \times LHV_{CH_4} \times Ef_{ele}\right)}{1,000}\right] \times OF$$

Equação D.3 *Equation D.3*

Onde / *Where:*
EE = Potencial geração de energia elétrica por ano a partir do biogás gerado no tratamento anaeróbio do efluente líquido da indústria de celulose, em cada unidade industrial (MWh/ano); / *Potential annual electricity generation from biogas generated in the anaerobic treatment of liquid effluent from the pulp industry, at each industrial unit (MWh/year);*
$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido no tratamento anaeróbio do efluente líquido da indústria de celulose, em cada unidade industrial (Nm^3biogás produzido/ano); / *Volume of biogas produced in the anaerobic treatment of liquid effluent from the pulp industry, at each industrial unit (Nm^3produced biogas/year);*
$CH_{4biogás}$ = Concentração de metano presente no biogás da biodigestão anaeróbia do efluente líquido da indústria de celulose: 67%, conforme [39]; / *Methane concentration present in the biogas from the anaerobic digestion of liquid effluent from the pulp industry: 67%, according to [39];*
PCI_{CH_4} = Poder calorífico inferior do metano (kWh/Nm^3CH_4). Utilizou-se o fator de 9,97 kWh/m^3CH_4, conforme apresentado por [4]; / *Lower heating value of methane (kWh/Nm^3CH_4). A factor of 9.97 kWh/m^3CH_4 was used, as shown in [4];*
Ef_{ele} = Eficiência de conversão energética para motor ciclo Otto a biogás. Utilizaram-se os fatores de 0,35 para vazões de biogás de até 5 mil Nm^3/dia e de 0,42 para vazões acima 5 mil Nm^3/dia, conforme metodologia fornecida por [5]; / *Energy conversion efficiency for an Otto cycle biogas engine. A factor of 0.35 was used for biogas flow rates up to 5,000 Nm^3/day and 0.42 for flow rates above 5,000 Nm^3/day, according to the methodology provided in [5];*
1.000 = conversão de kWh para MWh; / conversion from kWh to MWh;
FO = Fator de operação do sistema de geração de eletricidade (85%). / *Operating factor of the electricity generation system (85%).*

Para a produção de hidrogênio a partir de biometano, a eficiência de conversão do processo foi determinada com base na produção de 1 kg de hidrogênio, conforme estabelecido na *Equação D.4*, utilizando os dados técnicos apresentados na *Tabela D.1*. / *For hydrogen production from biomethane, the process conversion efficiency was determined based on the production of 1 kg of hydrogen, as established in Equation B.5, using the technical data presented in Table D.1.*

$$\eta_{proc.} = \frac{m_{H_2}.PCI_{H_2}}{V_{bio}.\rho_{bio}.PCI_{bio} + DE_{proc.}}$$

$$\eta_{proc.} = \frac{m_{H_2} \times LHV_{H_2}}{V_{biom} \times \rho_{biom} \times LHV_{biom} + ED_{proc.}}$$

Equação D.4 *Equation D.4*

Onde / *Where:*
$\eta_{proc.}$ = Eficiência de conversão de energia na produção de hidrogênio; / *Energy conversion efficiency in hydrogen production;*
m_{H_2} = Potencial de produção de hidrogênio (1 kg); / *Hydrogen production potential (1 kg);*
PCI_{H2} = Poder Calorífico Inferior do hidrogênio (kcal/kg); / *Lower Heating Value of hydrogen (kcal/kg);*
V_{bio} = Volume de biometano necessário para produzir 1 kg de H_2 (Nm^3); / *Volume of biomethane required to produce 1 kg of H_2 (Nm^3);*
P_{bio} = Densidade mássica do biometano (kg/Nm^3); / *Mass density of biomethane (kg/Nm^3);*
PCI_{bio} = Poder Calorífico Inferior da matéria-prima (kcal/kg); / *Lower Heating Value of the feedstock (kcal/kg);*
$DE_{proc.}$ = Demanda Energética no processo para produzir 1 kg de H_2 (kcal). / *Energy Demand in the process to produce 1 kg of H_2 (kcal).*

Tabela D.1 - Especificações técnicas usadas para estimativa de produção de hidrogênio. / *Table D.1 - Technical specifications used to estimate hydrogen production.*

Matéria-prima *Feedstock*	**Biometano** *Biomethane*
Consumo de matéria-prima / *Feedstock consumption*	4,85 Nm^3/kg H_2
Consumo de água / *Water consumption*	0,035 m^3 H_2O/kg H_2
Demanda de energia no processo / *Energy demand in the process*	557 kcal/kg H_2
Processo de purificação do H_2* / *H_2 upgrading process**	PSA
Poder Calorífico Inferior / *Lower Heating Value*	10.960 kcal/kg
Eficiência do gás (CGE) / *Gas efficiency*	71,9%
Densidade Mássica / *Mass density*	0,7541 kg/Nm^3

*PCI_{H_2}: 28.700 kcal/kg; densidade mássica H_2: 0,0899 kg/Nm^3 (101,3 kPa; 30 °C).
Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [4,6,7,8].
*: 28,700 kcal/kg; H_2 mass density: 0.0899 kg/Nm^3 (101.3 kPa; 30 °C).
Source: prepared by the authors based on data from [4,6,7,8].

A estimativa do conteúdo térmico do hidrogênio produzido *(Thermal Content of the Hydrogen Product – TP)* foi realizada com base na equação a seguir: / *The thermal content of the hydrogen product (TP) was estimated using the following equation:*

$$\eta_{CGE} = \frac{TP}{TI} \times 100$$

Equação D.5 *Equation D.5*

Onde / *Where:*
ηCGE = Eficiência do gás (%): 71,9% conforme [7]; / *Gas efficiency (%): 71.9% according to [7];*
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (MJ/ano); / *Hydrogen thermal content (MJ/year);*
TI = Entrada térmica no sistema (MJ/ano) - determinada com base na taxa de alimentação do biometano (kg/ano) multiplicada pelo poder calorífico inferior (PCI) do biometano, conforme indicado na *Tabela D.1.* / *Thermal input in the system (MJ/year) - determined based on the biomethane feed rate (kg/year) multiplied by the biomethane's lower heating value (LHV), as shown in Table D.1.*

Para o cálculo da potência líquida do sistema (Pnet) aplicou-se a equação: / *To calculate the system's net power, the following equation was applied:*

$$\eta_{proc} = \frac{TP + Pnet}{TI} \times 100$$

Equação D.6 *Equation D.6*

Onde / *Where:*
$\eta_{proc.}$ = Eficiência de conversão de energia na produção de hidrogênio; / *Energy conversion efficiency in hydrogen production;*
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (MJ/ano); / *Hydrogen thermal content (MJ/year);*
Pnet: Potência Líquida do Sistema (MJ/ano); / *System´s net Power (MJ/year)*
TI = Entrada térmica no sistema (MJ/ano) - determinada com base na taxa de alimentação do biometano (kg/ano) multiplicada pelo poder calorífico inferior (PCI) do biometano, conforme indicado na *Tabela D.1.* / *Thermal input in the system (MJ/year) - determined based on the biomethane feed rate (kg/year) multiplied by the biomethane's lower heating value (LHV), as shown in Table D.1.*

Por fim, o potencial de produção de hidrogênio via reforma a vapor do biometano foi estimado a partir da seguinte equação: / *Finally, the hydrogen production potential via steam reforming of biomethane was estimated using the following equation:*

$$m_{H_2} = \frac{TP}{PCI_{H_2}}$$

$$m_{H_2} = \frac{TP}{LHV_{H_2}}$$

Equação D.7 *Equation D.7*

Onde / Where:
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (kcal/ano); / *Hydrogen thermal content (kcal/year);*
m_{H_2} = Fluxo mássico de hidrogênio (kg/ano); / *Hydrogen mass flow rate (kg/year);*
PCI_{H_2} = Poder Calorífico Inferior do hidrogênio (kcal/kg). / *Hydrogen lower heating value (kcal/kg).*

E. MODELO MATEMÁTICO E PARÂMETROS USADOS NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO.

E. MATHEMATICAL MODEL AND PARAMETERS USED IN THE ENERGY RECOVERY OF RESIDUES FROM THE SUGAR-ENERGY SECTOR.

Para a quantificação da torta de filtro disponível aplicou-se a seguinte equação: / *The following equation was applied to quantify the available filter cake:*

$$Torta_{disponível} = Cana_{moída} \times \left(\frac{F_{gt}}{1.000}\right)$$

$$Cake_{available} = Cane_{grinded} \times \left(\frac{F_{gt}}{1{,}000}\right)$$

Equação E.1
Equation E.1

Onde / Where:
$Torta_{disponível}$ = Torta disponível para geração de biogás (t/safra); / *Filter cake available for biogas generation (tons/crop);*
$Cana_{moída}$ = Capacidade de moagem de cana na safra (tc/safra); / *Sugarcane crushing capacity for the crop season (tc/crop);*
F_{gt} = Fator de geração de torta de filtro (t/tc) = 30 kg/tc. / *Filter cake generation factor (t/tc) = 30 kg/tc.*

O cálculo do volume de vinhaça foi realizado utilizando-se a equação a seguir: / *The vinasse volume was calculated using the following equation:*

$$V_{vinhaça} = V_{etanol} \times F_{gv}$$

$$V_{vinasse} = V_{ethanol} \times F_{gv}$$

Equação E.2
Equation E.2

Onde / Where:
$V_{vinhaça}$ = Volume de vinhaça (m^3/safra); / *Volume of vinasse (m^3/crop);*
V_{etanol} = Volume de etanol (m^3/safra); / *Volume of ethanol (m^3/crop);*
F_{gv} = Fator de geração de vinhaça (m^3 de vinhaça/ m^3 de etanol). / *Vinasse generation factor (m^3 vinasse/ m^3 ethanol).*

O volume de biogás produzido a partir da vinhaça e da torta de filtro foi estimado a partir da equação: / *The volume of biogas produced from vinasse and filter cake was estimated using the equation:*

$$V_{biogás} = Q_{substrato} \times F$$

$$V_{biogas} = Q_{substrate} \times F$$

Equação E.3
Equation E.3

Onde / Where:
$V_{biogás}$ = Volume de biogás (Nm^3/safra); / = *Volume of biogas (Nm^3/crop);*
$Q_{substrato}$ = Quantidade de vinhaça ou torta de filtro (t/safra ou m^3/safra); / = *Quantity of vinasse or filter cake (t/crop or m^3/crop);*
F = Fator de geração de biogás de vinhaça (Nl/kg sólidos voláteis) ou da torta de filtro (Nl/kg sólidos voláteis). / *F = Biogas generation factor from vinasse (Nl/kg volatile solids) or filter cake (Nl/kg volatile solids).*

Para o cálculo do volume de biometano produzido a partir do biogás de vinhaça, palha e torta de filtro utilizou-se a equação: / *The following equation was used to calculate the volume of biomethane produced from biogas from vinasse, straw, and filter cake:*

$$V_{biometano} = V_{biogás} \times [CH_4]_{biogás} \times \eta$$

$$V_{biomethane} = V_{biogas} \times [CH_4]_{biogas} \times \eta$$

Equação E.4
Equation E.4

Onde / Where:
$V_{biometano}$ = Volume de biometano (Nm^3/safra); / *Volume of biomethane (Nm^3/crop);*
$V_{biogás}$ = Volume de biogás (Nm^3/safra); / =*Volume of biogas (Nm^3/crop);*
$CH_{4biogás}$ = *Concentração de metano presente no biogás (%); Concentration of methane present in biogas (%);*
η = eficiência de purificação do biometano (90%) [40]. / = *upgrading efficiency of biomethane (90%) [40].*

Para a produção de hidrogênio a partir de biometano, a eficiência de conversão do processo foi determinada com base na produção de 1 kg de hidrogênio, conforme estabelecido na *Equação E.5*, utilizando os dados técnicos apresentados na *Tabela E.1.* / *For hydrogen production from biomethane, the process conversion efficiency was determined based on the production of 1 kg of hydrogen, as established in Equation E.5, using the technical data presented in Table E.1.*

$$\eta_{proc.} = \frac{m_{H_2}.PCI_{H_2}}{V_{bio}.\rho_{bio}.PCI_{bio} + DE_{proc.}}$$

$$\eta_{proc.} = \frac{m_{H_2} \times LHV_{H_2}}{V_{biom} \times \rho_{biom} \times LHV_{biom} + ED_{proc.}}$$

Equação E.5
Equation E.5

Onde / *Where:*
$\eta_{proc.}$ = Eficiência de conversão de energia na produção de hidrogênio; / *Energy conversion efficiency in hydrogen production;*
m_{H_2} = Potencial de produção de hidrogênio (1 kg); / *Hydrogen production potential (1 kg);*
PCI_{H_2} = Poder Calorífico Inferior do hidrogênio (kcal/kg); / *Lower Heating Value of hydrogen (kcal/kg);*
V_{biom} = Volume de biometano necessário para produzir 1 kg de H_2 (Nm^3); / *Volume of biomethane required to produce 1 kg of H_2 (Nm^3);*
P_{biom} = Densidade mássica do biometano (kg/Nm^3); / = *Mass density of biomethane (kg/Nm^3);*
PCI_{biom} = Poder Calorífico Inferior da matéria-prima (kcal/kg); / *Lower Heating Value of the feedstock (kcal/kg);*
$DE_{proc.}$ = Demanda Energética no processo para produzir 1 kg de H_2 (kcal). / *Energy Demand in the process to produce 1 kg of H_2 (kcal).*

Tabela E.1 - Especificações técnicas usadas para estimativa de produção de hidrogênio. / *Table E.1 - Technical specifications used to estimate hydrogen production.*

Matéria-prima *Feedstock*	**Biometano** *Biomethane*
Consumo de matéria-prima / *Feedstock consumption*	4,85 Nm^3/kg H_2
Consumo de água / *Water consumption*	0,035 $m^3 H_2O$/kg H_2
Demanda de energia no processo / *Energy demand in the process*	557 kcal/kg H_2
Processo de purificação do H_2* / *H_2 upgrading process**	PSA
Poder Calorífico Inferior / *Lower Heating Value*	10.960 kcal/kg
Eficiência do gás (CGE) / *Gas efficiency*	71,9%
Densidade Mássica / *Mass density*	0,7541 kg/Nm^3

*PCI_{H_2}: 28.700 kcal/kg; densidade mássica H_2: 0,0899 kg/Nm^3 (101,3 kPa; 30 °C).
Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [4,6,7,8].
*: *28,700 kcal/kg; H_2 mass density: 0.0899 kg/Nm^3 (101.3 kPa; 30 °C).*
Source: prepared by the authors based on data from [4,6,7,8].

