

# ANÁLISES E LEVANTAMENTOS HIDRO-SEDIMENTOLÓGICOS VISANDO AO PROJETO DA PONTE ENTRE SALVADOR E A ILHA DE ITAPARICA, BA

## R14 - RELATÓRIO DE PROGNÓSTICOS HIDRO-SEDIMENTOLÓGICOS COM MODELAGENS COMPUTACIONAIS

Coordenador:

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman

[pccrosman@ufrj.br](mailto:pccrosman@ufrj.br)

Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica

Programa de Engenharia Oceânica

COPPE/UFRJ

Cliente: SIT – Superintendência de Infraestrutura de Transporte da Bahia

Março de 2016 - Rio de Janeiro

## Conteúdo

1	Identificação.....	9
2	Objetivos.....	9
3	Referências fundamentais.....	10
4	Contexto dos cenários de estudo.....	11
	4.1 Cenários para condicionantes estruturais.....	11
	4.2 Cenários para aspectos ambientais.....	12
5	Sobre a modelagem computacional neste relatório.....	13
	5.1 Metodologia e confiabilidade dos modelos.....	13
	5.2 Sobre calibração e validade dos modelos.....	13
	5.2.1 Calibração e validação de níveis de maré.....	17
	5.2.2 Calibração e validação de correntes.....	18
	5.3 Implantação de base de dado para modelagem computacional.....	21
	5.4 Aspectos metodológicos dos cenários de modelagens.....	23
	5.5 Sobre modelagem de processos sedimentológicos e evolução morfodinâmica...31	
	5.5.1 Critério de mobilidade de sedimentos.....	32
	5.5.2 Cálculo do transporte de sedimentos.....	35
	5.5.3 Fórmulas de Transporte de Sedimentos – Vazão Sólida Potencial.....	37
	5.5.4 Atualização da batimetria via modelo morfodinâmico com curva granulométrica.....	45
	5.5.5 Sobre as condições de contorno no modelo de transporte de sedimentos.....	51
	5.6 Sobre modelagem dos efeitos de pilares de Ponte.....	52
	5.6.1 Técnicas de Modelagem.....	53
	5.6.2 Metodologia.....	54
	5.6.3 Comparação das técnicas de modelagem.....	56
	5.6.4 Calibração do coeficiente de arrasto.....	58
	5.6.5 Conclusões.....	61
	5.7 Dados usados nas modelagens da etapa preliminar.....	62
	5.7.1 Domínios considerados e dados de batimetria e linha de orla.....	62
	5.7.2 Dados de distribuição sedimentológica na BTS.....	65
	5.7.3 Vazões de rios.....	68

5.7.4	Dados de maré .....	68
5.7.5	Dados de vento.....	71
5.7.6	Dados de clima de ondas ao largo .....	73
5.8	Condições iniciais e condições de contorno dos modelos .....	80
6	Análise de resultados obtidos.....	85
6.1	Caracterização da circulação hidrodinâmica com a ponte .....	86
6.2	Análises da circulação hidrodinâmica com e sem a ponte.....	104
6.3	Análises comparativas de processos sedimentológicos.....	117
6.4	Sobre alturas de ondas que poderão atingir as estruturas da ponte .....	124
7	Reconhecimentos .....	138

## Lista de Figuras

<i>Figura 1. Mapa da Baía de Todos os Santos e zona costeira adjacente, com ponte projetada delineada em vermelho. Posicionamento fornecido pelo cliente em outubro de 2014 no arquivo “P-GMT-001-DE-01200-EN-RB6-MM-REV24-Samir.dwg”.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2. Localização de estações de correntometria (A1 e A2 no exterior e no canal de acesso à BTS – LT/COPPE/UFRJ e A3 entre as ilhas de Itaparica e Frade – IGEO/UFBA), estações maregráficas (N1 na Capitania dos Portos de Salvador e N5 em São Roque do Paraguaçu) e estações meteorológicas (M1, M2 e M3 na Praia de Amaralina, na Ilha de Itaparica e na Ilha do Frade respectivamente). .....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 3. Calibração – Novembro 2014: Comparação de níveis de maré medidos e modelados na estação N1. Analisando o gráfico, percebe-se que os resultados da modelagem são praticamente indistinguíveis dos valores medidos. A estação N1 fica na Capitania dos Portos de Salvador como indica a Figura 2. ....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 4. Validação – Março 2015: Comparação de níveis de maré medidos e modelados na estação N1. Analisando o gráfico, percebe-se que os resultados da modelagem mantêm-se praticamente indistinguíveis dos valores medidos. A estação N1 fica na Capitania dos Portos de Salvador como indica a Figura 2. ....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5. Calibração – Novembro 2014: Comparação de séries temporais de vetores de correntes médias na vertical (2DH) na estação A2. As setas pretas representam valores medidos e as setas vermelhas retratam valores modelados. Esta é a estação mais relevante por estar próxima ao centro do eixo da ponte projetada. Nota-se a boa coerência entre valores medidos e modelados em todos os dias.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 6. Validação – Março 2015: Comparação de séries temporais de vetores de correntes médias na vertical (2DH) na estação A2. As setas pretas representam valores medidos e as vermelhas retratam valores modelados. Esta é a estação mais relevante por estar próxima ao centro do eixo da ponte projetada, nota-se a ótima coerência entre valores medidos e modelados a partir de 10/03, pois as medições de 1 a 9/03 foram inválidas.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7. Diagrama de vinculação hierárquica de base de dados, projetos e modelos no SisBaHiA® .....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 8. Imagem da tela de abertura do SisBaHiA® com o projeto de modelagem descrito neste R14.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 9. Imagem da tela de Malhas e Domínios do SisBaHiA® estampando dados gerais da malha de discretização adotada nas modelagens discutidas neste relatório R14. No canto inferior lista de outras malhas. A Figura 10 apresenta mapa da malha acima descrita.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 10. Mapa mostrando a malha de discretização da BTS em elementos finitos subparamétricos biquadráticos. Acima malha geral e abaixo zoom no entrono do eixo da Ponte. Dados gerais da malha na Figura 9. ....</i>	<i>25</i>

Figura 11. Imagem de tela de Modelos Hidrodinâmicos do SisBaHiA <sup>®</sup> mostrando no canto inferior direito a lista de modelos desenvolvidos. Note na parte inferior direita da tela a marcação para computar evolução morfológica do fundo e a indicação do modelo de transporte de sedimentos acoplado, cf. Figura 12. ....	27
Figura 12. Imagem da tela de Modelos de Transporte de Sedimentos do SisBaHiA <sup>®</sup> mostrando no canto inferior direito lista dos modelos desenvolvidos. Note que o modelo ilustrado é o vinculado ao modelo hidrodinâmico da situação atual. ....	28
Figura 13. Na imagem do Google Earth, o marcador amarelo indica a posição do ponto de medição de ondas obtidos por um ADCP. ....	30
Figura 14. Imagem da tela de Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA <sup>®</sup> mostrando no canto inferior direito lista parcial dos modelos desenvolvidos.....	31
Figura 15. Diagrama de Shields tradicional, no qual a obtenção de $\tau_o$ implica em processo iterativo, porque a velocidade de atrito $u_*$ aparece nos dois eixos [ $u_* = \sqrt{(\tau_o/\rho)}$ ]. ....	33
Figura 16. Diagrama de Shields modificado, no qual a tensão crítica $\tau_c = \sqrt{(u_*/\rho_o)}$ , pode ser obtida diretamente das características do sedimento e da água.....	33
Figura 17. Tensão crítica para mobilidade, $\tau_c$ , calculada pelo diagrama de Shields modificado. No caso considerou-se água salgada com $\rho_o = 1025 \text{ kg/m}^3$ , $\nu = 1.19\text{E}-6 \text{ m}^2/\text{s}$ e sedimentos com massa específica $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ . Em unidades $\phi = -\ln(d [\text{mm}])/\ln(2)$ . ....	34
Figura 18. Malha de cálculo utilizada na técnica de discretização detalhada do pilar. ....	54
Figura 19. Malha de cálculo utilizada na técnica da ilha nodal.....	55
Figura 20. Malha de cálculo utilizada na técnica do termo adicional de tensão. ....	55
Figura 21. Malha Seção 60 m. ....	55
Figura 22. Malha Seção 100 m. ....	55
Figura 23. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem detalhada de um pilar da ponte. ....	56
Figura 24. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem utilizando o método da Ilha-nodal.....	57
Figura 25. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto $C_D = 1.2$ . ....	57
Figura 26. Perfil de velocidades longitudinal a jusante do pilar para cada modelagem. ....	58
Figura 27. Perfil de velocidades longitudinal para os cenários de malha detalhada e termo de tensão adicional com $C_D = 1.2$ e $C_D = 3$ .....	59
Figura 28. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem detalhada de um apoio de 4 pilares (Seção 60 m). ....	59
Figura 29. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto $C_D = 1.2$ de um apoio de 4 pilares (Seção 60 m).....	59
Figura 30. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto $C_D = 3$ de um apoio de 4 pilares (Seção 60 m).....	59
Figura 31. Perfil de velocidades longitudinal para os cenários de malha detalhada e termo de tensão adicional com $C_D = 1.2$ e $C_D = 3$ ; apoio de 4 pilares (Seção 60 m).....	60
Figura 32. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem detalhada de um apoio de 8 pilares (Seção 100 m). ....	60
Figura 33. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto $C_D = 1.2$ de um apoio de 4 pilares (Seção 100 m).....	60
Figura 34. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto $C_D = 3$ de um apoio de 4 pilares (Seção 100 m).....	60
Figura 35. Perfil de velocidades longitudinal para os cenários de malha detalhada e termo de tensão adicional com $C_D = 1.2$ e $C_D = 3$ ; apoio de 8 pilares (Seção 100 m).....	61

<i>Figura 36. Resultado da modelagem digital do terreno, mostrando linha de orla e isolinhas de batimetria como vista pelo modelo implementado. A Figura 10 apresenta a malha de elemento finitos que discretiza o domínio considerado e contém os pontos de batimetria que geraram o mapa acima. ....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 37. Parte do domínio de modelagem de propagação de ondas, que se estende para águas mais profundas ao sul até a coordenada 8.503.915 m (cerca de 26km para o sul do eixo vertical), como indicado na Figura 38. Indica-se o banco de Santo Antônio na entrada Leste da BTS.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 38. Imagem da tela de edição de Modelo de Propagação de Ondas, delineando os limites das grades de dados de batimetria, propagação de onda e de registro de resultados. Confrontando com o mapa da Figura 37, verifica-se que a grade de propagação de ondas parte de local com profundidades maiores que 400m, configurando águas profundas para todas as ondas consideradas.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 39. Proposta de distribuição de fácies texturais na BTS apresentada por Lessa e Dias (2009) , incluindo as amostras analisadas neste projeto. Escala com 12 classes de tamanhos e todos os pontos de coletas (pretéritos e atuais) utilizados na interpolação. ....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 40. Isolinhas de distribuição inicial de sedimentos no fundo da BTS considerados nas modelagem hidro-sedimentológicas. Cada mapa mostra isolinhas de percentuais da classe de sedimentos indicada. A soma dos percentuais de todos os mapas é 100%. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 41. Mapa com indicação de vazões fluviais médias incluídas na modelagem hidrodinâmica. ....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 42. Elevações de maré geradas pelo modelo no Porto de Salvador para o período entre novembro/2014 de outubro/2015. ....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 43. Permanência de nível de água no Porto de Salvador (estação N1). ....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 44. Ventos de julho de 2015 medidos na estação da Ilha de Itaparica (M2). ....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 45. Estatística dos ventos na estação da Ilha de Itaparica (M2). ....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 46. Histograma de direções de incidência de ondas reconstituídas através do SMC-Brasil. O eixo horizontal indica os azimutes das direções (N = 0°, E = 90°, S = 180° e W = 270°). ....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 47. Histograma de direções de incidência de ondas reconstituídas através do modelo WW3. ....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 48. Histograma de alturas significativas de ondas reconstituídas através do SMC-Brasil. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 49. Histograma de alturas significativas de ondas no ponto indicado na Figura 13 - sul da entrada da BTS, reconstituídas através do modelo WW3. ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 50. Histograma de períodos de pico espectral de ondas reconstituídas através do SMC-Brasil. ....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 51. Histograma de períodos de pico espectral de ondas no ponto indicado na Figura 13 - sul da entrada da BTS, reconstituídas através do modelo WW3. ....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 52: A) Histograma de distribuição conjunta de Hs e Tp; B) Histograma de distribuição conjunta de Hs e Dp; e C) Histograma de distribuição conjunta de Tp e Dp para o ponto de medição do ADCP A1 durante todo o período simulado (1980 a 2010), reconstituído através do modelo WW3. ....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 53. Exemplo de um domínio de modelagem (<math>\Omega</math>) para a Baía de Guanabara. Nos contornos de terra, <math>\Gamma_2</math>, representando margens e seções de rios impõe-se condições de vazões ou velocidades. Os contornos abertos, <math>\Gamma_1</math>, não representam limites físicos, mas limites de água no domínio de modelagem, ao longo dos quais se impõe condições de níveis de água. ....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 54. Condições iniciais de elevação de nível de água, NA, nas modelagens hidro-sedimentológicas. ....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 55. Condições iniciais de velocidades promediadas na vertical nas modelagens hidro-sedimentológicas. ....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 56. Níveis de maré no Porto de Salvador de 01 a 16 de Setembro de 2014. As marcas azuis no ciclo de quadratura do dia 02/09, e no ciclo de sizígia do dia 09/09, indicam instantes de baixamar, meia maré enchente, preamar e meia maré vazante. Os mapas de correntes a seguir representam tais instantes. ....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 57. Correntes promediadas na coluna de água em baixamar de quadratura no dia 02/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte. O gráfico seguinte mostra perfis verticais de velocidades nas estações indicadas no zoom. ....</i>	<i>88</i>

<i>Figura 58. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de correntes em baixamar de quadratura. U = componente L-O e V = componente N-S. ....</i>	89
<i>Figura 59. Correntes promediadas na coluna de água em meia maré enchente de quadratura no dia 02/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte. O gráfico seguinte mostra perfis verticais de velocidades nas estações indicadas no zoom. ....</i>	90
<i>Figura 60. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de correntes em meia maré enchente de quadratura. U = componente L-O e V = componente N-S. ....</i>	91
<i>Figura 61. Correntes promediadas na coluna de água em preamar de quadratura no dia 02/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte. O gráfico seguinte mostra perfis verticais de velocidades nas estações indicadas no zoom. ....</i>	92
<i>Figura 62. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de corrente em preamar de quadratura. U = componente L-O e V = componente N-S. ....</i>	93
<i>Figura 63. Correntes promediadas na coluna de água em meia maré vazante de quadratura no dia 02/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte. O gráfico seguinte mostra perfis verticais de velocidades nas estações indicadas no zoom. ....</i>	94
<i>Figura 64. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de corrente em meia maré vazante de quadratura. U = componente L-O e V = componente N-S. ....</i>	95
<i>Figura 65. Correntes promediadas na coluna de água em baixamar de sizígia no dia 09/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte. ....</i>	96
<i>Figura 66. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de corrente em baixamar de sizígia. U = componente L-O e V = componente N-S. ....</i>	97
<i>Figura 67. Correntes promediadas na coluna de água em meia maré enchente de sizígia no dia 09/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte. ....</i>	98
<i>Figura 68. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de corrente em meia maré enchente de sizígia. U = componente L-O e V = componente N-S. ....</i>	99
<i>Figura 69. Correntes promediadas na coluna de água em preamar de sizígia no dia 09/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte. ....</i>	100
<i>Figura 70. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de corrente em preamar de sizígia. U = componente L-O e V = componente N-S. ....</i>	101
<i>Figura 71. Correntes promediadas na coluna de água em meia maré vazante de sizígia no dia 09/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte. ....</i>	102
<i>Figura 72. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de corrente em meia maré vazante de sizígia. U = componente L-O e V = componente N-S. ....</i>	103
<i>Figura 73. Comparativo de magnitude de correntes em meia maré enchente de sizígia na BTS, antes e depois da ponte. Zoom no entrono do eixo da ponte na Figura 74. ....</i>	106
<i>Figura 74. Zoom comparativo de campo de correntes em meia maré enchente de sizígia antes e depois da ponte. Vista comparativa geral da BTS na Figura 73. ....</i>	107
<i>Figura 75. Comparativo de magnitude de correntes em preamar de sizígia na BTS, antes e depois da ponte. Zoom no entrono do eixo da ponte na Figura 76. ....</i>	108
<i>Figura 76. Zoom comparativo de campo de correntes em preamar de sizígia antes e depois da ponte. Vista comparativa geral da BTS na Figura 75. Neste instante de baixas velocidades nota-se claramente</i>	

<i>alterações nos padrões de circulação, que no entanto não se estendem muito além das cercanias da ponte.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 77. Comparativo de magnitude de correntes em meia maré vazante de sizígia na BTS, antes e depois da ponte. Zoom no entrono do eixo da ponte na Figura 78. ....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 78. Zoom comparativo de campo de correntes em meia maré vazante de sizígia antes e depois da ponte. Vista comparativa geral da BTS na Figura 77. ....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 79. Comparativo de magnitude de correntes em baixa-mar de sizígia na BTS, antes e depois da ponte. Zoom no entrono do eixo da ponte na Figura 80.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 80. Zoom comparativo de campo de correntes em baixa-mar de sizígia antes e depois da ponte. Vista comparativa geral da BTS na Figura 79. ....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 81. Elipses de correntes de maré na estação N1 antes e depois da ponte. Na estação N1, nota-se leve diminuição na magnitude e leve aumento no espalhamento direcional das correntes após a construção da ponte.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 82. Elipses de correntes de maré na estação N2 antes e depois da ponte. Na estação N2, após a construção da ponte, nota-se leve diminuição na magnitude das correntes de enchente e vazante. ....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 83. Elipses de correntes de maré na estação N3 antes e depois da ponte. Na estação N3, após a construção da ponte, nota-se leve aumento na magnitude das correntes, que também passam a ficar mais alinhadas com uma direção principal um pouco rotacionada no sentido anti-horário. ....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 84. Elipses de correntes de maré na estação S1 antes e depois da ponte. Na estação S1, após a construção da ponte, nota-se leve diminuição na magnitude das correntes de vazante, além disso, o espalhamento direcional das correntes diminui na enchente e aumenta na vazante. ....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 85. Elipses de correntes de maré na estação S2 antes e depois da ponte. Na estação S2, após a construção da ponte, nota-se leve diminuição na magnitude das correntes de vazante, além disso, o espalhamento direcional das correntes diminui na enchente e aumenta na vazante. ....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 86. Elipses de correntes de maré na estação S3 antes e depois da ponte. Na estação S3, após a construção da ponte, nota-se leve aumento na magnitude das correntes de enchente e diminuição nas de vazante, além disso, o espalhamento direcional das correntes aumenta ligeiramente na enchente e na vazante. ....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 87. Isolinhas de persistência, ou percentual de tempo ao longo de um ano, em que as correntes na BTS exercem tensões no fundo suficientes para mobilizar sedimentos finos inconsolidados (<math>\tau &gt; 0.15</math> N/m<sup>2</sup>). Acima está o mapa da situação atual e abaixo após a construção da ponte.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 88. Isolinhas de persistência, ou percentual de tempo ao longo de um ano, em que as correntes na BTS exercem tensões no fundo suficientes para mobilizar areias médias (<math>\tau &gt; 0.21</math> N/m<sup>2</sup>). Acima mapa da situação atual e abaixo após a construção da ponte. ....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 89. Isolinhas de persistência, ou percentual de tempo ao longo de um ano, em que as correntes na BTS exercem tensões no fundo suficientes para mobilizar areias grossas (<math>\tau &gt; 0.36</math> N/m<sup>2</sup>). Acima mapa da situação atual e abaixo após a construção da ponte. ....</i>	<i>121</i>
<i>Figura 90. Mapas comparativos de isolinhas de mudança de batimetria após 1 anos de simulação hidro-sedimentológica nas situações atual e projetada. Ficam evidentes pequenas diferenças no entorno do eixo da ponte. ....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 91. Mapa com isolinhas de diferenças de mudanças de batimetria após um ano de evolução morfológica na situação atual e um ano na situação projetada. Este mapa corresponde à diferença dos resultados do mapa superior da Figura 90 pelos resultados do mapa inferior. ....</i>	<i>123</i>
<i>Figura 92. Propagação de ondas de 7 segundos vindas do largo com azimutes entre 135° e 180°. Pior caso para ondas vindas de azimute 165° com <math>H/H_o</math> de até 0.71 <math>\rightarrow H_{Smax} \approx 1.6m</math>.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 93. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de 135°. As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período <math>T = 8</math> e 9 segundos, com <math>H/H_{omax} = 0.26 \rightarrow H_{Smax} \approx 0.6m</math>. ....</i>	<i>127</i>