A estimativa do conteúdo térmico do hidrogênio produzido *(Thermal Content of the Hydrogen Product – TP)* foi realizada com base na equação a seguir: / *The thermal content of the hydrogen product (TP) was estimated using the following equation:*

$$\eta_{CGE} = \frac{TP}{TI} \times 100$$

Equação E.6
Equation E.6

Onde / *Where:*
ηCGE = Eficiência do gás (%): 71,9% conforme [7]; / = *Gas efficiency (%): 71.9% according to [7];*
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (MJ/ano); / *Hydrogen thermal content (MJ/year);*
TI = Entrada térmica no sistema (MJ/ano) - determinada com base na taxa de alimentação do biometano (kg/ano) multiplicada pelo poder calorífico inferior (PCI) do biometano, conforme indicado na *Tabela E.1.* / *Thermal input in the system (MJ/year) - determined based on the biomethane feed rate (kg/year) multiplied by the biomethane's lower heating value (LHV), as shown in Table E.1.*

Para o cálculo da potência líquida do sistema (Pnet) aplicou-se a equação: / *To calculate the system's net power, the following equation was applied:*

$$\eta_{proc} = \frac{TP + Pnet}{TI} \times 100$$

Equação E.7
Equation E.7

Onde / *Where:*
$\eta_{proc.}$ = Eficiência de conversão de energia na produção de hidrogênio; / = *Energy conversion efficiency in hydrogen production;*
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (MJ/ano); / *Hydrogen thermal content (MJ/year);*
Pnet: Potência Líquida dos Sistema (MJ/ano); / *System's net power (MJ/year)*
TI = Entrada térmica no sistema (MJ/ano) - determinada com base na taxa de alimentação do biometano (kg/ano) multiplicada pelo poder calorífico inferior (PCI) do biometano, conforme indicado na *Tabela E.1.* / *Thermal input in the system (MJ/year) - determined based on the biomethane feed rate (kg/year) multiplied by the biomethane's lower heating value (LHV), as shown in Table E.1.*

Por fim, o potencial de produção de hidrogênio via reforma a vapor do biometano foi estimado a partir da seguinte equação: / *Finally, the hydrogen production potential via steam reforming of biomethane was estimated using the following equation:*

$$m_{H_2} = \frac{TP}{PCI_{H_2}}$$

$$m_{H_2} = \frac{TP}{LHV_{H_2}}$$

Equação E.8
Equation E.8

Onde / Where:
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (kcal/ano); / = *Hydrogen thermal content (kcal/year);*
m_{H_2} = Fluxo mássico de hidrogênio (kg/ano); / = *Hydrogen mass flow rate (kg/year);*
PCI_{H_2} = Poder Calorífico Inferior do hidrogênio (kcal/kg). / LHV_{H_2} *Hydrogen lower heating value (kcal/kg).*

F. MODELO MATEMÁTICO E PARÂMETROS USADOS NA VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL.

F. MATHEMATICAL MODEL AND PARAMETERS USED IN THE ENERGY RECOVERY FROM LIVESTOCK MANURE.

Para o cálculo da geração de dejetos foi aplicada a equação a seguir: / *To calculate livestock waste generation, the following equation was applied:*

$$D = N \times F_d$$
$$D = N \times F_w$$

Equação F.1
Equation F.1

Onde / *Where:*
D = Dejetos ou efluente (kg/ano ou l/ano); / *D = Waste or effluent (kg/year or l/year);*
N = Número de animais; / *N = Number of animals;*
Fd = Fator de geração de dejetos ou efluente (kg de dejetos.animal^{-1}.ano^{-1} ou l de efluentes.animal^{-1}.ano^{-1}). / *Waste or effluent generation factor (kg of waste. animal^{-1}. year^{-1} or l of effluent. animal^{-1}.year^{-1}).*

O volume de biogás foi estimado aplicando-se a seguinte equação: / *The biogas volume was estimated by applying the following equation:*

$$V_{biogás} = D \times F \times [CH_4]_{biogás}$$
$$V_{biogas} = W \times F \times [CH_4]_{biogas}$$

Equação F.2
Equation F.2

Onde / *Where:*
$V_{biogás}$ = Volume de biogás (Nm/ano); / *Volume of biogas (Nm/year);*
D = Total anual de dejetos (kg dejeto/ano ou l efluente/ano); / Total annual waste (kg of waste/year or l of effluent/year);
F = Fator de conversão (Nm^3 CH_4/kg sólidos voláteis); / *Conversion factor (Nm^3 CH_4/kg volatile solids);*
$CH_{4biogás}$ = Concentração de metano presente no biogás (%). / *= Concentration of methane present in biogas (%).*

O modelo matemático utilizado para estimar o biometano disponível, derivado do biogás gerado no tratamento anaeróbio dos dejetos animais, está descrito na equação abaixo. / *The mathematical model used to estimate the available biomethane, derived from the biogas generated in the anaerobic treatment of livestock manure, is described in the equation below.*

$$V_{biometano} = V_{biogás} \times [CH_4]_{biogás} \times \eta$$
$$V_{biomethan} = V_{biogas} \times [CH_4]_{biogas} \times \eta$$

Equação F.3
Equation F.3

Onde / *Where:*
$V_{biometano}$ = Volume de biometano (Nm^3/ano); / *Volume of biomethane (Nm^3/year);*
$V_{biogás}$ = Volume de biogás (Nm^3/ano); / *= Volume of biogas (Nm^3/year);*
$CH_{4biogás}$ = Concentração de metano presente no biogás (%); / *Concentration of methane present in biogas (%);*
η = eficiência de purificação do biometano (90%) [40]. / *= upgrading efficiency of biomethane (90%) [40].*

Por fim, para a estimativa da geração de energia elétrica foi considerado o biogás produzido aplicando-se a equação a seguir: / *Finally, the biogas produced was considered in order to estimate electricity generation by applying the following equation:*

$$EE = \frac{(V_{biogás} \times [CH_4]_{biogás} \times PCI_{CH_4} \times Ef_{ele})}{1.000}$$
$$EE = \frac{(V_{biogas} \times [CH_4]_{biogas} \times LHV_{CH_4} \times Ef_{ele})}{1,000}$$

Equação F.4
Equation F.4

Onde / *Where:*
EE = Potencial geração de energia elétrica por safra a partir do biogás (MWh/safra); / *Potential electricity generation per harvest from biogas (MWh/harvest);*
$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido (Nm^3 biogás produzido/safra); / *Volume of biogas produced (Nm^3 biogas produced/harvest);*
$CH_{4biogás}$ = Concentração de metano presente no biogás (%); / *Methane concentration in biogas (%);*
PCI_{CH_4} = Poder calorífico inferior do metano (kWh/Nm^3 CH_4) (utilizou-se o fator de 9,97 kWh/m^3 CH_4, conforme apresentado por [4]; / *Lower heating value of methane (kWh/Nm^3 CH_4) (the factor of 9.97 kWh/m^3 CH_4, was used, as shown in [4];*
Ef_{ele} = Eficiência de conversão energética para motor ciclo Otto a biogás (utilizaram-se os fatores de 0,35 para vazões de biogás de até 5 mil Nm^3/dia e de 0,42 para vazões acima 5 mil Nm^3/dia, conforme metodologia fornecida por [5]; / *Energy conversion efficiency for an Otto cycle biogas motor (the factors of 0.35 were used for biogas flow rates up to 5,000 Nm^3/day and 0.42 for flow rates above 5,000 Nm^3/day, according to the methodology provided in [5];*
1.000 = conversão de kWh para MWh. / *1,000 = conversion from kWh to MWh.*

Para a produção de hidrogênio a partir de biometano, a eficiência de conversão do processo foi determinada com base na produção de 1 kg de hidrogênio, conforme estabelecido na *Equação F.5*, utilizando os dados técnicos apresentados na *Tabela F.1.* / *For hydrogen production from biomethane, the process conversion efficiency was determined based on the production of 1 kg of hydrogen, as established in Equation B.5, using the technical data presented in Table F.1.*

$$\eta_{proc.} = \frac{m_{H_2}.PCI_{H_2}}{V_{bio}.\rho_{bio}.PCI_{bio} + DE_{proc.}}$$
$$\eta_{proc.} = \frac{m_{H_2} \times LHV_{H_2}}{V_{biom} \times \rho_{biom} \times LHV_{biom} + ED_{proc.}}$$

Equação F.5
Equation F.5

Onde / *Where:*
$\eta_{proc.}$ = Eficiência de conversão de energia na produção de hidrogênio; / *Energy conversion efficiency in hydrogen production;*
m_{H_2} = Potencial de produção de hidrogênio (1 kg); / *Hydrogen production potential (1 kg);*
PCI_{H_2} = Poder Calorífico Inferior do hidrogênio (kcal/kg); / *Lower Heating Value of hydrogen (kcal/kg);*
V_{bio} = Volume de biometano necessário para produzir 1 kg de H_2 (Nm^3); / *Volume of biomethane required to produce 1 kg of H_2 (Nm^3);*
P_{bio} = Densidade mássica do biometano (kg/Nm^3); / *= Mass density of biomethane (kg/Nm^3);*
PCI_{bio} = Poder Calorífico Inferior da matéria-prima (kcal/kg); / *Lower Heating Value of the feedstock (kcal/kg);*
$DE_{proc.}$ = Demanda Energética no processo para produzir 1 kg de H_2 (kcal). / *Energy Demand in the process to produce 1 kg of H_2 (kcal).*

Tabela F.1 - Especificações técnicas usadas para estimativa de produção de hidrogênio. / *Table F.1 - Technical specifications used to estimate hydrogen production.*

Matéria-prima *Feedstock*	**Biometano** *Biomethane*
Consumo de matéria-prima / *Feedstock consumption*	4,85 Nm^3/kg H_2
Consumo de água / *Water consumption*	0,035 m^3 H_2O/kg H_2
Demanda de energia no processo / *Energy demand in the process*	557 kcal/kg H_2
Processo de purificação do H_2* / *H_2 upgrading process**	PSA
Poder Calorífico Inferior / *Lower Heating Value*	10.960 kcal/kg
Eficiência do gás (CGE) / *Gas efficiency*	71,9%
Densidade Mássica / *Mass density*	0,7541 kg/Nm^3

*PCI_{H_2}: 28.700 kcal/kg; densidade mássica H_2: 0,0899 kg/Nm^3 (101,3 kPa; 30 °C).
Fonte: elaborado pelos autores com base em dados de [4,6,7,8].
*: 28,700 kcal/kg; H_2 mass density: 0.0899 kg/Nm^3 (101.3 kPa; 30 °C).
Source: prepared by the authors based on data from [4,6,7,8].*

A estimativa do conteúdo térmico do hidrogênio produzido *(Thermal Content of the Hydrogen Product – TP)* foi realizada com base na equação a seguir: / *The thermal content of the hydrogen product (TP) was estimated using the following equation:*

$$\eta_{CGE} = \frac{TP}{TI} \times 100$$

Equação F.6
Equation F.6

Onde / *Where:*
ηCGE = Eficiência do gás (%): 71,9% conforme [7]; / *= Gas efficiency (%): 71.9% according to [7];*
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (MJ/ano); / *Hydrogen thermal content (MJ/year);*
TI = Entrada térmica no sistema (MJ/ano) - determinada com base na taxa de alimentação do biometano (kg/ano) multiplicada pelo poder calorífico inferior (PCI) do biometano, conforme indicado na *Tabela F.1.* / *Thermal input in the system (MJ/year) - determined based on the biomethane feed rate (kg/year) multiplied by the biomethane's lower heating value (LHV), as shown in Table F.1.*

Para o cálculo da potência líquida do sistema (Pnet) aplicou-se a equação: / *To calculate the system's net power, the following equation was applied:*

$$\eta_{proc} = \frac{TP + Pnet}{TI} \times 100$$

Equação F.7
Equation F.7

Onde / *Where:*
$\eta_{proc.}$ = Eficiência de conversão de energia na produção de hidrogênio; / *= Energy conversion efficiency in hydrogen production;*
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (MJ/ano); / *Hydrogen thermal content (MJ/year);*
Pnet: Potência Líquida do Sistema (MJ/ano); / *System's net power (MJ/year);*
TI = Entrada térmica no sistema (MJ/ano) - determinada com base na taxa de alimentação do biometano (kg/ano) multiplicada pelo poder calorífico inferior (PCI) do biometano, conforme indicado na *Tabela F.1.* / *Thermal input in the system (MJ/year) - determined based on the biomethane feed rate (kg/year) multiplied by the biomethane's lower heating value (LHV), as shown in Table F.1.*

Por fim, o potencial de produção de hidrogênio via reforma a vapor do biometano foi estimado a partir da seguinte equação: / *Finally, the hydrogen production potential via steam reforming of biomethane was estimated using the following equation:*

$$m_{H_2} = \frac{TP}{PCI_{H_2}}$$
$$m_{H_2} = \frac{TP}{LHV_{H_2}}$$

Equação F.8
Equation F.8

Onde / Where:
TP = Conteúdo térmico do hidrogênio (kcal/ano); / *= Hydrogen thermal content (kcal/year);*
m_{H_2} = Fluxo mássico de hidrogênio (kg/ano); / *= Hydrogen mass flow rate (kg/year);*
PCI_{H_2} = Poder Calorífico Inferior do hidrogênio (kcal/kg). / LHV_{H_2} *Hydrogen lower heating value (kcal/kg).*

Atlas Bioenergia Bahia

REFERÊNCIAS

REFERENCES

[1] WELFLE, Andrew James; ALMENA, Alberto; ARSHAD, Muhammad Naveed; BANKS, Scott William; BUTNAR, Isabela; CHONG, Katie Jane; COOPER, Samuel J.G.; DALY, Helen; GARCIA FREITES, Samira; GÜLEÇ, Fatih; HARDACRE, Christopher; HOLLAND, Robert; LAN, Lan; LEE, Chai Siah; ROBERTSON, Peter; ROWE, Rebecca; SHEPHERD, Anita; SKILLEN, Nathan; TEDESCO, Silvia; THORNLEY, Patricia; VERDÍA BARBARÁ, Pedro; WATSON, Ian; WILLIAMS, Orla Sioned Aine; RÖDER, Mirjam. Sustainability of bioenergy – Mapping the risks & benefits to inform future bioenergy systems. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], vol. 177, 1 out. 2023. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106919.