- Figura 94. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $140^\circ$ . As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 10$  segundos, com  $H/H_{omax} = 0.33$   
 $\rightarrow H_{Smax} \approx 0.7m$ . ..... 128
- Figura 95. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $145^\circ$ . As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 12$  segundos, com  $H/H_{omax} = 0.33$   
 $\rightarrow H_{Smax} \approx 1.0m$ . ..... 129
- Figura 96. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $150^\circ$ . As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 8$  segundos, com  $H/H_{omax} = 0.46$   $\rightarrow$   
 $H_{Smax} \approx 1.0m$ . ..... 130
- Figura 97. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $155^\circ$ . As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 8$  segundos, com  $H/H_{omax} = 0.41$   $\rightarrow$   
 $H_{Smax} \approx 0.9m$ . ..... 131
- Figura 98. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $160^\circ$ . Neste caso, as ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 8$  e  $9$  segundos, com  $H_{Smax} < 0.6m$ . ..... 132
- Figura 99. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $165^\circ$ . As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 8$  segundos, com  $H/H_{omax} = 0.60$   $\rightarrow$   
 $H_{Smax} \approx 1.3m$ . ..... 133
- Figura 100. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $170^\circ$ . As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 9$  segundos, com  $H/H_{omax} = 0.35$   
 $\rightarrow H_{Smax} \approx 0.8m$ . ..... 134
- Figura 101. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $175^\circ$ . As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 10$  segundos, com  $H/H_{omax} = 0.28$   $\rightarrow H_{Smax} \approx 0.6m$ . ..... 135
- Figura 102. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $180^\circ$ . As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 13$  segundos, com  $H/H_{omax} = 0.20$   $\rightarrow H_{Smax} \approx 0.7m$ . ..... 136
- Figura 103: Propagação de onda para a onda com maior altura significativa em águas profundas, considerando a série de 30 anos reconstituída com o modelo WW3. A altura da onda na ponte é em torno de  $1.7 m$ . ..... 137

## 1 Identificação

Projeto COPPETEC: **PENO-18126**

Título: **ANÁLISES E LEVANTAMENTOS HIDRO-SEDIMENTOLÓGICOS VISANDO AO PROJETO DA PONTE ENTRE SALVADOR E A ILHA DE ITAPARICA, BA**

### **R14 - RELATÓRIO DE PROGNÓSTICOS HIDRO-SEDIMENTOLÓGICOS COM MODELAGENS COMPUTACIONAIS**

Interessado: **SIT - SUPERINTENDÊNCIA DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE DA BAHIA**  
a/c Sr. Márcio de Almeida Machado  
Diretor de Projetos e Programas Especiais - DPPE  
4ª Avenida, nº445 CAB - Centro Administrativo da Bahia  
41.745-002 Salvador - BA  
Contato:  
Sr. Márcio de Almeida Machado: [márcio.machado@infra.ba.gov.br](mailto:márcio.machado@infra.ba.gov.br)  
Tel. (71) 3115-2394

Programa COPPE: **Engenharia Oceânica**  
**Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica**

Data: **30 de Março de 2016**

## 2 Objetivos

Conforme descrito na proposta COPPETEC PENO18126, este **R14 - Relatório de Prognósticos Hidro-Sedimentológicos com Modelagens Computacionais** apresenta análises de modelagens em cenários de diagnóstico e prognóstico realizadas com dados de campanhas de campo realizadas entre novembro de 2014 e outubro de 2015, complementados por dados pretéritos coletados durante outros projetos na Baía de Todos os Santos (BTS), BA. Os dados coletados no âmbito deste R14 estão apresentados nos relatórios *R4 – Caracterização Sedimentológica I*, *R6 – Relatório de Medições Maregráficas Equinócio Março de 2015*, *R8 – Relatório de Caracterização Sedimentológica II*, *R10 – Relatório de Medições Maregráficas Inverno de 2015*, *R12 – Relatório de Extremos de Ondas* e *R13 – Relatório de Medições de Ventos, Correntes e Ondas*. Os dados já existentes utilizados estão descritos no *R3 - Relatório de Inventário de Dados*, entregue em outubro de 2014.

De modo a contextualizar este **R14**, vale mencionar que os estudos contratados, conforme a Proposta COPPETEC PENO18126 aprovada pelo SIT (então DERBA) e pela SEINFRA, têm por objetivos gerais:

1. Obter dados e analisar de forma abrangente ações de agentes hidrodinâmicos e processos hidro-sedimentológicos relevantes para o projeto da ponte de ligação entre a cidade de Salvador e a Ilha de Itaparica na BTS, na localidade indicada no mapa da Figura 1.
2. Fornecer subsídios para estudos de impacto ambiental da ponte nos processos hidro-sedimentológicos da região de influência da ponte.

Para melhor contextualizar as análises, apresenta-se a seguir bibliografias básicas de fundamentação e os cenários de modelagem considerados neste R14.

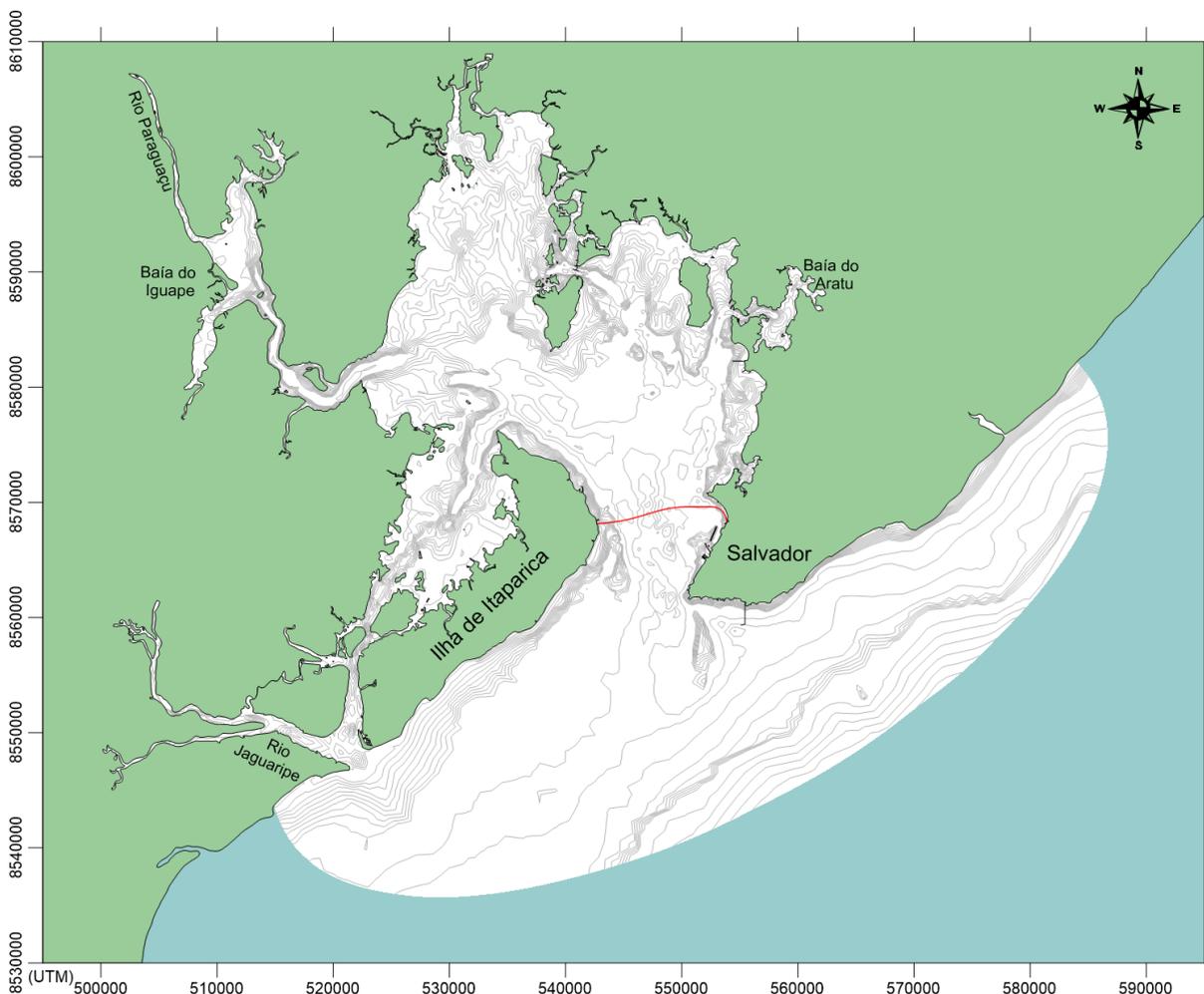


Figura 1. Mapa da Baía de Todos os Santos e zona costeira adjacente, com ponte projetada delineada em vermelho. Posicionamento fornecido pelo cliente em outubro de 2014 no arquivo “P-GMT-001-DE-01200-EN-RB6-MM-REV24-Samir.dwg”.