[2] MARAFON, Anderson Carlos; DIAS, Antônio; ANDRÉ, Santiago; CÂMARA, Felipe; ADRIANA, Amaral; BIERHALS, Neutzling; LEÔNCIO, Hugo; VICTOR, Paiva; GUIMARÃES, Santos. Uso da biomassa para a geração de energia. **Documentos 211**, Aracaju, dez. 2016. Disponível em: www.embrapa.com.br.

[3] IEA BIOENERGY. **Global bioenergy**. 2020. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/bioenergy-a-sustainable-solution/. Acesso em: 23 jul. 2025.

[4] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Hidrogênio e biomassa**: oportunidades para produção e uso de hidrogênio em sistemas de bioenergia. Rio de Janeiro, p. 1–87, jun. 2025. Disponível em: http://www.mme.gov.brhttp://www.epe.gov.br.

[5] COELHO, Suani T.; GARCILASSO, Vanessa Pecora; SANTOS, Marilin Mariano dos; ESCOBAR, Javier Farago; PERECIN, Danilo; SOUZA, Diego Bonfim de. **Atlas de bioenergia do estado de São Paulo**. 1. ed. São Paulo: IEE-USP, 2020.

[6] KAREKEZI, Stephen; LATA, Kusum; COELHO, Suani Teixeira. Traditional Biomass Energy Improving its Use and Moving to Modern Energy Use. **International Conference for Renewable Energies Bonn 2004**, Bonn, 2004. Disponível em: www.renewables2004.de.

[7] CANTARELLA, Heitor; SOUZA, Glaucia Mendes; NOGUEIRA, Luiz Horta; MACIEL FILHO, Rubens; PAIVA, Gabriel Costa de; CANABARRO, Nicholas Islongo; ORTIZ, Pablo Silva; EKBOM, Tomas; SILVA, Jean Felipe Leal. Assessment of successes and lessons learned for biofuels deployment: Report Work package 2 | Meta-analysis of existing studies. **IEA Bioenergy TCP | Intertask project of Task 39, Task 40 and Task 45**, [*s. l.*], p. 1–68, 2023.

[8] IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Climate Change 2013**: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[9] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Potencial energético dos resíduos agropecuários. **Série SIEnergia**, Rio de Janeiro, nº EPE-DEA-IT-006/2019, p. 1–21, out. 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-372/topico-492/EPE-DEA-IT%20006_2019%20-%20SIEnergia_Potencial%20Energético%20dos%20Resíuos%20Agropecuários.pdf. Acesso em: 23 jul. 2025.

[10] SKEER, Jeff. Bioenergy for sustainable development. 7 nov. 2017. **COP23 - Round Table on Bioenergy for Sustainable Development [...]**. Bonn: [*s. n.*], 7 nov. 2017.

[11] MILANEZ, Artur Yabe; MAIA, Guilherme Baptista da Silva; GUIMARÃES, Diego Duque. Biogás: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil. **Produção BNDES - Artigos**, [*s. l.*], vol. 27, nº 53, p. 177–216, mar. 2021. Disponível em: http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/20801. Acesso em: 28 jul. 2025.

[12] GUIDUCCI, Rosana do Carmo Nascimento; SABAINI, Priscila Seixas; SOARES, Itânia Pinheiro; GONÇALVES, Silvia Belém. Análise de sustentabilidade da produção e uso de biofertilizante e biogás em estabelecimentos agropecuários de pequeno e médio porte no Brasil. 2024. **Anais 62º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural (SOBER)** [...]. Palmas, TO: UFT, 2024. DOI 10.29327/62-congresso-da-sober-397784.818532. Disponível em: http//www.even3.com.br/anais/sober2024-397784. Acesso em: 28 jul. 2025.

[13] DIAZ-CHAVEZ, Rocio A; RETTENMAIER, Nils; RUTZ, Dominik; JANSSEN, Rainer. **Global-Bio-Pact set of selected socio-economic sustainability criteria and indicators**. [*S. l.*: *s. n.*], 2012. Disponível em: www.globalbiopact.eu.

[14] GLOBAL BIOENERGY PARTNERSHIP. **The global bioenergy partnership sustainability indicators for bioenergy.** [*S. l.*]: FAO, Climate, Energy and Tenure Division, 2011.

[15] KARP, Angela; ARTAXO NETTO, Paulo Eduardo; BERNDES, Göran; CANTARELLA, Heitor; EL-LAKANY, Hosny; ESTRADA, Tiago Egger Moellwald Duque; FAAIJ, André; FINCHER, Geoffrey B.; HUNTLEY, Brian J.; RAVINDRANATH, N. H.; VAN SLUYS, Marie-Anne; VERDADE, Luciano M.; YOUNGS, Heather. Environmental and Climate Security. *In*: SOUZA, Glaucia M.; VICTORIA, Reynaldo L.; JOLY, Carlos A.; VERDADE, Luciano M. (orgs.). **Bioenergy & Sustainability: Bridging the gaps**. Paris: SCOPE, 2015. vol. 72, cap. 5, p. 138–182. Disponível em: https://bioenfapesp.org/scopebioenergy/index.php/chapters/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[16] OSSEWEIJER, Patricia; WATSON, Helen K.; JOHNSON, Francis X.; BATISTELLA, Mateus; CORTEZ, Luis A. B.; LYND, Lee R.; KAFFKA, Stephen R.; LONG, Stephen P.; VAN MEIJL, Hans; NASSAR, Andre M.; WOODS, Jeremy. Bioenergy and Food Security. *In*: SOUZA, Glaucia M.; VICTORIA, Reynaldo L.; JOLY, Carlos A.; VERDADE, Luciano M. (orgs.). **Bioenergy & Sustainability: Bridging the gaps**. Paris: SCOPE, 2015. vol. 72, cap. 4, p. 90–136. Disponível em: https://bioenfapesp.org/scopebioenergy/index.php/chapters/. Acesso em: 29 jul. 2025.

[17] DIAZ-CHAVEZ, Rocio; WALTER, Arnaldo; GERBER, Pedro. Socio-economic assessment of forestry production for a developing pellet sector: the case of Santa Catarina in Brazil. **IEA Bioenergy: Task 40**, [*s. l.*], 2017.

[18] CHERWOO, Lubhan; GUPTA, Ishika; FLORA, G.; VERMA, Ritu; KAPIL, Muskaan; ARYA, Shailendra Kumar; RAVINDRAN, Balasubramani; KHOO, Kuan Shiong; BHATIA, Shashi Kant; CHANG, Soon Woong; NGAMCHARUSSRIVICHAI, Chawalit; ASHOKKUMAR, Veeramuthu. Biofuels an alternative to traditional fossil fuels: A comprehensive review. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [*s. l.*], vol. 60, 29 jul. 2025. https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103503.

[19] UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. NDC Registry. 2024. **Nationally Determined Contributions Registry**. Disponível em: https://unfccc.int/NDCREG. Acesso em: 29 jul. 2025.

[20] RAMAN, Raghu; SREENIVASAN, Aswathy; KULKARNI, Naveen V.; SURESH, M.; NEDUNGADI, Prema. Analyzing the contributions of biofuels, biomass, and bioenergy to sustainable development goals. **iScience**, [*s. l.*], vol. 28, nº 4, 18 abr. 2025. https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112157.

[21] CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Panorama do Biogás no Brasil 2022**: Relatório Técnico nº 001/2023. Foz do Iguaçu: [*s. n.*], 2023. Disponível em: https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2023/12/Panorama_do_Biogs_no_Brasil_2022.pdf?gclid=CjwKCAiAzc2tBhA6EiwArv-i6fd0mxZYo_JJVPO1rZFh_CC2xIfLcPskURYycI2wF7hTTtlkdGowKRoCVz4QAvD_BwE. Acesso em: 2 ago. 2025.

[22] CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Panorama do Biogás no Brasil 2024**: Relatório Técnico nº 001/2025. Foz do Iguaçu: [*s. n.*], 2025. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2025/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-2024.pdf. Acesso em: 2 ago. 2025.

[23] PROJETO GEF BIOGÁS BRASIL; ABIOGÁS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS. **Redução de Emissões e Geração de Emprego**. 2023. Disponível em: https://www.gefbiogas.org.br/impactosdobiogas.html. Acesso em: 2 ago. 2025.

[24] UNICA DATA - OBSERVATÓRIO DA CANA E BIOENERGIA. **Bioeletricidade em números**: Geração para a Rede e Capacidade Instalada. mar. 2025. Disponível em: https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=134. Acesso em: 7 ago. 2025.

[25] UNICA DATA - OBSERVATÓRIO DA CANA E BIOENERGIA. **Fotografia do setor sucroenergético no Brasil e os benefícios econômicos, ambientais e sociais gerados**. 2025. Disponível em: https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=158. Acesso em: 7 ago. 2025.

[26] AMARAL, Daniela Higgin. **Potencial energético da biomassa florestal no estado de Mato Grosso**: análise do uso de plantios dedicados de eucalipto. 2025. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2025. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106133/tde-10072025-164559/. Acesso em: 3 set. 2025.

[27] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA**. 2025. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNGE3NjVmYjAtNDFkZC00MDY4LTliNTItMTVkZTU4NWYzYzFmIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9. Acesso em: 4 ago. 2025.

[28] UNICA. **Selo Energia Verde**. 2025. Disponível em: https://unica.com.br/iniciativas/selo-energia-verde/. Acesso em: 8 ago. 2025.

[29] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINA E ENERGIA; EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **PDE 2034**: Plano Decenal da Expansão de Energia 2034. Brasília: [*s. n.*], 2024.

REFERENCES
REFERÊNCIAS

[30] IPCC - THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2023: Summary for Policymakers. *In*: CORE WRITING TEAM; LEE, Hoesung; ROMERO, José (orgs.). **Climate Change 2023**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023. p. 1–34. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/.

[31] IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **World Energy Transitions Outlook 2022**: 1.5 °C Pathway. Abu Dhabi.: [*s. n.*], 2022. Disponível em: www.irena.org/publications.

[32] IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Hydrogen Review 2024**. Paris: [*s. n.*], 2024. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024. Acesso em: 10 ago. 2025.

[33] ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Hidrogênio**. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/hidrogenio. Acesso em: 10 ago. 2025.

[34] BRASIL. **Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024**. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono; institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro); cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera as Leis nºs 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e 9.478, de 6 de agosto de 1997. 2 ago. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm. Acesso em: 2 ago. 2025.

[35] VIDAL-BARRERO, Fernando; BAENA-MORENO, Francisco M.; PRECIADO-CÁRDENAS, Christian; VILLANUEVA-PERALES, Ángel; REINA, T. R. Hydrogen production from landfill biogas: Profitability analysis of a real case study. **Fuel**, [*s. l.*], vol. 324, p. 124438, 15 set. 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001623612201290X. Acesso em: 10 ago. 2025.

[36] CAO, Leichang; YU, Iris K.M.; XIONG, Xinni; TSANG, Daniel C.W.; ZHANG, Shicheng; CLARK, James H.; HU, Changwei; NG, Yun Hau; SHANG, Jin; OK, Yong Sik. Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. **Environmental Research**, [*s. l.*], vol. 186, p. 109547, 1 jul. 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935120304400. Acesso em: 10 ago. 2025.

[37] OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. [*s. l.*], 2022. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11291. Acesso em: 10 ago. 2025.

[38] NEOENERGIA. **Conheça o Hidrogênio Verde, o combustível do futuro**. 2023. Disponível em: https://www.neoenergia.com/w/conheca-o-hidrogenio-verde-o-combustivel-do-futuro. Acesso em: 10 ago. 2025.

[39] AWS TRUEPOWER; CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS; FIEB/SENAI CIMATEC. **Atlas solar**: Bahia. [*S. l.*: *s. n.*], 2018.

[40] CAMARGO-SCHUBERT ENGENHARIA EÓLICA; BACK, Alexander Clasen; SILVA, Fabiano de Jesus Lima da; CATANI, Fábio; ESTANTE, Frederico Eduardo da Cunha; LIMA, Guilherme Guebur; VIOLATO, Gustavo Oliveira; ARAÚJO, James Lenzi de; AMARANTE, Odilon Antônio Camargo do; ANDRADE, Paulo Emiliano Piá de; FREITAS, Ramon Morais de. **Atlas eólico**: Bahia. [*s. l.*], 2013. Disponível em: http://repositorio.universidadesenaicimatec.edu.br/handle/fieb/353. Acesso em: 2 jun. 2025.

[41] SENAI CIMATEC - SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Atlas H_2V Bahia**. (SENAI CIMATEC, SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE, Eds.) Salvador, 2023.

[42] GOMES, Carlos Francisco Simões; MAIA, Ana Claudia Coenca. Biomassa como alternativa para o fornecimento de energia. **Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, [*s. l.*], vol. 4, nº 1, p. 65–2, 2012. Disponível em: http://200.198.213.102/luzparatodos/downloads/Informativo%2015.pdf.

[43] COELHO, Suani T.; GARCILASSO, Vanessa Pecora; JUNIOR, Antônio Djalma Nunes Ferraz; SANTOS, Marilin Mariano dos; JOPPERT, Caio Luca. **Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano**. São Paulo: IEE-USP, 2018.

[44] IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Bioenergy with Carbon Capture and Storage. 2025. **Energy System**. Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage. Acesso em: 8 set. 2025.

[45] CONSOLI, Christopher. **Bioenergy and Carbon Capture and Storage**. [*S. l.*: *s. n.*], 2019.

[46] SIEVERT, Katrin; CAMERON, Laura; CARTER, Angela. **The Bottom Line**: Why the cost of carbon capture and storage remains persistently high. [*S. l.*: *s. n.*], 2023.

[47] VAZ, Sílvio; SOUZA, Ana Paula Rodrigues de; BAETA, Bruno Eduardo Lobo. Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. **Cleaner Engineering and Technology**, [*s. l.*], vol. 8, p. 100456, 1 jun. 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822000611. Acesso em: 9 set. 2025.

[48] SILVA, Fabio T. F. da; CARVALHO, Francielle M.; CORRÊA, Jorge Luiz G.; MERSCHMANN, Paulo R.de C.; TAGOMORI, Isabela S.; SZKLO, Alexandre; SCHAEFFER, Roberto. CO_2 capture in ethanol distilleries in Brazil: Designing the optimum carbon transportation network by integrating hubs, pipelines and trucks. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, [*s. l.*], vol. 71, p. 168–183, 1 abr. 2018. DOI 10.1016/J.IJGGC.2018.02.018. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583617304371. Acesso em: 9 set. 2025.

[49] BRASIL. **Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024**. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999, 8.723, de 28 de outubro de 1993, e 13.033, de 24 de setembro de 2014; e revoga dispositivo da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. 8 out. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14993.htm. Acesso em: 10 ago. 2025.

[50] ICAO - INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Strategic Plan 2026 - 2050**. 2024. Disponível em: https://www.icao.int/about-icao/Council/strategic-plan-2026-2050. Acesso em: 9 set. 2025.

[51] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Combustíveis Sustentáveis de Aviação no Brasil**: Sustainable Aviation Fuel – SAF Perspectivas Futuras. Rio de Janeiro: [*s. n.*], 2024.

[52] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota de Esclarecimento NE-EPE-DPG-SDB-2024-81**. Rio de Janeiro: [*s. n.*], 10 fev. 2025.

[53] PERECIN, Danilo. **Uma avaliação da política nacional de biocombustíveis-RenovaBio**: fundamentos teóricos e os casos do etanol e do biometano. 2024. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2024.

[54] BRASIL. **Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. 26 dez. 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm. Acesso em: 8 set. 2025.

[55] RODRIGUES, Luciano; MATOS, Sabrina; VALENTE, Fernanda. **Nota Técnica**: monitoramento das emissões de gases causadores do efeito estufa (GEE) na matriz de combustíveis leves. São Paulo, SP: [*s. n.*], 2023. Disponível em: https://eesp.fgv.br/centros/observatorios/bioeconomia.

[56] ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Certificados da Produção ou Importação Eficiente de Biocombustíveis**. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/certificados-producao-importacao-eficiente-biocombustiveis. Acesso em: 9 set. 2025.

[57] BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA - CNPE. **Resolução nº 14, de 10 de dezembro de 2024**. Define as metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis. 11 dez. 2024. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-602955102. Acesso em: 8 set. 2025.

[58] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2025**: Ano base 2024. Rio de Janeiro: [*s. n.*], 2025.

[59] CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, vol. 12, nº 1, 2024.

[60] ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Painel Dinâmico de Produtores de Biodiesel**. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-biodiesel. Acesso em: 4 ago. 2025.

[61] SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES. Estimativas de Emissões. 2025. **Plataforma SEEG 12.0**. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/?yearRange%5B0%5D=1990&yearRange%5B1%5D=2023&emissionType%5B0%5D=1&gas=8&groupBy=Sector&rankBy=State. Acesso em: 4 ago. 2025.

2 *BAHIA AS A STRATEGIC TERRITORY FOR BIOENERGY*
A BAHIA COMO TERRITÓRIO ESTRATÉGICO PARA A BIOENERGIA

[1] IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy Review 2025 Dataset**. mar. 2025. Disponível em: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/global-energy-review-2025-dataset#global-energy-review-2025-dataset. Acesso em: 4 ago. 2025.

[2] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2025**: Ano base 2024. Rio de Janeiro: 2025.

[3] ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Evolução da Capacidade instalada no SIN – maio 2025/dezembro 2029. 2025. **O Sistema em Números**. Disponível em: https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros. Acesso em: 4 ago. 2025.

[4] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA**. 2025. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNGE3NjVmYjAtNDFkZC00MDY4LTliNTItMTVkZTU4NWYzYzFmIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBlMSIsImMiOjR9. Acesso em: 4 ago. 2025.

[5] IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable energy statistics 2025**. Abu Dhabi: 2025. Disponível em: https://www.irena.org/Publications/2025/Jul/Renewable-energy-statistics-2025. Acesso em: 4 ago. 2025.

[6] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapas físicos dos estados**. 2025. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/mapas_estaduais_e_distrito_federal/fisico/ba_fisico1400k_2011.pdf. Acesso em: 4 ago. 2025.

[7] CAMARGO-SCHUBERT ENGENHARIA EÓLICA; BACK, Alexander Clasen; SILVA, Fabiano de Jesus Lima da; CATANI, Fábio; ESTANTE, Frederico Eduardo da Cunha; LIMA, Guilherme Guebur; VIOLATO, Gustavo Oliveira; ARAÚJO, James Lenzi de; AMARANTE, Odilon Antônio Camargo do; ANDRADE, Paulo Emiliano Piá de; FREITAS, Ramon Morais de. **Atlas eólico**: Bahia. 2013. Disponível em: http://repositorio.universidadesenaicima-tec.edu.br/handle/fieb/353. Acesso em: 2 jun. 2025.

[8] INEMA - INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Geobahia**. 2025. Disponível em: http://mapa.geobahia.ba.gov.br/. Acesso em: 18 maio 2025.

[9] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atlas Nacional Digital do Brasil - PGI**. 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/atlas_nacional/#/mapa/. Acesso em: 2 ago. 2025.

[10] BEZERRA, Francisco José Araújo; BERNARDO, Tibério Rômulo Romão; XIMENES, Luciano J. F.; VALENTE JUNIOR, Airton Saboya. **Perfil socioeconômico da Bahia**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2015.

[11] SÁ, Marcos Aurélio Carolino de; MARTINS, Éder de Souza; BETTIOL, Giovana Maranhão; BRAGA, Adriana Reatto dos Santos. Solos do bioma Cerrado e sua interação com as áreas irrigadas sob pivô. *In*: RODRIGUES, Lineu Neiva (org.). **Agricultura irrigada no Cerrado**: subsídios para o desenvolvimento sustentável. 2. ed revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2024. p. 279–320. Disponível em: www.embrapa.br/cerrados.

[12] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **PAM - Produção Agrícola Municipal (2023)**. 2024. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas.

[13] MALHEIROS, Eduarda M.; SILVA, Diego C.; SILVA, Vanessa da S. G.; PALUCH, Márlon. Estudo entomofaunístico comparativo do sistema agroflorestal cacau-cabruca e Mata Atlântica no sul da Bahia. **Agrotrópica**, vol. 28, nº 3, p. 253–266, set. 2016.

[14] VERACEL CELULOSE. **Plano de Manejo Florestal Veracel Celulose 2022-2023**. 2022.

[15] BRASIL. **Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. 22 dez. 2006. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm. Acesso em: 13 fev. 2021.

[16] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Pecuária Municipal 2023**. 2024.

[17] SEI - SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **Produção Agrícola – Bahia**. Painel de gráficos dinâmicos (PGD), 2023. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNzgyZGJlZWUtMGY5NC00MDVhLTg5NTMtYTZlNjg4ODk2NjI4IiwidCI6IjRjZDgzNWY0LTU0NDAtNDA4Zi05M2EzLTk3NWZjMTdjMzg0YSIsImMiOjR9. Acesso em: 5 ago. 2025.

[18] ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Massas d'água**. 2024. Disponível em: https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/4c606c38ee534b84bffe70ca6c8552c6_0/about. Acesso em: 16 maio 2025.

[19] FUNAI - FUNDAÇÃO NACIONAL DOS POVOS INDÍGENAS. **Demarcação**. 23 ago. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/demarcacao-de-terras-indigenas. Acesso em: 4 ago. 2025.

[20] FUNDAÇÃO CULTURAL PALMARES. **Informações Quilombolas**. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/palmares/pt-br/departamentos/protecao-preservacao-e-articulacao/informacoes-quilombolas/. Acesso em: 4 ago. 2025.

[21] BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. jul. 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm#:~:text=LEI%20No%209.985%2C%20DE%2018%20DE%20JULHO%20DE%202000.&text=Regulamenta%20o%20art.%20225%2C%20%C2%A7,Natureza%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAncias. Acesso em: 10 jan. 2025.

[22] BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA). Painel de Unidades de Conservação Brasileiras. 2024. **Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC)**. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiMGNmMGY3NGMtNWZlOC00ZmRmLWExZWItNTNiNDhkZDg0MmY4IiwidCI6IjM5NTdhMzY3LTZkMzgtNGMxZi1hNGJhLTMzZThmM2M1NTBlNyJ9&pageName=ReportSectione0a112a2a9e0cf52a827. Acesso em: 5 ago. 2025.

[23] FUNAI - FUNDAÇÃO NACIONAL DOS POVOS INDÍGENAS. Terras Indígenas: Dados Geoespaciais e Mapas. 2024. **Terras indígenas**. Disponível em: https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/geoprocessamento-e-mapas. Acesso em: 5 jan. 2025.

[24] FUNDAÇÃO CULTURAL PALMARES. Certificação Quilombola. jul. 2024. **Proteção, Preservação e Articulação**. Disponível em: https://www.gov.br/palmares/pt-br/departamentos/protecao-preservacao-e-articulacao/certificacao-quilombola. Acesso em: 5 jan. 2025.

[25] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2 ed revista e ampliada. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

[26] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Vegetação. 2023. **BDIA - Banco de Dados e Informações Ambientais**. Disponível em: https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home. Acesso em: 7 jan. 2025.

[27] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação**. 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados. Acesso em: 2 ago. 2025.

[28] SEI - SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. O estado em números. **InfoBahia**, 2025.

[29] SEI - SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. População por Território de Identidade. 2022. **SEI - Demografia**. Disponível em: https://infovis.sei.ba.gov.br/demografia/. Acesso em: 5 ago. 2025.

[30] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Projeções da População do Brasil e Unidades da Federação: 2000-2070. 2024. **Projeções da População**. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?edicao=41053. Acesso em: 4 ago. 2025.

[31] FIRJAN - FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. **Índice FIRJAN de Desenvolvimento Municipal**. 2025. Disponível em: https://www.firjan.com.br/ifdm/downloads/. Acesso em: 4 ago. 2025.

[32] SEI - SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. Participação no PIB, 2022 por Territórios de Identidade da Bahia. **Territórios de Identidade**, 2022. Disponível em: https://www.ba.gov.br/sei/territorios-de-identidade-0. Acesso em: 5 ago. 2025.

[33] SEI - SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. **PIB Estadual Anual**. 2025. Disponível em: https://www.ba.gov.br/sei/pib-estadual-0. Acesso em: 5 ago. 2025.

[34] ABAF - ASSOCIAÇÃO BAIANA DAS EMPRESAS DE BASE FLORESTAL. **Bahia Florestal - Dados Setoriais (Ano-Base 2022)**. 2023.

REFERENCES
REFERÊNCIAS

[35] ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2025**. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-brasileiro-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-2025#Secao4. Acesso em: 4 ago. 2025.

[36] ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Painel Dinâmico de Produtores de Biodiesel**. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-biodiesel. Acesso em: 4 ago. 2025.

[37] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **RALIE - Acompanhamento da Expansão da Oferta de Geração**. 2025. Disponível em: https://portalrelatorios.aneel.gov.br/Ralie. Acesso em: 4 ago. 2025.

[38] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Plano de Desenvolvimento da Distribuição – PDD**. 2025. Disponível em: https://portalrelatorios.aneel.gov.br/indicadores-Distribuicao/planoDesenvolvimentoDistribuicao. Acesso em: 4 ago. 2025.

[39] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Base de Dados Geográfica da Distribuidora**. 2023. Disponível em: https://dadosabertos-aneel.opendata.arcgis.com/datasets/c7d73b3983e1430aa85a376be86b0c40/about. Acesso em: 4 ago. 2025.

[40] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **SIGEL**: Mapa de Transmissão do Setor Elétrico. 2025. Disponível em: https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/index.html. Acesso em: 4 ago. 2025.

[41] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BEN - Séries Históricas e Matrizes**. 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas.

[42] AWS TRUEPOWER; CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS; FIEB/SENAI CIMATEC. **Atlas solar**: Bahia. 2018.

[43] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão da Malha de Transporte Dutoviário - PEMAT 2022**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-da-malha-de-transporte-dutoviario-pemat/plano-decenal-de-expansao-da-malha-de-transporte-dutoviario-pemat-2022. Acesso em: 4 ago. 2025.

[44] BAHIAGÁS - COMPANHIA DE GÁS DA BAHIA. **Relatório da Administração 2024**. Salvador: 2025.

[45] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Sistema de informações geográficas do setor energético Brasileiro. 2024. **Webmap EPE**. Disponível em: https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/. Acesso em: 1 jan. 2025.

[46] BAHIAGÁS - COMPANHIA DE GÁS DA BAHIA. **Rede de Distribuição**. 2025. Disponível em: https://www.bahiagas.com.br/bahiagas/rede-de-distribuicao. Acesso em: 4 ago. 2025.