### 3 Referências fundamentais

No contexto das metodologias e análises apresentadas neste relatório há duas referências bibliográficas fundamentais. Tais documentos não são entregues de modo impresso em 5 cópias, pois representariam milhares de páginas, sendo a consulta em modo digital mais ágil. Os arquivos pdf de tais referências podem ser baixados ou consultados nos endereços indicados a seguir:

- Para detalhes teóricos a respeito de metodologias de aquisição e análise de dados ambientais, além de usos em modelagem computacional adota-se como base a referência: “*METODOLOGIA PARA AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS AMBIENTAIS EM SUPORTE À MODELAGEM COMPUTACIONAL COSTEIRA E ESTUARINA*”, tese de doutorado de José Otavio Goulart Pécly, aprovada em 04/2008 no Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ. Para baixar pdf com 278 páginas acesse:

<http://www.oceanica.ufrj.br/intranet/modules/PDdownloads/visit.php?cid=10&lid=158>

- Para detalhes teóricos a respeito de metodologias dos modelos computacionais empregados para desenvolvimentos das análises, adota-se a “**REFERÊNCIA TÉCNICA DO SISBAHIA<sup>®</sup>**”, com cerca de 350 páginas. SisBaHiA<sup>®</sup> é o acrônimo de Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Por se tratar de documento dinâmico, com frequentes atualizações, ao invés de usar um link direto, recomenda-se acessar o item “**Referência Técnica**” da página eletrônica: <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>.

## 4 Contexto dos cenários de estudo

No contexto dos estudos propostos os cenários se dividem em dois grupos:

1. **Condicionantes estruturais** da ponte.
2. **Aspectos ambientais com foco na hidro-sedimentologia** para avaliação de interferências da ponte na circulação hidrodinâmica e processos sedimentológicos na BTS.

Discute-se a seguir o contexto dos vários cenários em consideração, e destaca-se quais cenários e aspectos foram abordados neste relatório **R14**.

### 4.1 Cenários para condicionantes estruturais

No que tange a condicionantes estruturais, o interesse está em se ter valores de condições usuais e de condições extremas para diferentes tempos de recorrência,  $T_R$ , ou probabilidades extremas. Neste contexto, são relevantes para elementos estruturais da ponte avaliar os seguintes itens, com foco na região da ponte:

- i. **Caracterização detalhada do fundo da BTS no entorno do eixo da ponte:** em uma faixa com cerca de 2 km, tendo como centro o eixo da ponte, foram efetuados serviços de levantamentos batimétrico, sísmico e sonográfico. Este assunto é tratado no *R5 - Relatório de Fim de Campanha de Batimetria e Sísmica*, entregue em fevereiro de 2015, e *R7 - Relatório de Batimetria e Sísmica com Dados Associados*, entregue em março de 2015.
- ii. **Ventos na BTS**, com foco na região da ponte: foram definidos por intensidade e direção os vento reinante e dominante, e estimados os ventos máximos esperados. O vento reinante é o mais frequente e o dominante é o que possui maior valor do produto frequência  $\times$  quadrado da velocidade. Por norma, os ventos são caracterizados em uma altura padrão de 10 m acima do nível da água. Com base nos valores a 10 m, os perfis de velocidade de vento foram calculados, de modo a fornecer valores relevantes nas cotas das estruturas da ponte. Dados de ventos foram analisados em maior detalhes no *R12 - Relatório de Extremos de Ondas* e no *R13 - Relatório de Medições de Ventos, Correntes e Ondas*.
- iii. **Níveis de água na BTS** devido a marés astronômicas e meteorológicas. Foram definidas a curva de permanência de níveis, e caracterizados os níveis máximos e mínimos esperados.
- iv. **Correntes e circulação das águas na BTS** geradas pela ação de marés e ventos. Ao longo do eixo da ponte, foram definidos os padrões de correntes máximas nas condições de marés enchentes e de marés vazantes. Dados sobre o tema foram analisados em maior detalhe no *R13 - Relatório de Medições de Ventos, Correntes e Ondas*.
- v. **Ondas ao largo e propagadas para o interior da BTS.** Por método de reanálise, foram reconstituídos dados de ondas incidentes na entrada da BTS por um período de 30 anos.

Tais dados caracterizam os seguintes parâmetros característicos do clima de ondas: alturas significativas, períodos de pico espectral, direções de incidência em águas profundas, espalhamento espectral. Outros parâmetros também podem ser obtidos, como alturas médias quadráticas e alturas máximas. Através de modelagem computacional, ondas características de diferentes condições de mar foram propagadas para o interior da BTS, fornecendo alturas e direções de propagação ao longo do eixo da ponte. Dados de ondas foram analisados em maior detalhes no *R12 – Relatório de Extremos de Ondas*, e na seção 6.4 deste R14..

## 4.2 Cenários para aspectos ambientais

Os cenários de aspectos ambientais focam nos estudos **hidro-sedimentológicos** para avaliação de prováveis interferências da ponte na circulação hidrodinâmica e nos processos sedimentológicos na BTS. Neste caso, as análises são comparativas entre o que ocorre atualmente, sem a ponte, e o que ocorrerá na situação projetada com a ponte. O período de análise comparativa é de um ano, tendo como forçantes séries temporais realistas de marés, ventos e vazões fluviais. Efeitos de ondas geradas por ventos na BTS são incluídos nos processos hidro-sedimentológicos.

As análises dos cenários de aspectos ambientais são desenvolvidas com auxílio de modelagem computacional, como descrito a seguir.

## 5 Sobre a modelagem computacional neste relatório

Os modelos utilizados no desenvolvimento dos trabalhos apresentados neste **R14** fazem parte do **SisBaHiA<sup>®</sup>** - **Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental**. O **SisBaHiA<sup>®</sup>** vem sendo ampliado e aperfeiçoado na COPPE/UFRJ desde 1987, através de várias dissertações de mestrado e teses de doutorado, além muitos projetos de pesquisa. O sistema já foi adotado em centenas estudos e projetos envolvendo modelagem de corpos de água naturais, incluindo vários na BTS.

### 5.1 Metodologia e confiabilidade dos modelos

Amplios detalhes técnicos sobre a metodologia adotada nos modelos do **SisBaHiA<sup>®</sup>** podem ser vistos através da Internet no site [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br). Uma vez na página, clicando no item “O que é?”, encontra-se uma descrição geral do sistema, que inclui o subtítulo “Atributos do **SisBaHiA<sup>®</sup>**”, onde se discute a confiabilidade geral dos modelos.

A confiabilidade dos modelos também pode ser inferida pela ampla lista de projetos realizados com o sistema, no item “Aplicações-Projetos” no site [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br). Na lista, **há vários itens envolvendo projetos com estudos e análises de várias naturezas na BTS**, além de serviços variados prestados para clientes como EletroNuclear, Furnas Centrais Elétricas, Petrobrás, ThyssenKrupp AG – Companhia Siderúrgica do Atlântico, empreendimento de usinas hidroelétricas de grande porte como UHE Estreito no rio Tocantins para o CESTE - Consórcio Estreito Energia, e o AHE – Jirau Ilha do Padre no Rio Madeira para a ESBR - Energia Sustentável do Brasil. Há também diversos trabalhos envolvendo aspectos portuários e dragagens em diversas baías e terminais no Brasil, várias trabalhos para empresas estaduais de saneamento e órgãos ambientais, etc. Vale mencionar que várias empresas privadas, departamentos de universidades e órgãos públicos têm desenvolvido projetos e trabalhos com o **SisBaHiA<sup>®</sup>**.

Clicando no item “Referência Técnica” em [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br), baixa-se a documentação técnica, com todos os detalhes metodológicos e da formulação matemática e numérica dos modelos do sistema, bem como sobre a imposição de condições de contorno. Por se ter todos os detalhes técnicos dos modelos facilmente disponíveis pela internet, e de modo a evitar um relatório excessivamente longo, não se inclui neste **R14** uma descrição da formulação matemática dos modelos adotados.

### 5.2 Sobre calibração e validade dos modelos

A metodologia de calibração e validação dos modelos utilizados no âmbito deste **R14** é apresentada de forma detalhada no *R9 – Relatório sobre Calibração de Modelos* e *R11 – Relatório de Validação de Modelos*.

A seguir, são descritos de forma resumida os principais objetivos dos processos de calibração e validação. Outra referência, além dos *R9* e *R11*, que abrange o tema de forma mais geral é o “Capítulo 8 - Sobre calibração e validação de modelos” na Referência Técnica do **SisBaHiA<sup>®</sup>**; no site [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br). Recomenda-se também o tópico sobre o assunto na publicação *Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental* – Capítulo 1 (pp. 1-161) do livro **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5**, publicado em Novembro de 2001 pela Associação Brasileira de Recursos Hídricos <[www.abrh.org.br](http://www.abrh.org.br)>.

Tipicamente na utilização do **SisBaHiA<sup>®</sup>** obtêm-se:

- Coerências entre valores de mapas e levantamentos de campo e valores representados nos modelos para geometria de linha de costa e batimetria dependem apenas no nível de detalhamento requerido, podendo facilmente passar de 95%.
- Coerências entre valores medidos e valores computados de níveis de água são em geral melhores que 90% mesmo sem calibração. Após calibração é usual que sejam superiores a 95%.
- Coerências entre valores medidos e valores computados de velocidade e direção de correntes são usualmente melhores que 70% mesmo sem calibração. Após calibração é comum se atingir coerências superiores a 90%.
- Coerências entre valores medidos e valores computados de concentração de contaminantes ou parâmetros de qualidade de água são semelhantes às verificadas para velocidade e direção de correntes. Como os modelos de transporte de contaminantes recebem como dados de entradas os resultados de níveis e correntes dos modelos hidrodinâmicos, a confiabilidade dos modelos de transporte é intrinsecamente função da qualidade dos resultados hidrodinâmicos.
- Coerências entre valores medidos e valores computados de processos sedimentológicos, i.e., taxas de erosão transporte e deposição, com evolução morfodinâmica de batimetria, dependem do tipo de formulação de transporte de sedimentos adotada, e da correta informação sobre a distribuição granulométrica e de estoques erodíveis de sedimentos no corpo de água de interesse.
- Coerências entre valores medidos e valores computados de ondas propagadas do largo para regiões costeiras são iguais às obtidas por modelos similares. O algoritmo de modelagem de propagação de ondas no SisBaHiA<sup>®</sup> é o mesmo do amplamente utilizado modelo REFDIF. Veja por exemplo: *Coastal Engineering Manual, Part II - Chapter 3 – Estimation of Near Shore Waves*, seção II-3-5 *Advanced Propagation Methods*, que pode ser baixado de <http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>.