[47] SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES. Estimativas de Emissões. 2025. **Plataforma SEEG 12.0**. Disponível em: https://plataforma.seeg.eco.br/?yearRange%5B0%5D=1990&yearRange%5B1%5D=2023&emissionType%5B0%5D=1&gas=8&groupBy=Sector&rankBy=State Acesso em: 4 ago. 2025.

[48] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Emissions Gap Report 2024**: No more hot air… please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments. United Nations Environment Programme, 2024. DOI 10.59117/20.500.11822/46404. Disponível em: https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46404.

[49] ONTL - OBSERVATÓRIO NACIONAL DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA. Infraestruturas Básicas. 2025. **Consultas à base de dados**. Disponível em: https://ontl.infrasa.gov.br/dados/consultas-a-base-de-dados/. Acesso em: 4 ago. 2025.

[50] PESSOTI, Fernanda Calasans C. L.; PESSOTI, Gustavo Casseb. Panorama econômico da Bahia no século XXI. **BNB Conjuntura Econômica**: edição especial 15 anos. p. 387–408, 2019. Disponível em: s1dspp01.dmz.bnb:8443/s482-dspace/handle/123456789/1321. Acesso em: 5 ago. 2025.

[51] INVESTE BAHIA. **Infraestrutura**. 2025. Disponível em: http://www.investebahia.com/sobre-a-bahia/infraestrutura/. Acesso em: 4 ago. 2025.

[52] SENAI CIMATEC - SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Atlas H_2V Bahia**. Salvador, 2023.

[53] INVESTE BAHIA. Distritos Industriais. 2025. **Guia Industrial do Estado da Bahia**. Disponível em: http://www.investebahia.com/investidor/guia-industrial/. Acesso em: 5 ago. 2025.

[54] GUIMARÃES, Luís. Oeste Baiano pode receber a instalação de biorrefinaria de milho - Anota Bahia. **Anota Bahia**, 10 jul. 2024. Disponível em: https://anotabahia.com/oeste-baiano-pode-receber-a-instalacao-de-biorrefinaria-de-milho/. Acesso em: 3 ago. 2025.

[55] BAHIAINVESTE - EMPRESA BAIANA DE ATIVOS S.A. **Informações técnicas sobre os empreendimentos Acelen Renováveis e Biocombustíveis do Oeste S.A**. Salvador, 2025. Informação não publicada.

[56] SINDICOMBUSTIVEIS BAHIA. **Governo da Bahia aprova investimento de R$ 1,8 bilhão em etanol no oeste da Bahia**. nov. 2024. Disponível em: https://www.sindicombustiveis.com.br/governo-da-bahia-aprova-investimento-de-r-18-bilhao-em-etanol-no-oeste-da-bahia/. Acesso em: 5 ago. 2025.

[57] ACELEN RENOVÁVEIS. **Acelen Renováveis dá início ao plantio da macaúba em Cachoeira**. 22 maio 2025. Disponível em: https://www.acelenrenovaveis.com.br/2025/05/22/acelen-renovaveis-da-inicio-ao-plantio-da-macauba-em-cachoeira/. Acesso em: 4 ago. 2025.

3

ENERGY RECOVERY FROM MUNICIPAL SOLID WASTE IN BAHIA
VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA BAHIA

1] BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

[2] EPA- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Energy Recovery from the Combustion of Municipal Solid Waste (MSW)**. Washington, DC, U.S. EPA, 2 de maio de 2025. Disponível em: https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw. Acesso em: 5 ago. 2025.

[3] CIRCLE ECONOMY. **The Circularity Gap Report 2021**. Amsterdam: Circle Economy, 26 jan. 2021. Disponível em: https://www.circularity-gap.world/2021#downloads. Acesso em: 5 ago. 2025.

[4] BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA (MMA). **Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES)**. Brasília: MMA, publicado em 05 jul. 2022; Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/plano-nacional-de-residuos-solidos. Acesso em: 5 ago. 2025.

[5] ABREMA– ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. Brasília: ABREMA, dez. 2024. Disponível em: https://www.abrema.org.br/panorama/. Acesso em: 5 ago. 2025.

[6] BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES (MCID). **Relatório dos Serviços de Limpeza e Manejo de Resíduos Sólidos. SINISA 2024 ano de referência 2023**. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/resultados-sinisa/RELATORIO_SINISA_RESIDUOS_SOLIDOS_2024.pdf. Acesso em: 02 jul. 2025.

[7] OBSERVATÓRIO DO CLIMA; IEMA; ICLEI; IPAM; IMAFLORA. **Análise das emissões de gases de efeito estufa 1970–2023 e suas implicações para as metas climáticas do Brasil**. Rio de Janeiro: Observatório do Clima, 2024. Disponível em: https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf. Acesso em: 5 ago. 2025.

[8] CIBIOGAS – CIBIOGAS ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Panorama do Biogás no Brasil 2022**. Disponível em: https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2022/04/NT-PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2021.pdf. Acesso em: 2 de julho 2025.

[9] ORIZON VR (BARUERI ENERGIA RENOVÁVEL). **URE Barueri**: **Primeira Usina *Waste to Energy* da América Latina**. Barueri, SP: Orizon VR, 2024. Disponível em: https://urebarueri.com.br/. Acesso em: 5 ago. 2025.

[10] MALUF FILHO, Durval. Perspectivas para recuperação energética de resíduos sólidos urbanos em pequenos e médios municípios por meio do processo de gaseificação. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

[11] BAHIA (Estado). SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO URBANO (SEDUR-BA). **Plano Estadual de Resíduos Sólidos da Bahia (PERS-BA)**. Salvador: SEDUR-BA. Disponível em: https://www.ba.gov.br/sedur/gestao-territorial/residuos-solidos. Acesso em: 5 ago. 2025.

[12] ZAFAR, Salman. Waste-to-Energy Pathways. 2023. **Energy, Technology, Waste Management**. Disponível em: https://www.ecomena.org/wte-pathways/.Acesso em: 18 maio 2025.

[13] COELHO, Suani T.; GARCILASSO, Vanessa Pecora; SANTOS, Marilin Mariano dos; ESCOBAR, Javier Farago; PERECIN, Danilo; SOUZA, Diego Bonfim de. **Atlas de bioenergia do estado de São Paulo**. 1. ed. São Paulo: IEE-USP, 2020.

[14] CEWEP – CONFEDERATION OF EUROPEAN WASTE-TO-ENERGY PLANTS. **Novel cement and building materials from incineration bottom ash**. 2024. Disponível em: https://www.cewep.eu/building-materials-from-bottom-ash/. Acesso em: 6 jan. 2025.

[15] SEDUR/GAB/SGT/DRES. SECRETÁRIA DE DESENVOLVIMENTO URBANO. DIRETORIA DE MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E DAS ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS. **Convênio Atlas 002/2023**: Solicitação de dados de RSU/Esgoto Sanitário/Infraestrutura de Gás Natural. Salvador, 2025. Informação não publicada.

[16] IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Genebra: IPCC, 2019. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html. Acesso em: 9 ago. 2025.

[17] ABIOGAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano PNBB - Versão 2**. 2018.

[18] ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 886, de 29 de setembro de 2022**. Estabelece a especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais, a ser comercializado no território nacional. 29 set. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biometano.

[19] DUARTE, Pedro Alves; SCHOENELL, Elisa Kerber. **Encerramento de lixão e aterro controlado**: **orientação e alertas**. Brasília: CNM, 2024.

[20] KITTO, John B.; STULTZ, Steven C. **Steam, its generation and use**. 41. ed. Barberton, Ohio: The Babcock & Wilcox Company, 2005.

[21] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Aneel aprova reajuste tarifário da Neoenergia Coelba (BA)**. Brasília: ANEEL, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/aneel. Acesso em: 6 ago. 2025.

[22] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br. Acesso em: 6 ago. 2025.

[23] CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA (CNPE). **Resolução n.º 6, de 23 de junho de 2022**. Institui o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), com o objetivo de fortalecer o mercado e a indústria do hidrogênio enquanto vetor energético. Diário Oficial da União: seção 147, Brasília, DF, 04/08/2022. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2022/res_cnpe-6-2022.pdf. Acesso em: 9 ago. 2025.

[24] BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**: relatório final. Brasília: MME; Rio de Janeiro: EPE, nov. 2020. Disponível em: site da EPE. Acesso em: 9 ago. 2025.

4 *ENERGY RECOVERY FROM SANITARY SEWAGE IN BAHIA*
VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO ESGOTO SANITÁRIO NA BAHIA

[1] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648 - Estudo de concepção sistemas**. 1986. Disponível em: https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5589/abnt-nbr9648-estudo-de-concepcao-de-sistemas-de-esgoto-sanitario-procedimento. Acesso em: 29 jul. 2025.

[2] BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES (MCID). **Sistema nacional de informações sobre saneamento (SNIS) - Painel de Informações**. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/painel. Acesso em: 27 jul. 2025.

[3] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022 - PG**I. 2022. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/apps/pgi/#/home. Acesso em: 27 jul. 2025.

[4] BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO AMBIENTAL - SNSA. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto**: Visão Geral. Brasília, DF: [*s. n.*], 2023. Disponível em: www.snis.gov.br.

[5] BRASIL. **Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. 5 jan. 2007. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2007/lei-11445-5-janeiro-2007-549031-publicacaooriginal-64311-pl.html. Acesso em: 2 mai. 2025.

[6] BRASIL. **Lei nº 8.080, de 19 de setembro de 1990**. Dispõe sobre as condições para a promoção, proteção e recuperação da saúde, a organização e o funcionamento dos serviços correspondentes e dá outras providências. 19 set. 1990. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8080.htm. Acesso em: 2 mai. 2025.

[7] BRASIL. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. 8 jan. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 2 mai. 2025.

[8] BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. 1981. Disponível em: http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1980-1987/lei-6938-31-agosto-1981-366135-publicacaooriginal-1-pl.html. Acesso em: 2 maio 2025.

[9] BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. 15 jul. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 2 mai. 2025.

[10] BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Painel de Indicadores - 2024**. [*S. l.*], 2025. Disponível em: https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/dashboard?modulo=esgoto. Acesso em: 16 set. 2025.

[11] COELHO, Suani T.; GARCILASSO, Vanessa Pecora; SANTOS, Marilin Mariano dos; ESCOBAR, Javier Farago; PERECIN, Danilo; SOUZA, Diego Bonfim de. **Atlas de bioenergia do estado de São Paulo**. 1 ed. São Paulo: IEE-USP, 2020.

[12] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação**. 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados. Acesso em: 27 jul. 2025.

[13] ABIOGAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano PNBB - Versão 2**. 2018.

[14] SABESP – COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Estimativas de emissões de metano na Sabesp**. 2018.

[15] ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 886, de 29 de setembro de 2022**. Estabelece a especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano oriundo de

aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais, a ser comercializado no território nacional. 29 set. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biometano. Acesso em: 29 jul. 2025.

[16] NASCIMENTO, Carla Janira Souza do. O mercado de gás natural no Brasil e na Bahia e os seus reflexos sobre a indústria de transformação. **Conjuntura & Planejamento**, nº 204, p. 37–63, jan. 2023.

[17] BRASIL. **Lei nº 14.300, de 06 de janeiro de 2022**. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. 6 jan. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm. Acesso em: 2 ago. 2025.

[18] BRASIL. **Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996**. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. 26 dez. 1996. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9427cons.htm. Acesso em: 2 ago. 2025.

[19] BRASIL. **Medida Provisória n° 1300, de 2025**. Altera a Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995, a Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, a Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, a Lei nº 12.111, de 9 de dezembro de 2009, a Lei nº 12.212, de 20 de janeiro de 2010, a Lei nº 13.203, de 8 de dezembro de 2015, e a Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. 2025. Disponível em: https://www.congressonacional.leg.br/materias/medidas-provisorias/-/mpv/168719. Acesso em: 2 ago. 2025.

[20] BRASIL. **Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024**. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono; institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro); cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera as Leis nºs 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e 9.478, de 6 de agosto de 1997. 2 ago. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm. Acesso em: 2 mai. 2025.

5 *ENERGY RECOVERY FROM AGRICULTURAL RESIDUES IN BAHIA*
VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS NA BAHIA

[1] PENNACCHI, João Paulo. **Gestão de resíduos na agricultura**: boas práticas e sustentabilidade. 2024. Disponível em: https://blog.aegro.com.br/gestao-de-residuos-na-agricultura-boas-praticas-e-sustentabilidade/. Acesso em: 17 dez. 2024.

[2] SPADOTTO, Claudio Aparecido; RIBEIRO, Wagner Costa (editores técnicos). **Gestão de Resíduos na Agricultura e Agroindústria**. Botucatu: FEPAF, 2006. Disponível em: https://www.bibliotecaagptea.org.br/administracao/agroindustria/livros/GESTAO%20DE%20RESIDUOS%20NA%20AGRICULTURA%20E%20AGROINDUSTRIA.pdf. Acesso em: 17 dez. 2024.

[3] VAZ JÚNIOR, Silvio. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais**: uma abordagem sustentável. Embrapa Agroenergia, 2020. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1126255/aproveitamento-de-residuos-agroindustriais-uma-abordagem-sustentavel. Acesso em: 17 dez. 2024.

[4] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **PAM - Produção Agrícola Municipal (2023)**. 2024. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas. Acesso em: 22 fev. 2024.

[5] CNA- CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. **Panorama do Agro**: A CNA defende, trabalha e fala em seu nome e de todos os produtores rurais do Brasil. Disponível em: https://www.cnabrasil.org.br/cna/panorama-do-agro. Acesso em: 3 ago. 2025.

[6] CAMARGO-SCHUBERT ENGENHARIA EÓLICA; BACK, Alexander Clasen; SILVA, Fabiano de Jesus Lima da; CATANI, Fábio; ESTANTE, Frederico Eduardo da Cunha; LIMA, Guilherme Guebur; VIOLATO, Gustavo Oliveira; ARAÚJO, James Lenzi de; AMARANTE, Odilon Antônio Camargo do; ANDRADE, Paulo Emiliano Piá de; FREITAS, Ramon Morais de. **Atlas eólico**: Bahia. 2013. Disponível em: http://repositorio.universidadesenaicimatec.edu.br/handle/fieb/353. Acesso em: 6 ago. 2025.