Para atingir tais coerências é necessário atender às seguintes condições:

- Garantir que a geometria do corpo de água implementada no sistema de modelos esteja correta e seja condizente com a existente na época de medição de níveis e correntes. Discrepâncias em dados de batimetria e contornos são frequentes causas de diferenças entre valores medidos e valores computados. Valores locais de correntes e ondas são muito influenciados pela batimetria.
- Garantir que os forçantes dos escoamentos, e.g. curvas de maré, ventos e vazões fluviais, estejam corretamente implementados no sistema de modelos, e sejam condizentes com os existentes na época de medição de níveis e correntes. Erros na especificação dos forçantes dos escoamentos são frequentes causas de diferenças entre valores medidos e valores computados.
- Garantir que as intensidades das fontes contaminantes e os parâmetros das reações cinéticas tenham sido corretamente fornecidos ao sistema de modelos, e sejam condizentes com os existentes na época de medição de concentrações. Erros na especificação de intensidades de fontes e parâmetros de reações cinéticas são frequentes causas de diferenças entre valores medidos e valores computados.

- No caso de modelos de processos sedimentológicos, garantir que a caracterização do fundo, com granulometria, massa específica e espessuras de erosão sejam realistas. Erros na especificação de variáveis sedimentológicas são frequentes causas de diferenças entre valores medidos e valores computados.

Em resumo, a calibração de modelos de hidrodinâmica ambiental é um processo que deve obedecer à seguinte ordem:

- Nível 1. **Calibração geométrica:** aferir se a modelagem digital do terreno do domínio de modelagem, feita através da malha de discretização, representa adequadamente os contornos e a batimetria da região de interesse. Para isso, deve haver dados batimétricos e levantamentos topo-hidrográficos condizentes com as necessidades.
- Nível 2. **Calibração hidrodinâmica e sedimentológica:** aferir se os modelos hidrodinâmicos representam adequadamente a variação de níveis de água e correntes na região de interesse, sob diferentes condições, e.g., marés de sizígia e de quadratura, ventos e vazões. Para isso é necessário que, além da boa modelagem digital do terreno, haja informações corretas sobre os forçantes da circulação hidrodinâmica, tais como ventos, marés e vazões afluentes. No caso de modelos com evolução morfodinâmica de batimetria, estende-se os requerimentos à correta caracterização dos sedimentos da área de estudos, bem como estoques erodíveis, e à criteriosa seleção de formulação de transporte de sedimentos a ser adotada.
- Nível 3. **Calibração de qualidade de água:** aferir se os modelos de transporte de escalares, usando as correntes e níveis dos modelos hidrodinâmicos, são capazes de representar adequadamente as concentrações de parâmetros de qualidade de água ao longo do tempo. Para isso, é necessário que, além das correntes e níveis, haja informações corretas sobre fontes poluentes e sobre taxas de reação de parâmetros não conservativos, e.g. OD, DBO e coliformes termotolerantes.

Não é razoável querer obter uma boa calibração Nível 3 sem previamente obter uma boa calibração Nível 2, que por sua vez depende da calibração Nível 1.

Quanta à validade dos modelos, no caso de se ter que desenvolver modelos com carência de dados, deve ficar claro que modelagem é um processo evolutivo e que todos os modelos têm um viés qualitativo, apesar do forte viés quantitativo inerente a modelos matemáticos, numéricos e computacionais. Não é incomum se desenvolver modelos com dados parciais com viés qualitativo mais pronunciado. E, à medida que dados mais detalhados são obtidos, os modelos evoluem com calibrações mais refinadas, diminuindo o viés qualitativo e aumentando a confiabilidade quantitativa em diagnósticos e prognósticos.

Para o caso em questão não há carência de dados, uma vez que diversas campanhas de campo foram realizadas com o intuito de fornecer dados ambientais ao projeto e subsidiar a modelagem computacional. Estas medições complementam uma extensa base de dados adquirida ao longo de outros projetos realizados na BTS entre 1999 e 2010, entre os quais destacam-se:

1. De março de 1999 a dezembro de 2000, o SisBaHiA<sup>®</sup> foi especialmente aplicado à região da Baía de Todos os Santos, BTS, por contrato do consórcio Hydros-CH2Mhill com a Fundação Coppetec (Ref. ET-170377/PENO-565). Além de parte integrante dos ESTUDOS DE DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO AMBIENTAIS PARA A BTS, o

SisBaHiA<sup>®</sup> foi instalado no Centro de Recursos Ambientais (CRA), órgão do Governo da Bahia, para ser usado como ferramenta de gestão ambiental da BTS.

2. Aplicações de modelo hidrodinâmico 3D e 2DH, juntamente com modelos de geração de ondas e modelos de transporte Lagrangeano condicionado, para determinação de correntes residuais, de transporte de sedimentos e poluentes na Baía de Todos os Santos. Aplicação efetuada no âmbito do contrato de cooperação técnica PEN0-4145, entre o consócio BTS\_Hydros-CH2MHill e a Fundação Coppetec, intitulado “MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE ASPECTOS DA DINÂMICA DE SEDIMENTOS NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS, BA”, de Maio a Novembro/2003.
3. Aplicações de modelo hidrodinâmico 3D e de qualidade de água em modo Lagrangeano determinístico e probabilístico, para SUPORTE AO MONITORAMENTO AMBIENTAL DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DO EMISSÁRIO SUBMARINO DO RIO VERMELHO - SALVADOR, BA. Programa de Trabalho no contexto do contrato de cooperação técnica PEN0-7106 com a empresa Hydros Engenharia e Planejamento Ltda., de Março a Outubro/2008.
4. Aplicações de modelo hidrodinâmico 3D e de qualidade de água em modo Lagrangeano determinístico e probabilístico, com acoplamento dinâmico de modelo de campo próximo em “ESTUDO DO EMISSÁRIO DA DOW QUÍMICA NA BAIÁ DE ARATU, BA”, para Dow Brasil S.A. Ref. Fundação Coppetec PEN0-12765, de Outubro/2009 a Janeiro/2010.

Em relação ao **Nível 1** de calibração, os dados da linha de costa foram extraídos a partir de imagens georreferenciadas do Google Earth, por serem mais atuais que as disponíveis em cartas náuticas. Para a batimetria, usou-se os dados das cartas náuticas mais recentes para a região de interesse, além de um levantamento mais detalhado em uma faixa de 2 km centrada no eixo da ponte projetada. Todos os dados de batimetria estão descritos detalhadamente no *R3 – Relatório de Inventário de Dados* e *R7 – Relatório de Batimetria e Sísmica com dados Associados*. Para tipificar os sedimentos de fundo, utilizou-se dados expostos no *R4 – Relatório de Caracterização Sedimentológica I* e *R8 – Relatório de Caracterização Sedimentológica II*.

Para o **Nível 2**, os principais dados hidrodinâmicos e meteorológicos adotados para calibração e validação dos modelos dedicados a este projeto foram disponibilizados no *R13A - Relatório de Medições de Ventos, Correntes e Ondas - Parte A*, *R13B – Relatório de Medições de Ventos, Correntes e Ondas – Parte B*, no *R6 – Relatório de Medições Maregráficas Equinócio - Março de 2015* e no *R10 – Relatório de Medições Maregráficas – Inverno de 2015*. O *R13A* descreve o conjunto de dados monitorados na região da Baía de Todos os Santos (BTS) nos meses de novembro e dezembro de 2014 e Janeiro de 2015, em condições sazonais típicas de verão. O *R13B* apresenta o mesmo conjunto de variáveis medidas, porém para os meses de fevereiro, março e abril de 2015. Os dados medidos e analisados no *R6* referem-se a campanhas realizadas na região da BTS entre os meses de novembro de 2014 e de abril de 2015, representativos de condições típicas de verão e outono, englobando o equinócio de março de 2015. Os dados do *R10* correspondem às medições realizadas entre fevereiro e outubro de 2015, cobrindo condições sazonais típicas de inverno e condições astronômicas de maré equinocial. Os dados utilizados de tais campanhas são relativos a níveis de maré, correntes e ventos. Além destes dados, adotou-se valores médios para as vazões dos principais rios afluentes à BTS.

Para a calibração, foram utilizadas as medições do mês de novembro de 2014, enquanto que a validação foi feita para o período de março de 2015.

A Figura 2 apresenta as estações que foram utilizadas para a aferição das características hidrodinâmicas da BTS. A seguir, os resultados são ilustrados pela comparação de níveis e correntes medidas e modeladas nas estações mais próximas à região de interesse (N1 e A2). Para a visualização dos resultados das demais estações, deve-se recorrer aos relatórios R9 e R11.

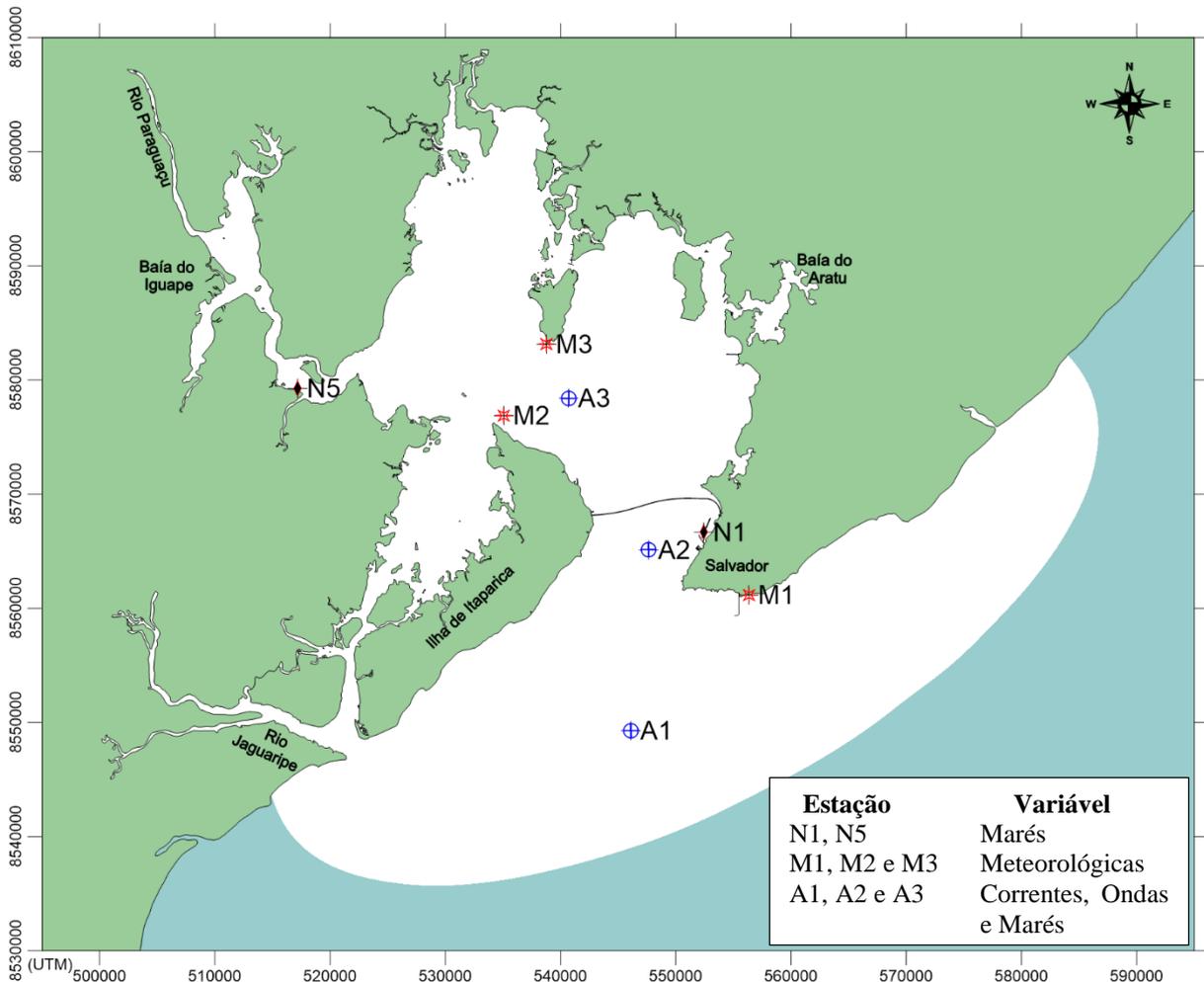


Figura 2. Localização de estações de correntometria (A1 e A2 no exterior e no canal de acesso à BTS – LT/COPPE/UFRJ e A3 entre as ilhas de Itaparica e Frade – IGEO/UFBA), estações mareográficas (N1 na Capitania dos Portos de Salvador e N5 em São Roque do Paraguaçu) e estações meteorológicas (M1, M2 e M3 na Praia de Amaralina, na Ilha de Itaparica e na Ilha do Frade respectivamente).

### 5.2.1 Calibração e validação de níveis de maré

Por ser a estação mais próxima do eixo da ponte, os resultados dos níveis de maré para a estação N1, na Capitania dos Portos de Salvador (Figura 2), são os mais relevantes para este projeto. A Figura 3 mostra gráfico comparativo de níveis de maré medidos e modelados nesta estação, durante o mês de novembro de 2014 (calibração). A Figura 4 mostra as mesmas variáveis, durante o período de março de 2015 (validação), com marés de sizígia equinociais por volta do dia 20/03/2015. Pela análise deste gráfico, percebe-se que os resultados da modelagem mantêm-se praticamente indistinguíveis dos valores medidos.

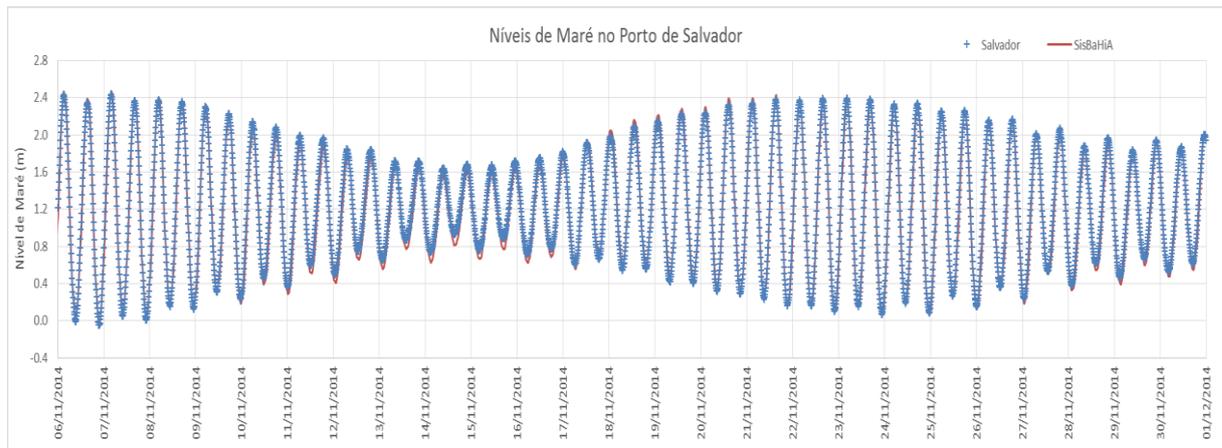


Figura 3. Calibração – Novembro 2014: Comparação de níveis de maré medidos e modelados na estação N1. Analisando o gráfico, percebe-se que os resultados da modelagem são praticamente indistinguíveis dos valores medidos. A estação N1 fica na Capitania dos Portos de Salvador como indica a Figura 2.

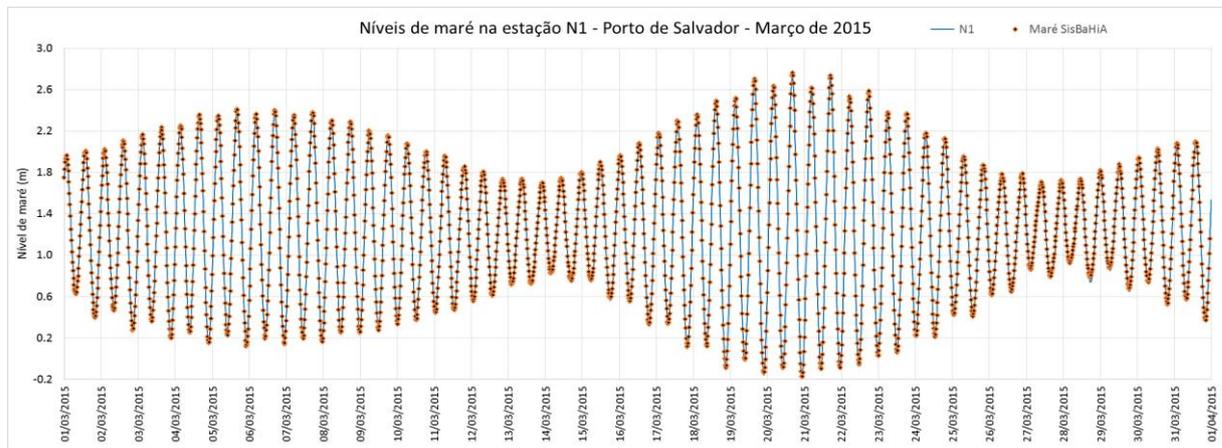


Figura 4. Validação – Março 2015: Comparação de níveis de maré medidos e modelados na estação N1. Analisando o gráfico, percebe-se que os resultados da modelagem mantêm-se praticamente indistinguíveis dos valores medidos. A estação N1 fica na Capitania dos Portos de Salvador como indica a Figura 2.

om base nos resultados apresentados na Figura 4, considera-se que o modelo está adequadamente validado para níveis de maré, com índices de coerência superiores a 95% entre valores medidos e modelados na estação N1, a mais próxima da área de interesse. No caso de níveis de maré, adota-se como índice de coerência o módulo da diferença entre valores modelados e medidos em relação à altura média de marés de sizigia medidas.

## 5.2.2 Calibração e validação de correntes

Para os resultados de correntes, a estação mais próxima à ponte é a A2 (Figura 2). A Figura 5 compara os vetores de velocidade medidos e modelados durante o mês de novembro de 2014 (calibração). A Figura 6 compara as mesmas variáveis, mas para o período de março de 2015 (validação). Percebe-se que os resultados obtidos na modelagem para correntes na estação A2 estão muito coerentes, com valores medidos e modelados sempre muito similares. Frequentemente os vetores estão sobrepostos e não se distingue o modelado do medido. Ressalta-se que o modo de apresentação vetorial é ideal para destacar módulo e direção das correntes, permitindo uma avaliação de coerência mais direta entre valores oriundos de medição e de modelagem.