[7] SANTOS, Sara Andrade; GOMES, Andréa da Silva; PIRES, Mônica de Moura; GOMES, Ronaldo Lima. Estrutura fundiária na Bahia, Brasil: uma análise sob a ótica do índice de Gini. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 573-584, 2022.

[8] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6778. Acesso em: 8 jun. 2025.

[9] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE explica**: Coco-da-baía. 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/coco-da-baia/ba. Acesso em: 20 dez. 2024.

[10] SECOM - SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO SOCIAL. **Agronegócio respondeu por 22,5% da economia baiana em 2024**. 2025. Disponível em: https://www.ba.gov.br/comunicacao/noticias/2025-03/366625/agronegocio-respondeu-por-225-da-economia-baiana-em-2024. Acesso em: 6 abr. 2025.

[11] CEPEA - CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **PIB do agronegócio**. 2024. Disponível em: https://www.cepea.org.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx. Acesso em: 15 abr. 2025.

[12] CORDEIRO, Noélle Khristinne; CARDOSO, Kerolém Prícila Souza; DA MATA, Tatiane Calandrino; BARBOSA, Jaqueline de Araújo, GONÇALVES JÚNIOR, Affonso Celso. Gestão de resíduos agrícolas como forma de redução dos impactos ambientais. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 14, n. 2, p. 23-34, 2020.

[13] BAHIA (Estado). **Lei n.º 12.932, de 07 de janeiro de 2014**. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos, e dá outras providências. 2014. Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=264190. Acesso em: 17 dez. 2024.

[14] SEAGRI - SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA, IRRIGAÇÃO, PESCA E AQUICULTURA. **Panorama da Agricultura, pecuária, pesca e aquicultura da Bahia**: destaques 2023. Salvador, 2024.

[15] OLIVEIRA, Evelyn de; SOARES, Pedro Henrique Pereira; LUCHESI, Rosemeire. **Uso do biodigestor em propriedades rurais**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – ETEC, Franca, 2024.

[16] CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; OLIVARES GÓMEZ, Edgardo (orgs.). **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. ISBN 978-85-268-0783-9.

[17] PINHEIRO, Érika Flávia Machado; OLIVEIRA, Adriana Paulo de Souza; MATOS, Camila Ferreira; DE ARAÚJO, Sayonara Costa; NASCIMENTO, Izabela Gouveia; CAMPOS, David Villas Boas. **Tratamento aeróbio e anaeróbio da biomassa**: do desperdício à obtenção de matérias-primas que reciclam nutrientes e energia. 2022. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1145684/1/Tratamento-aerobio-e-anaerobio-da-biomassa-2022.pdf. Acesso em: 15 mai. 2025.

[18] LEITE, Edson Rubens da Silva Leite; PROTÁSIO, Thiago de Paula; ROSADO, Sebastião Carlos da Silva; TRUGILHO, Paulo Fernando; DE MELO, Isabel Cristina. Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira do cafeeiro, para uso bioenergético. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 251 - 261, abr./jun. 2015.

[19] ANATER, Mônica Joelma do Nascimento; Sanquetta, Carlos Roberto; Brand, Martha Andreia; da Silva, Dimas Agostinho; Dalla Corte, Ana Paula. Analysis of charcoal quality for residential use in the region of Curitiba, Parana, Brazil. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 123, p. 494-504, 2019.

[20] PAGEL, Uonis Raasch; CAMPOS, Adriana Fiorotti; DE SOUZA, Victor Hugo Alves; CAROLINO, Jaqueline. Possibilidades de utilização de resíduos sólidos agropecuários brasileiros na produção de energia elétrica: uma análise econômica. *In*: Congresso da Sober, 56., 2018. **Anais [...]**. 2018.

[21] NONES, Daniela Letícia; BRAND, Martha Andreia; AMPESSAN, Camilla Gabriela Melo; FRIEDERICHS, Gustavo. Biomassa residual agrícola e florestal na produção de compactados para geração de energia. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 2, p. 155-164, 2017.

[22] COELHO, Suani T.; GARCILASSO, Vanessa Pecora; SANTOS, Marilin Mariano dos; ESCOBAR, Javier Farago; PERECIN, Danilo; SOUZA, Diego Bonfim de. **Atlas de bioenergia do estado de São Paulo**. 1. ed. São Paulo: IEE-USP, 2020.

[23] CANAL RURAL. **Algodão baiano se destaca pela qualidade e boas práticas de manejo**. 2024. Disponível em: https://www.canalrural.com.br/nacional/bahia/brasil-ultrapassa-eua-e-se-torna-maior-exportador-mundial-de-algodao/. Acesso em: 26 maio 2025.

[24] OLIVEIRA, Carlos Rafael Silva de; MÜLLER, Júlia de Oliveira Martins; OLIVEIRA, Patrícia Viera de; JÚNIOR, Afonso Henrique da Silva; LEAL, Tarcísio Wolff. Resíduos da indústria de algodão: estratégias eco-responsáveis para geração de bioenergia. **International Journal of Agrarian Sciences** - PDVAGRO, v. 4, n. 1, p. 1-17, 2024. DOI: 10.31692/2764-3425/v4i1.415.

[25] MARIZ, Thompson Fernandes. **Secagem de casca de caroço de algodão em leito fixo**. 1986. Dissertação (Mestrado em Engenharia Quí-

mica) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1986. Disponível em: https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/3111.

[26] PEREIRA, Allana Katiussya Silva; DELATORRE, Fabíola Martins; SOUZA, Elias Costa de; CUPERTINO, Gabriela Fontes Mayrinck; UCELLA-FILHO, João Gilberto Meza; DIAS JUNIOR, Ananias. Uso do resíduo de algodão como uma alternativa sustentável para geração de energia. *In*: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 5., 2022. **Anais [...]**. 2022. DOI: 10.13140/RG.2.2.10835.86564.

[27] EMBRAPA (ALGODÃO). **Algodão, o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

[28] MAIA, BIANCA Goulart de Oliveira. **Valorização de resíduos da bananicultura e da rizicultura na produção de briquetes**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade da Região de Joinville, Joinville, SC, 2013.

[29] RIBEIRO, Gabriel R.; STEINMETZ, Ricardo L. R.; WISBECK, Elisabeth. Produção de biogás com resíduos sólidos gerados na produção de bioetanol utilizando biomassa da bananicultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, p. e282355, 2024.

[30] SOUZA, Ozair; FEDERIZZI, Mauri; COELHO, Bruna; WAGNER, Theodoro M.; WISBECK, Elisabeth. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 438-443, 2010.

[31] SEAGRI - SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA, IRRIGAÇÃO, PESCA E AQUICULTURA. **Dia da Banana**: Segundo maior produtor do Brasil, Estado da Bahia investe em irrigação e tecnologia. 2023. Disponível em: https://www.ba.gov.br/seagri/noticias/2023/09/22/dia-da-banana-segundo-maior-produtor-do-brasil-estado-da-bahia-investe-em. Acesso em: 9 jun. 2025.

[32] SECOM - SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO SOCIAL. **Adab prepara equipes para atuar em emergências fitossanitárias**. 2025. Disponível em: https://www.ba.gov.br/comunicacao/noticias/2025-05/369201/adab-prepara-equipes-para-atuar-em-emergencias-fitossanitarias. Acesso em: 9 jun. 2025.

[33] MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO. **Cacau da Bahia**: 70% da produção nacional. 2017. Disponível em: https://www.cnabrasil.org.br/noticias/cacau-da-bahia-70-da-producao-nacional. Acesso em: 24 jun. 2025.

[34] CARDOSO, Simone de Aviz; SILVA, Ivete Texeira da; ROCHA, Brígida Ramati Pereira; DA SILVA, Isa Maria Oliveira. Utilização de resíduos de cacau para a produção de energia no Estado do Pará. *In*: Encontro De Energia no Meio Rural, 4., 2002, Campinas. **Anais [...]**. Campinas, 2002. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000200066&lng=en&nrm=abn. Acesso em: 11 jun. 2025.

[35] EXAME. **Como o cacau pode fazer muito mais do que chocolate**. 2024. Disponível em: https://exame.com/negocios/como-o-cacau-pode-fazer-muito-mais-do-que-chocolate/. Acesso em: 11 mai. 2025.

[36] SHIBATA, Roberto Toyohiro; REZENDE, Joelito de Oliveira; SOUZA, Luciano da Silva. **Citricultura nos estados da Bahia e Sergipe**. 2014. Disponível em: https://www.ba.gov.br/seagri/sites/site-seagri/files/migracao_2024/arquivos/files/4_socioeconomia02v9n3_0.pdf. Acesso em: 21 mai. 2025.

[37] VIDAL, Maria de Fátima. Citricultura (Laranja). **Caderno Setorial ETENE**, v. 9, n. 328, 2024. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/2621. Acesso em: 31 mai. 2025.

[38] AZEVEDO, Fernando Alves de; LANZA, Nathalia Barbosa; SALES, Cristina R. G.; SILVA, Karina Iolanda; BARROS, Andre Luiz; NEGRI, Jose Dagoberto. Poda na citricultura. **Citrus Research & Technology**, v. 34, n. 1, p. 17-30, 2017. DOI: 10.5935/2236-3122.20130003.

[39] LEITE, Rafael. **Épocas de colheita**. Agricitrus, 2020. Disponível em: https://www.agricitrus.com.br/2021/07/22/epocas-de-colheita/. Acesso em: 8 fev. 2025.

[40] FERRER, E.; POMARES, F.; CANET, R.; ALBIACH, Reme; TARAZONA, F. Estudio sobre la incorporación de los restos de poda de cítricos en diferentes municipios de la provincia de Valencia. **Levante Agrícola**, n. 379, p. 24–28, 2006.

[41] VELÁZQUEZ-MARTÍ, Borja; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, Emmanuelle; LÓPEZ-CORTÉS, Isabel; CALLEJÓN-FERRE, Ángel Jesús. Prediction and evaluation of biomass obtained from citrus trees pruning. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 11, n. 3–4, p. 1485–1491, 2013.

[42] ARAGÃO, Wilson Menezes; RAMOS, Semíramis Rabelo Ramalho; ALVES, Maria Clea Santos. Cultivares de coqueiro. *In*: **A cultura do coqueiro**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2016.

[43] ROCHA, Fernanda Barreto de Almeida; CAMPOS, Marianna Cruz; COLOMBO, Ciliana Regina; CELESTINO, Joyce Elanne Mateus. Gestão de resíduos como ferramenta aplicada ao beneficiamento do coco verde. *In*: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 30., 2010, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos, 2010. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_tn_sto_121_788_17278.pdf.

[44] MARAFON, Anderson Carlos; NUNES, Maria Urbana Corrêa; AMARAL, André Felipe Câmara; SANTOS, Jonas Paulino dos. **Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica**: potencialidades e desafios. 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.25462.75843.

[45] AGÊNCIA CÂMARA DE NOTÍCIAS. **Comissão aprova sistema de coleta seletiva e logística reversa para o coco verde**. 2024. Disponível em: https://www.camara.leg.br/noticias/1071878-comissao-aprova-sistema-de-coleta-seletiva-e-logistica-reversa-para-o-coco-verde. Acesso em: 18 dez. 2024.

[46] BARCELLOS, Caio. **Inpasa anuncia construção de biorrefinaria na Bahia**. Poder360, 2025. Disponível em: https://www.poder360.com.br/poder-agro/inpasa-anuncia-construcao-de-biorrefinaria-na-bahia/. Acesso em: 18 mai. 2025.

[47] SEAGRI - SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA, IRRIGAÇÃO, PESCA E AQUICULTURA. **Soja da Bahia confirma maior produtividade do Brasil na safra 2022/23**. 2023. Disponível em: http://www.seagri.ba.gov.br/noticias/2023/05/12/soja-da-bahia-confirma-maior-produtividade-do-brasil-na-safra-202223-produ%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 17 dez. 2024.

[48] TORDIN, Cristina. **Tecnologia monitora transmissão do calor em frutas e ajuda a reduzir perdas na pós-colheita**. Embrapa Meio Ambiente, 2025. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/98435676/tecnologia-monitora-transmissao-do-calor-em-frutas-e-ajuda-a-reduzir-perdas-na-pos-colheita. Acesso em: 15 mai. 2025.

[49] OLIVEIRA, Ellen Rayssa; PRECZENHAK, Ana Paula; KLUGE, Ricardo Alfredo. Técnicas para conservação de frutas em pós-colheita. **Campo & Negócios**, 2023. Disponível em: https://revistacampoenegocios.com.br/tecnicas-para-conservacao-de-frutas-em-pos-colheita/. Acesso em: 21 jun. 2025.

[50] INÁCIO, Caio de Teves; BETTIO, Daniel Beltrão; MILLER, Paul Richard Momsen. **Potencial de mitigação de emissões de metano via projetos de compostagem de pequena escala**. 2009. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/664359/1/Potencialdemitigacaodeemissoesdemetanoviaprojetosdecompostagemdepequenaescala.pdf. Acesso em: 25 jun. 2025.

[51] LEITÃO, Renato Carrhá; BARCELLOS, William Magalhães. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos de centrais de abastecimento**. 2021. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1136856/1/DOC-195.pdf. Acesso em: 25 jun. 2025.

[52] ÁVILA, Eduardo Ribeiro da Silva; PRATES, Mauro de Oliveira. **Avaliação e projeção de biodigestor caseiro acessível para pequenos produtores rurais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2019. Disponível em: https://www3.dti.ufv.br/sig_del/consultar/download/492. Acesso em: 25 jun. 2025.

REFERENCES
REFERÊNCIAS

6

ENERGY RECOVERY FROM FORESTRY RESIDUES IN BAHIA
VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DO SETOR FLORESTAL NA BAHIA

[1] IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual IBÁ 2024**. São Paulo: [s. n.], 2024.