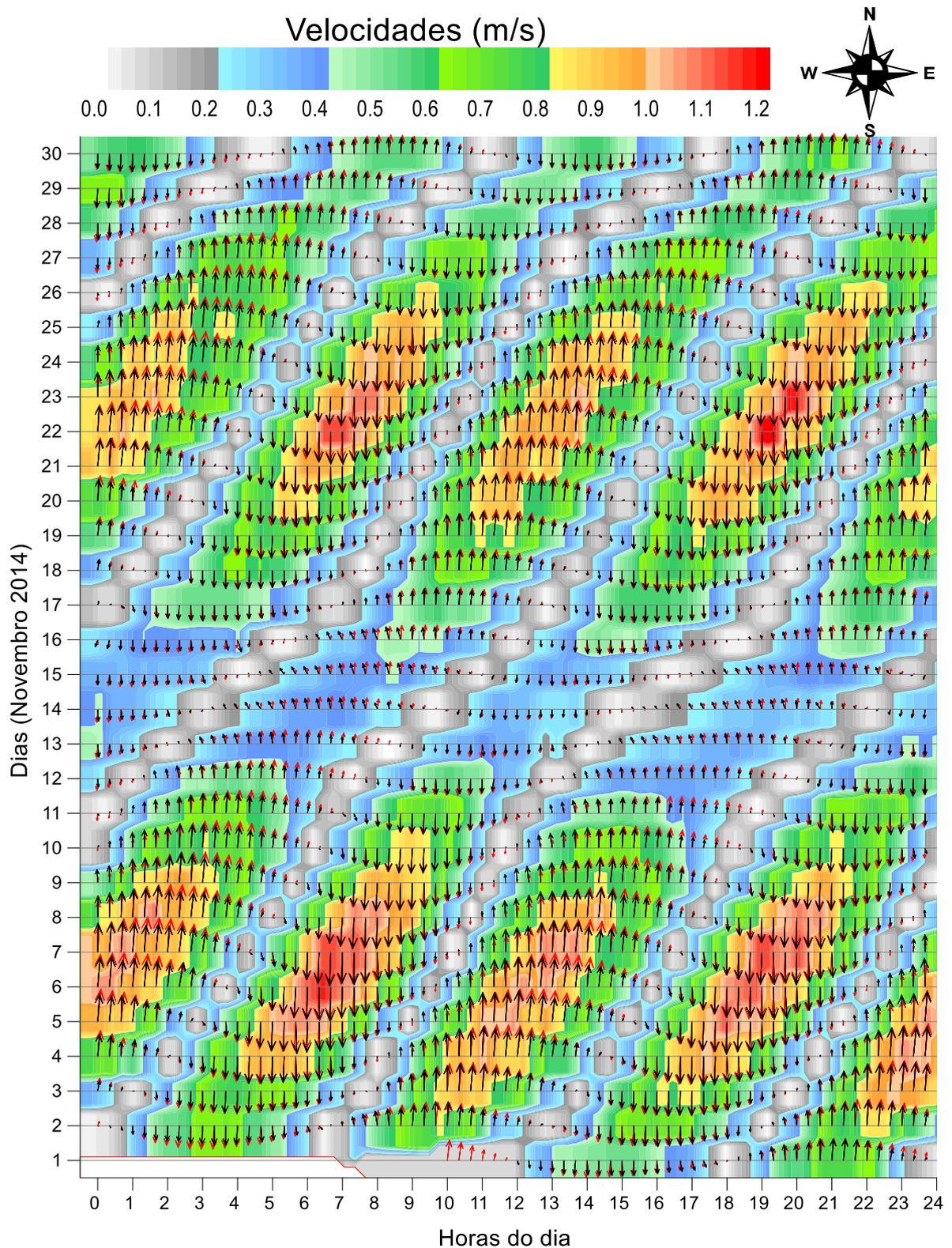


Figura 5. Calibração – Novembro 2014: Comparação de séries temporais de vetores de correntes médias na vertical (2DH) na estação A2. As setas pretas representam valores medidos e as setas vermelhas retratam valores modelados. Esta é a estação mais relevante por estar próxima ao centro do eixo da ponte projetada. Nota-se a boa coerência entre valores medidos e modelados em todos os dias.

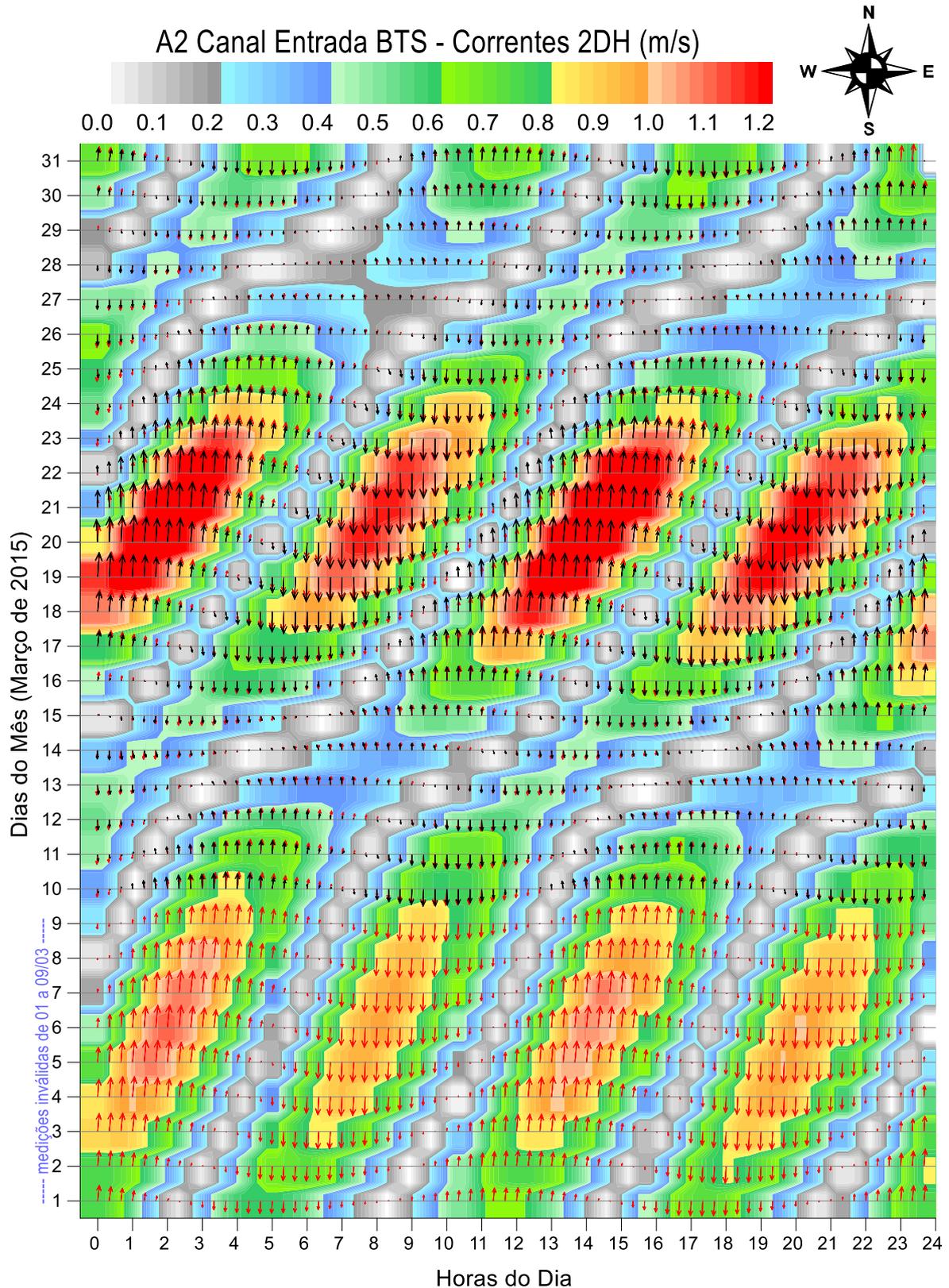


Figura 6. Validação – Março 2015: Comparação de séries temporais de vetores de correntes médias na vertical (2DH) na estação A2. As setas pretas representam valores medidos e as vermelhas retratam valores modelados. Esta é a estação mais relevante por estar próxima ao centro do eixo da ponte projetada, nota-se a ótima coerência entre valores medidos e modelados a partir de 10/03, pois as medições de 1 a 9/03 foram inválidas.

Com base nos resultados comparativos de correntes apresentados na Figura 6, considera-se que o modelo está adequadamente validado para correntes de maré, com índices de coerência superiores a 90% entre valores medidos e modelados na estação A2, a mais próxima da área da ponte projetada. No caso de correntes de maré, adota-se como índice de coerência o módulo da diferença entre valores modelados e medidos em relação à média de máximas magnitudes de correntes de marés de sizígia medidas.

Destaca-se que as demais estações também apresentaram elevados níveis de coerência entre dados medidos e modelados. Seus resultados e o detalhamento de todos os aspectos de calibração e validação com dados medidos nas campanhas de campo vinculadas a este projeto, foram apresentados no *R9 – Relatório de Calibração de Modelos* e no *R11 – Relatório de Validação de Modelos* – ambos entregues em 12/2015.

Detalha-se a seguir aspectos metodológicos e relativos aos cenários de modelagem computacional.

### 5.3 Implantação de base de dado para modelagem computacional

A estratégia geral do SisBaHiA<sup>®</sup> é fundamentada em bases de dados, e objetiva dar confiabilidade e facilidade de manipulação de dados e resultados aos usuários. O SisBaHiA<sup>®</sup> adota o sistema hierárquico de base de dados apresentado na Figura 7.

A estrutura hierárquica de dados explicita a interdependência existente entre malhas e modelos associados. Fica claro assim porque a solicitação de simulação de um novo caso de transporte de um escalar, por vezes, pode requerer muito trabalho prévio, e.g., uma nova modelagem hidrodinâmica ou até o desenvolvimento de uma nova malha. Como se vê na estrutura descrita na Figura 7, os modelos de transporte estão no último nível na hierarquia de modelagem, o que aumenta o volume de trabalho se houver necessidade de incluir desenvolvimentos nos níveis anteriores.

A estrutura hierárquica entre modelos no banco de dados do SisBaHiA<sup>®</sup>, entre outras vantagens, induz o usuário a seguir uma metodologia consistente de modelagem, impede a dissociação entre dados de entrada e resultados obtidos, impede a dissociação entre malhas e modelos, impede a dissociação entre modelos hidrodinâmicos e modelos de transporte, facilita o desenvolvimento de modelos derivados, etc.

As atividades de modelagem envolvem:

1. Implementação de base de dados atualizada para modelagem da região de interesse. O mapa da Figura 1 dá ideia do domínio de modelagem estimado. Houve extensão da parte sul do domínio, de modo a incluir áreas com profundidades superiores a 200 m para uso nos modelos de propagação de ondas do largo para o interior da BTS.
2. Atualização e ampliação continuada da bases de dados ao longo do desenvolvimento dos trabalhos.
3. Modelagens das etapas: preliminar, calibração e validação e de prognósticos.