[2] ABAF - ASSOCIAÇÃO BAIANA DAS EMPRESAS DE BASE FLORESTAL. **Bahia Florestal - Dados Setoriais (Ano-Base 2022)**. 2023.

[3] VIDAL, André Carvalho Foster; HORA, André Barros da. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **Papel e Celulose**, nº 33, p. 261–314, 2011. Disponível em: http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2523.

[4] FAGUNDES, Hilton Albano Vieira. **Produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul**. 2003. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. Disponível em: http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4567/000412901.pdf?sequence=1.

[5] MININI, Daniela; BRAGA, Bruna de Araújo; MARIA, Daiane de Moura Borges; GMACH, Franciele; ALBUÊS, Theonizi Angélica Silva; JESUS, Wesley Santos; MONTEIRO, Thiago Campos. Qualidade e processamento da madeira serrada no Brasil: estado da arte. **Madeiras Nativas e Plantadas do Brasil**: qualidade, pesquisas e atualidades. Editora Científica Digital, 2021. p. 401–419. https://doi.org/10.37885/210604911.

[6] STRAGLIOTTO, Michelly Casagrande; PEREIRA, Bárbara Luísa Corradi; OLIVEIRA, Aylson Costa. Indústrias madeireiras e rendimento em madeira serrada na Amazônia brasileira. **Engenharia Florestal**: Desafios, Limites e Potencialidade. Editora Científica Digital, 2020. p. 499–518. DOI 10.37885/200801030. Disponível em: http://www.editoracientifica.org/articles/code/200801030.

[7] VITAL, Benedito Rocha; CARNEIRO, Angélica Cássia; PEREIRA, Barbara Luisa. Qualidade da madeira para fins energéticos. *In*: SANTOS, Fernando (org.). **Bioenergia e Biorrefinaria**: cana de açúcar e espécies florestais. Viçosa: Os Editores, 2013. p. 322–354.

[8] MAEDA, Shizuo; MEDRADO, Moacir José Sales. Plantações florestais comerciais e o solo. *In*: OLIVEIRA, Yeda Maria Malheiros de; OLIVEIRA, Edilson Batista de (orgs.). **Plantações florestais**: geração de benefícios com baixo impacto ambiental. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 21–29.

[9] NEVES, Thalita Vicente das. **Fertilidade e atividade microbiológica do solo arenoso em floresta plantada de eucalipto, e sua relação com os resíduos da colheita**. 2022. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Estadual Paulista, 2022. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/216342.

[10] SOARES, Márcia Toffani Simão; MAEDA, Shizuo; GABIRA, Monica Moreno; BELLOTE, Antônio Francisco Jurado; ANDRADE, Guilherme de Castro; FROUFE, Luís Claudio Maranhão; BALIEIRO, Fabiano de Carvalho; CHAER, Guilherme Montandon; SANTOS, Felipe Martini dos. Eucalipto: desafios para a pesquisa em nutrição, na ótica da sustentabilidade florestal. *In*: OLIVEIRA, Edilson Batista de; PINTO JUNIOR, José Elidney (orgs.). **O eucalipto e a Embrapa**: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 515–554.

[11] SANTAROSA, Emiliano; PENTEADO JÚNIOR, Joel Ferreira; GOULART, Ives Clayton Gomes dos Reis. **Transferência de tecnologia florestal**: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Disponível em: https://www.embrapa.br.

[12] VARGAS, Lucília Maria Parron; GARCIA, Junior Ruiz; CAMPANHA, Monica Matoso; MAIA, Claudia Maria Branco de Freitas; QUEIROZ, Dalva Luiz de; PEIXOTO, Ricardo Trippia dos Guimarães; FRITZSONS, Elenice; WREGE, Marcos Silveira. Serviços ecossistêmicos e eucalipto. *In*: OLIVEIRA, Edilson Batista de; PINTO JÚNIOR, José Elidney (orgs.). **O eucalipto e a Embrapa**: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 611–666. Acesso em: 27 dez. 2024.

[13] BERNI, Mauro Donizetti; MATHIAS, Flávio Roberto de Carvalho; BAJAY, Sergio Valdir. Rotas para potenciais ganhos na eficiência energética e na gestão hídrica e na busca de reduções na intensidade de emissões da indústria brasileira de celulose e papel. **Revista Brasileira de Energia**, vol. 28, nº 4, 16 fev. 2023. https://doi.org/10.47168/rbe.v28i4.755.

[14] TOLEDO, Fábio H. S. F. de; VENTURIN, Nelson; CARLOS, Leandro; DIAS, Bruna A. S.; VENTURIN, Regis P.; MACEDO, Renato L.G. Compost of residues of pulp and paper in the production of eucalyptus seedlings. **Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental**, vol. 19, nº 7, p. 711–716, 28 jul. 2015. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p711-716.

[15] IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Árvores plantadas e recursos hídricos**. 2018. Disponível em: https://iba.org/images/shared/Info_agua_PDF_interativo.pdf. Acesso em: 3 ago. 2025.

[16] BELLOTE, Antonio Francisco Jurado; SILVA, Helton Damin da; FERREIRA, Carlos Alberto; ANDRADE, Guilherme de C. Resíduos da indústria de celulose em plantios florestais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, nº 37, p. 99–106, jul. 1998. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/282198/1/abellote.pdf. Acesso em: 3 ago. 2025.

[17] COELHO, Suani T.; GARCILASSO, Vanessa Pecora; SANTOS, Marilin Mariano dos; ESCOBAR, Javier Farago; PERECIN, Danilo; SOUZA, Diego Bonfim de. **Atlas de bioenergia do estado de São Paulo**. 1 ed. São Paulo: IEE-USP, 2020.

[18] VERACEL CELULOSE. **Relatório de Sustentabilidade 2023**. 2024.

[19] SUZANO S.A. **Relatório de Sustentabilidade 2023**. 2024.

[20] SOUTO, Paulo Ganem. A indústria de celulose e papel - presença na Bahia. **Revista Opiniões**, [*s. l.*], p. 8, nov. 2006. Disponível em: https://florestal.revistaopinioes.com.br/pt-br/revista/detalhes/3-industria-de-celulose-e-papel-presenca-na-bahia/. Acesso em: 3 ago. 2025.

[21] ABIOGAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano PNBB - Versão 2**. 2018.

[22] BERNI, Mauro Donizeti; BAJAY, Sergio Valdir. Geração de energia e a digestão anaeróbica no tratamento de efluentes: estudo-de-caso na indústria de papel. **Encontro de Energia no Meio Rural** [...]. Campinas. 2000. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000100003&script=sci_arttext. Acesso em: 3 ago. 2025.

[23] ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP n 886, de 29 de setembro de 2022**. Estabelece a especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais, a ser comercializado no território nacional. 29 set. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biometano. Acesso em: 2 ago. 2025.

[24] NASCIMENTO, Carla Janira Souza do. O mercado de gás natural no Brasil e na Bahia e os seus reflexos sobre a indústria de transformação. **Conjuntura & Planejamento**, nº 204, p. 37–63, jan. 2023.

[25] BRASIL. **Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024**. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono; institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro); cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera as Leis nºs 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e 9.478, de 6 de agosto de 1997. 2 ago. 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L14948.htm. Acesso em: 2 ago. 2025.

7 *ENERGY RECOVERY OF RESIDUES FROM THE SUGAR-ENERGY SECTOR IN BAHIA*
VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO NA BAHIA

[1] FPA - FRENTE PARLAMENTAR DA AGROPECUÁRIA. **Panorama Setor Sucroenergético**. 2023. Disponível em: https://fpagropecuaria.org.br/2023/02/24/panorama-setor-sucroenergetico/?pdf=37591. Acesso em: 24 jul. 2025.

[2] ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Autorização de biocombustíveis. 2024. **Painel dinâmico**. Disponível em: https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZDRlNTQzY2MtMDdkZS00ODNlLTlmMTItYTUzNGUxMWNjMGZhIiwidCI6IjQ0OTlmNGZmLTI0YTYtNGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzkxMyJ9. Acesso em: 7 ago. 2025.

[3] UNICA DATA - OBSERVATÓRIO DA CANA E BIOENERGIA. **Bioeletricidade em números**: Geração para a Rede e Capacidade Instalada. mar. 2024. Disponível em: https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=134. Acesso em: 7 ago. 2025.

[4] CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, vol. 12, nº 1, 2024.

[5] MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Download da base completa de cadastro de instituições. 2024. **SAPCANA - Sistema de Acompanhamento de Produção Canavieira**. Disponível em: https://sistemasweb4.agricultura.gov.br/sapcana/downloadBaseCompletaInstituicao!downloadArquivoXLS.action. Acesso em: 28 maio 2024.

[6] NOVA CANA. **Brasil atinge recorde de exportação de açúcar em 2024, com 38,24 milhões de toneladas**. 9 jan. 2025. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/exportacao-acucar-2024-aumenta-9-2023-38-238-milhoes-toneladas-070125. Acesso em: 7 ago. 2025.

[7] COELHO, Suani T.; GARCILASSO, Vanessa Pecora; SANTOS, Marilin Mariano dos; ESCOBAR, Javier Farago; PERECIN, Danilo; SOUZA, Diego Bonfim de. **Atlas de bioenergia do estado de São Paulo**. 1 ed. São Paulo: IEE-USP, 2020.

[8] UNICA DATA - OBSERVATÓRIO DA CANA E BIOENERGIA. **Fotografia do setor sucroenergético no Brasil e os benefícios econômicos, ambientais e sociais gerados**. 2025. Disponível em: https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=158. Acesso em: 7 ago. 2025.

[9] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA**. 2024. Disponível em: https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel. Acesso em: 14 maio 2024.

[10] ROSSETTO, Raffaella. Planejamento da colheita. 2022. **Portal Embrapa**. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/planejamento-da-colheita. Acesso em: 7 ago. 2025.

[11] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Sistema de informações geográficas do setor energético Brasileiro. 2024. **Webmap EPE**. Disponível em: https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/. Acesso em: 1 jan. 2025.

[12] ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Massas d'água**. 2024. Disponível em: https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/4c606c38ee534b84bffe70ca6c8552c6_0/about. Acesso em: 16 maio 2025.

[13] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atlas Nacional Digital do Brasil - PGI**. 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/atlas_nacional/#/mapa/. Acesso em: 2 ago. 2025.

[14] INEMA - INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Geobahia**. 2025. Disponível em: http://mapa.geobahia.ba.gov.br/. Acesso em: 18 maio 2025.

[15] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **PAM - Produção Agrícola Municipal (2023)**. 2024. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas. Acesso em: 7 ago. 2025.

[16] SECOM - SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO DO ESTADO DA BAHIA. Uma nova fronteira de desenvolvimento. **Revista Terra Mãe**. Salvador, BA, vol. 7, p. 92–103, 2021.

[17] ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 906, de 18 de novembro de 2022**. Dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. 18 nov. 2022. Disponível em: https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-906-2022-dispoe-sobre-as-especificacoes-do-biometano-oriundo-de-produtos-e-residuos-organicos-agrossilvopastoris-e-comerciais-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-e-comerciais-a-ser-comercializado-em-todo-o-territorio-nacional?origin=instituicao&q=906. Acesso em: 7 ago. 2025.

[18] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)**. 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica. Acesso em: 7 ago. 2025.

8 *ENERGY RECOVERY FROM LIVESTOCK MANURE IN BAHIA*
VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS DEJETOS DA PRODUÇÃO ANIMAL NA BAHIA

[1] ABIEC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES. **Beef Report 2025**: **Perfil da Pecuária no Brasil**. 2025. Disponível em: https://abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2025-perfil-da-pecuaria-no-brasil/. Acesso em: 9 ago. 2025.

[2] TALAMINI, Dirceu João Duarte; MARTINS, Franco Muller. A avicultura brasileira e o mercado mundial de carnes. **Anuário 2024 da Avicultura Industrial**, nº 7, 2023.

[3] BISCOLA, Paulo Henrique Nogueira; MALAFAIA, Guilherme Cunha. Anuário CiCarne da cadeia produtiva da carne bovina 2024-2025. **Documentos 322**, Campo Grande, MS, 2025. Disponível em: www.embrapa.br/gado-de-corte.

[4] CAMPOS, Ana Cristina. Valor de produção da pecuária tem recorde, com marca de R$ 122 bilhões. **Agência Brasil**, Rio de Janeiro, 19 set. 2024. Disponível em: https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-09/valor-de-producao-da-pecuaria-tem-recorde-com-marca-de-r-122-bilhoes. Acesso em: 9 ago. 2025.

[5] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Pecuária Municipal 2023**. 2024.

[6] CNA - CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL; SENAR - SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL; CEPEA - CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. Expectativa de retorno do confinamento em 2024 frente ao cenário de custos. 2024. **Projeto Campo Futuro**. Disponível em: https://www.cnabrasil.org.br/publicacoes/expectativa-de-retorno-do-confinamento-em-2024-frente-ao-cenario-de-custos. Acesso em: 9 ago. 2025.

[7] SEAGRI - SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA, IRRIGAÇÃO, PESCA E AQUICULTURA. **Panorama da Agricultura, pecuária, pesca e aquicultura da Bahia**: destaques 2023. Salvador, 2024.

[8] SEI - SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS ECONÔMICOS E SOCIAIS DA BAHIA. O estado em números. **InfoBahia**. 2025.

[9] CAPTAR AGROBUSINESS. **Sobre**. 2025. Disponível em: https://www.captaragro.com.br/. Acesso em: 14 jan. 2025.

[10] CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Nota Técnica**: **Nº 01/2019**: Produção de biogás a partir de dejetos da bovinocultura de leite e corte. Foz do Iguaçu, 2019.

[11] CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Nota Técnica**: **Nº 001/2018**: Produção de biogás a partir da biodigestão de dejetos suínos em fase de terminação no Oeste do Paraná. Foz do Iguaçu, 2018.

[12] ADAB - AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DA BAHIA. **Informações técnicas sobre sistemas de manejo de caprinos e ovinos no Vale do São Francisco/BA**. Juazeiro, BA, 13 nov. 2025. Informação não publicada.

[13] COELHO, Suani T.; GARCILASSO, Vanessa Pecora; SANTOS, Marilin Mariano dos; ESCOBAR, Javier Farago; PERECIN, Danilo; SOUZA, Diego Bonfim de. **Atlas de bioenergia do estado de São Paulo**. 1. ed. São Paulo: IEE-USP, 2020.

REFERENCES
REFERÊNCIAS

[14] JORGE, André Mendes. **Etologia de bubalinos**. Botucatu, p. 8, [*s. d.*]. Disponível em: https://dsti37.fmvz.unesp.br/bufalos/HPBufalos_files/Mat_Didatico/15-Etologia_Bubalinos_Texto.pdf. Acesso em: 18 jul. 2025.

[15] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas)**. 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/consumo-de-energia-eletrica. Acesso em: 7 ago. 2025.

[16] BAHIAGÁS - COMPANHIA DE GÁS DA BAHIA. **Relatório da Administração 2024**. Salvador. 2025.

A

APPENDICES
APÊNDICES

[1] IPCC - THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**: Waste Edited by Task Force on National Greenhouse Gas Inventories. Switzerland: IPCC, 2019. v. 5 Disponível em: www.ipcc-nggip.iges.or.jp.

[2] COELHO, Suani T.; GARCILASSO, Vanessa Pecora; SANTOS, Marilin Mariano dos; ESCOBAR, Javier Farago; PERECIN, Danilo; SOUZA, Diego Bonfim de. **Atlas de bioenergia do estado de São Paulo**. 1. ed. São Paulo: IEE-USP, 2020.

[3] ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 886, de 29 de setembro de 2022**. Estabelece a especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais, a ser comercializado no território nacional. 29 set. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biometano. Acesso em: 2 ago. 2025.

[4] BUENO, Fernanda de Souza; ARAÚJO, Gabriel Pires de; MOURA, Elis de Oliveira; LEAL, Pamela Lima de Souza; SILVA, Victória Hosana F. R. G. da; VIANA, Ednilson; UENO, Helene Mariko. Avaliação da produção de biogás e do potencial energético dos resíduos orgânicos provenientes do restaurante universitário da EACH-USP. 8 set. 2016. **PBL 2016 International Conference [...]**. São Paulo: [s. n.], 8 set. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/351920320.

[5] ABIOGAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano PNBB - Versão 2**. 2018.

[6] MARIN, Antonio. Renewable Hydrocarbons for Aviation and for a Decarbonized Future. *In*: **1° Congresso da Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Renováveis para Aviação**. Natal, RN, 2019.

[7] ZANG, Guiyan; GRAHAM, Edward J.; MALLAPRAGADA, Dharik. H_2 production through natural gas reforming and carbon capture: A techno-economic and life cycle analysis comparison. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 49, p. 1288–1303, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923048760. Acesso em: 2 ago. 2025.

[8] MINH, Doan Pham; SIANG, Tan Ji; VO, Dai Viet N.; PHAN, Thanh Son; RIDART, Cyrille; NZIHOU, Ange; GROUSET, Didier. Hydrogen Production From Biogas Reforming: An Overview of Steam Reforming, Dry Reforming, Dual Reforming, and Tri-Reforming of Methane. *In*: AZZARO-PANTEL, Catherine (org.). **Hydrogen Supply Chain: Design, Deployment and Operation**. [S. l.]: Academic Press, 2018. Cap. 4, p. 111–166. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012811197000004X. Acesso em: 2 ago. 2025.

[9] ACHINAS, Spyridon; ACHINAS, Vasileios; EUVERINK, Gerrit Jan Willem. A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. **Engineering**, v. 3, n. 3, p. 299–307, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.002. Acesso em: 14 jul. 2022.

[10] KITTO, John B.; STULTZ, Steven C. **Steam, its generation and use**. 41. ed. Barberton, Ohio: The Babcock & Wilcox Company, 2005.

[11] MALUF FILHO, Durval. **Perspectivas para recuperação energética de resíduos sólidos urbanos em pequenos e médios municípios por meio do processo de gaseificação**. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106133/tde-07102024-091428/pt-br.php.

[12] SABESP – COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Estimativas de emissões de metano na Sabesp**. Informações fornecidas pelo Departamento de Prospecção Tecnológica e Propriedade Intelectual – TXP. 2018.

[13] BELTRÃO, Napoleão Esberard de Macêdo.; ARAÚJO, Alderi Emídio de. **Algodão**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/84517.

[14] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica DEA 15/14**: Inventário Energético de Resíduos Rurais. Rio de Janeiro, 2014.

[15] SILVA, Alexandre Ferreira da; CONCENÇO, Germani; ADEGAS, Fernando Storniolo; SOFFIATI, Valdinei; BOGIANI, Julio Cesar; COSTA, Augusto Guerreiro Fontoura; FERREIRA, Alexandre Cunha de Barcellos; SILVA, Odilon Reny Ribeiro Ferreira. Destruição de restos culturais do algodoeiro e manejo de plantas voluntárias. *In*: COSTA, Augusto Guerreiro Fontoura; SOFFIATI, Valdinei (Ed.) **Manejo de plantas daninhas na cultura do algodoeiro**. Brasília, DF: Embrapa, 2015.

[16] MOURA, Larissa; LANDAU, Elena Charlotte; SILVA, Gilma Alves da. Evolução da produção de algodão herbáceo (Gossypium hirsutum, Malvaceae). *In*: LANDAU, E. C. et al. (org.). **Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil**. Brasília, 2020. v. 2, p. 265–294.

[17] MOREIRA, Jhonatan Willian; GODOI, Luiza Catarina Lobo de; SILVA, Carlos Eduardo Barbosa da; FERNANDES, Arthur Pedro Alves; SILVA, Macksuel Fernandes da; SETTE JÚNIOR, Carlos Roberto. Potencial energético dos resíduos da agroindústria do algodão para produção de bioenergia. *In*: **Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira**. Pelotas, 2024. Disponível em: https://www.cbctem.com.br/submissao-trabalho/resumo/trabalho-completo/vicbctem/89/potencial-energetico-dos-residuos-da-agroindustria-do-algodao-para-producao-de-bioenergia/. Acesso em: 3 ago. 2025.

[18] RIBEIRO, Gabriel R.; STEINMETZ, Ricardo L. R.; WISBECK, Elisabeth. Biogas production from solid residues generated in bioethanol production using banana biomass. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 29, n. 3, 2025.

[19] MAIA, Bianca Goulart de Oliveira. **Valorização de resíduos da bananicultura e da rizicultura na produção de briquetes**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade da Região de Joinville, Joinville, SC, 2013.

[20] KILAMA, George; LATING, Peter O.; BYARUHANGA, Joseph; BIIRA, Saphina. Quantification and characterization of cocoa pod husks for electricity generation in Uganda. **Energy, Sustainability and Society**, vol. 9, no 1, p. 1–11, 13 jun. 2019. Disponível em: https://energsustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-019-0205-4.

[21] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **PAM - Produção Agrícola Municipal (2023)**. 2024. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas. Acesso em: 22 fev. 2024.

[22] BÁRTHOLO, Gabriel Ferreira; MAGALHÃES FILHO, Antônio Augusto. R. de; GUIMARÃES, Paulo T. Gontijo; CHALFOUN, Sara Maria. Cuidados na colheita, no preparo e no armazenamento do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 14, n. 162, p. 33–44, 1989.

[23] CARVALHO, Flávio Condé. Disponibilidade de resíduos agroindustriais e do beneficiamento de produtos agrícolas. In: Simpósio Utilização de Subprodutos Agroindustriais e Resíduos de Colheita na Alimentação de Ruminantes, 1992, São Carlos. **Anais** [...]. São Carlos, 1992. p. 7–28.

[24] VALE, Ailton Teixeira do; GENTIL, Luiz Vicente; GONÇALEZ, Joaquim Carlos; COSTA, Alexandre Florian da. Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arabica*, L) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*), Duke. **Cerne**, Lavras, MG, vol. 13, no 4, p. 416–420, 2007.

[25] ARAGÃO, Wilson Menezes; RAMOS, Semíramis Rabelo Ramalho; ALVES, Maria Clea Santos. Cultivares de coqueiro. *In*: **A cultura do coqueiro**. 2 ed. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2016.

[26] BRAINER, Maria Simone de Castro Pereira. Produção de coco: o Nordeste é destaque nacional. **Caderno Setorial ETENE**, v. 3, n. 61, 2018. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/view/3026. Acesso em: 3 ago. 2025.

[27] ROCHA, Fernanda Barreto de Almeida; CAMPOS, Marianna Cruz; COLOMBO, Ciliana Regina; CELESTINO, Joyce Elanne Mateus. Gestão de resíduos como ferramenta aplicada ao beneficiamento do coco verde. *In*: **XXX Encontro Nacional De Engenharia De Produção [Anais...]**. São Carlos, SP, 2010. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_tn_sto_121_788_17278.pdf. Acesso em: 7 ago. 2025.

[28] MARAFON, Anderson Carlos; NUNES, Maria Urbana Corrêa; AMARAL, André Felipe Câmara; SANTOS, Jonas Paulino dos. **Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica**: potencialidades e desafios. 1. ed. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2019-. ISSN 1678-1953.

[29] MIOLA, Brígida; FROTA, Maria Myrian Melo; OLIVEIRA, André Gadelha de; UCHÔA, Kênio Monteles; LEANDRO FILHO, Francisco de Assis. Aproveitamento energético dos resíduos de cascas de coco verde para produção de briquetes. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol. 25, n 4, p. 627–634, ago. 2020. DOI 10.1590/S1413-4152202020180029. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/a/yH6CLqxFJsQKrHj7zXkwL3G/?format=html&lang=pt.

[30] SILVEIRA, Monica Silva. **Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquetes em Salvador - BA**. 2008. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2008.

[31] MARCELINO, Marcela Magalhães. **Biomassa residual do coco para obtenção de energia e intermediários químicos via gaseificação**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/handle/ri/24412.

[32] LINERO, Francisco Antonio Barba. Aproveitamento da palha de cana – Desafios, Benefícios e Perspectivas. *In*: **Seminário Internacional em Logística Agroindustrial**. Piracicaba, 2017.

[33] VELÁZQUEZ, Martí, B.; GONZÁLEZ, E. Fernández; CORTÉS, I. López; CALLEJÓN-FERRE, A. Prediction and evaluation of biomass obtained from citrus trees pruning. **Journal of Food Agriculture and Environment**. v. 11, p.1485-1494, 2013. Disponível em: https://riunet.upv.es/handle/10251/62958. Acesso em: 3 ago. 2025.

[34] FERRER, E.; GARCÍA, Fernando Pomares; CANET, Rodolfo; ALBIACH, Remedios; TARAZONA, Francisco. Estudio sobre la incorporación de los restos de poda de cítricos en diferentes municipios de la provincia de Valencia. **Levante Agrícola**, n. 379, p. 24–28, 2006.

[35] EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Potencial energético de resíduos florestais do manejo sustentável e de resíduos da industrialização da madeira**. Rio de Janeiro, p. 1–64, jul. 2018. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/estudo-potencial-energetico-de-residuos-florestais-do-manejo-sustentavel-e-de-residuos-da-industrializacao-da-madeira. Acessado em: 23 jul. 2025.

[36] HORA, José Airon Santana Fonseca. **Caracterização dos resíduos provenientes da produção de óleo de palma "azeite de dendê" e sua destinação final no município de Valença/BA**. 2023. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciências Ambientais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Serrinha, 2023. Disponível em: https://ifbaiano.edu.br/portal/mestrado-ciencias-ambientais-serrinha/wp-content/uploads/sites/84/2024/08/Jose-Hora.pdf.

[37] MARÇAL, Adriano de Figueiredo. **Obtenção de açúcares através de tratamento hidrotérmico dos cachos sem frutos (EFB – *Empty Fruit Bunch*) da indústria do dendê**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2015.

[38] BOSE, Max L. V; MARTINS FILHO, João G. O papel dos resíduos agroindustriais na alimentação de ruminantes. **Informe Agropecuário**, v. 10, n. 119, p. 3–7, 1984.

[39] BERNI, Mauro Donizeti; BAJAY, Sergio Valdir. Geração de energia e a digestão anaeróbica no tratamento de efluentes: estudo-de-caso na indústria de papel. *In*: **Encontro de Energia no Meio Rural**. Campinas, 2000. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022000000100003&script=sci_arttext. Acesso em: 3 ago. 2025.

[40] ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP no 906, de 18 de novembro de 2022**. Dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. 18 nov. 2022. Disponível em: https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-906-2022-dispoe-sobre-as-especificacoes-do-biometano-oriundo-de-produtos-e-residuos-organicos-agrossilvopastoris-e-comerciais-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-e-comerciais-a-ser-comercializado-em-todo-o-territorio-nacional?origin=instituicao&q=906. Acesso em: 7 ago. 2025.

SENAI CIMATEC

FIEB Federação das Indústrias do Estado da Bahia

BAHIAGÁS COMPANHIA DE GÁS DA BAHIA

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA

SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

GOVERNO DO ESTADO BAHIA

GOVERNO PRESENTE TRABALHA PRA GENTE

Apoio:

IEE USP INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

GRUPO DE PESQUISA EM BIOENERGIA Universidade de São Paulo | Instituto de Energia e Ambiente



Apoio:

IEE USP
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

GRUPO DE PESQUISA EM BIOENERGIA
Universidade de São Paulo | Instituto de Energia e Ambiente

SENAI CIMATEC

FIEB Federação das Indústrias do Estado da Bahia

BAHIAGÁS
COMPANHIA DE GÁS DA BAHIA

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA

SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

GOVERNO DO ESTADO BAHIA
GOVERNO PRESENTE
TRABALHA PRA GENTE

ISBN: 978-65-88109-60-1
9 786588 109601
CBL