Para as modelagens apresentadas neste **R14**, foi desenvolvida a base de dados denominada BTS-SIT\_PENO18126.mdb. A Figura 8 apresenta imagem da tela de abertura do SisBaHiA<sup>®</sup> com o projeto descrito neste **R14**.

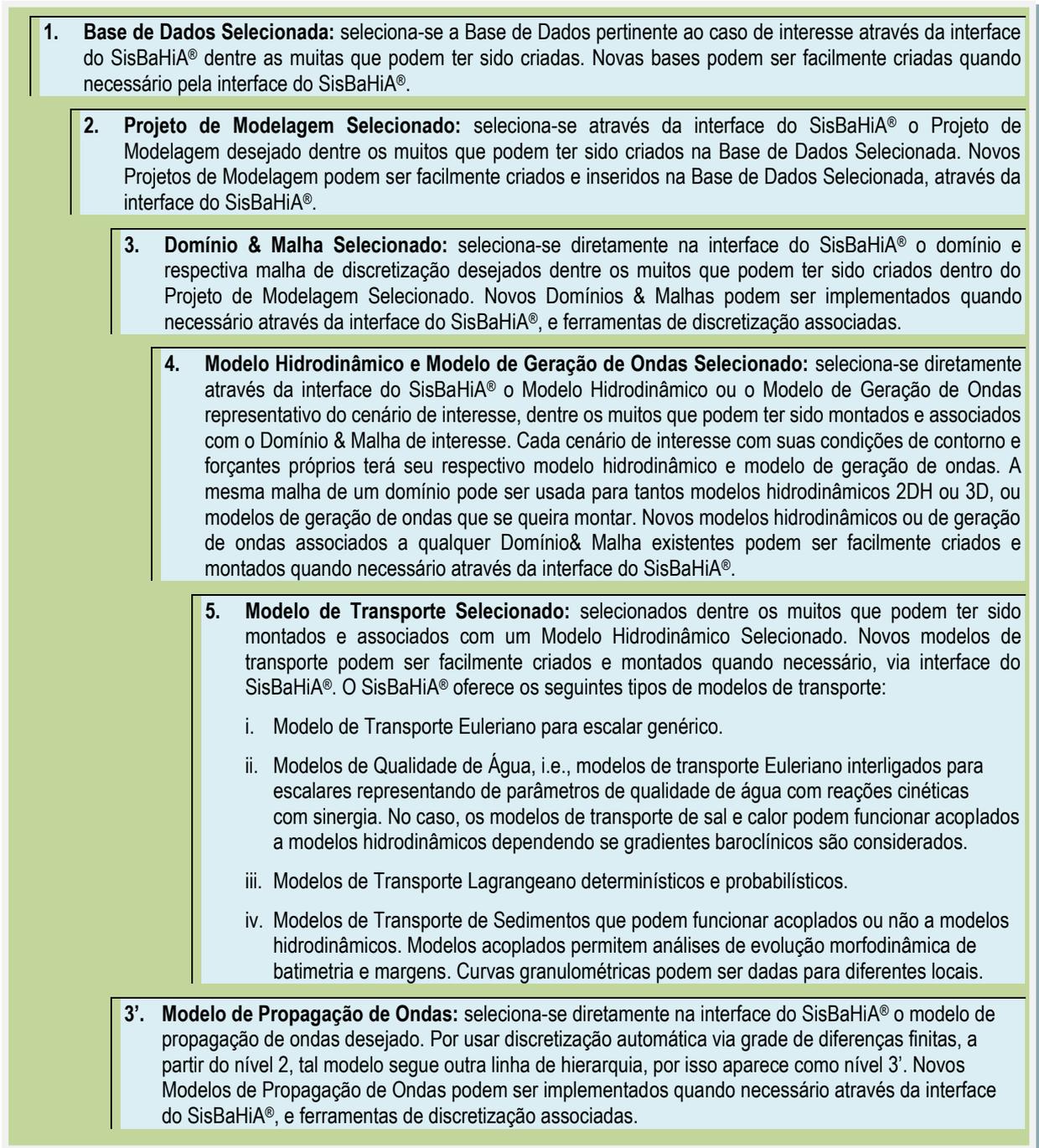


Figura 7. Diagrama<sup>1</sup> de vinculação hierárquica de base de dados, projetos e modelos no SisBaHiA®.

<sup>1</sup> O diagrama destaca apenas aos módulos centrais do SisBaHiA®. Outros módulos vinculados a um Projeto, e.g. Módulo de Análise e Previsão de Marés, Modelos 1D, etc., também fazem parte da base de dados.



Figura 8. Imagem da tela de abertura do SisBaHiA® com o projeto de modelagem descrito neste R14.

#### 5.4 Aspectos metodológicos dos cenários de modelagens

Descrevem-se, a seguir, os elementos das modelagens desenvolvidas para o diagnóstico e prognóstico relevantes aos objetivos gerais listados na seção 2:

- ❖ **Modelagem digital da área de interesse:** foi desenvolvida através de discretização em malha de elementos finitos biquadráticos, considerando atualizações de linha de costa, batimetria e sedimentologia. A Figura 9 apresenta os dados gerais da malha desenvolvida, denominada “**Malha Final 2015\_BTS\_Ponte - Traçado 12 (Outubro 2014)**”.

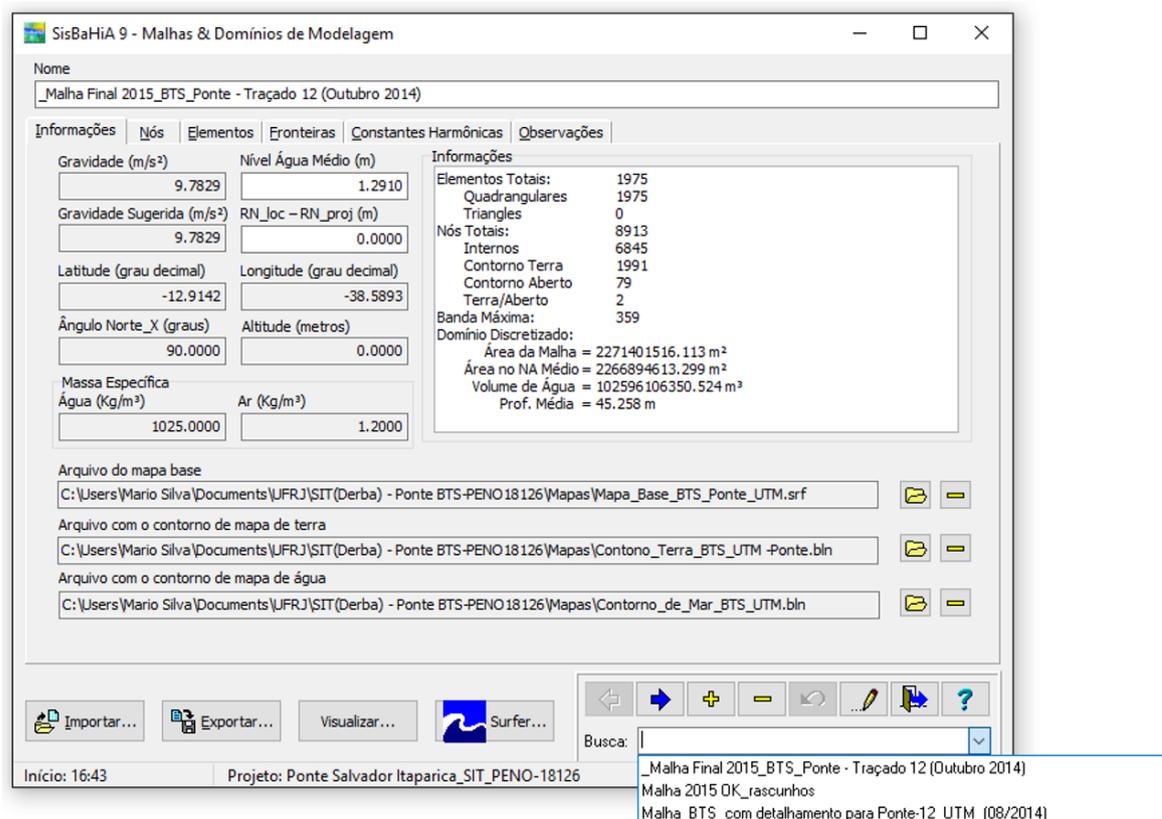


Figura 9. Imagem da tela de Malhas e Domínios do SisBaHiA® estampando dados gerais da malha de discretização adotada nas modelagens discutidas neste relatório R14. No canto inferior lista de outras malhas. A Figura 10 apresenta mapa da malha acima descrita.

A Figura 10 apresenta mapa geral da malha desenvolvida, retratando como foi feita a modelagem digital do terreno, e mostra também o detalhamento para representar as condições atual e projetada no entorno do eixo da Ponte. A diferença na condição projetada é inserida pelos esforços das estruturas da ponte no modelo hidrodinâmico. O eixo da ponte considerado foi o do desenho **P-GMT-001-DE-01200-EN-RB6-MM-REV24-Samir.dwg**, fornecido por técnicos do SIT em outubro de 2014.

A malha adota elementos finitos subparamétricos biquadráticos, isto é, as variáveis nos elementos são representadas por polinômios biquadráticos, ao passo que a forma geométrica dos elementos é definida pelos vértices de quadriláteros com lados retilíneos. Este tipo de discretização tem acurácia mínima de 2ª ordem, podendo chegar a 4ª ordem nas zonas com elementos mais regulares. Em geral a ordem efetiva da aproximação numérica fica entre 3ª e 4ª ordem de acurácia para malhas com elementos irregulares como os mostrados na Figura 10. Para detalhes sobre o assunto veja a seção “3.5. Formulação numérica do Modelo Hidrodinâmico” na Referência Técnica do SisBaHiA® em [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br).

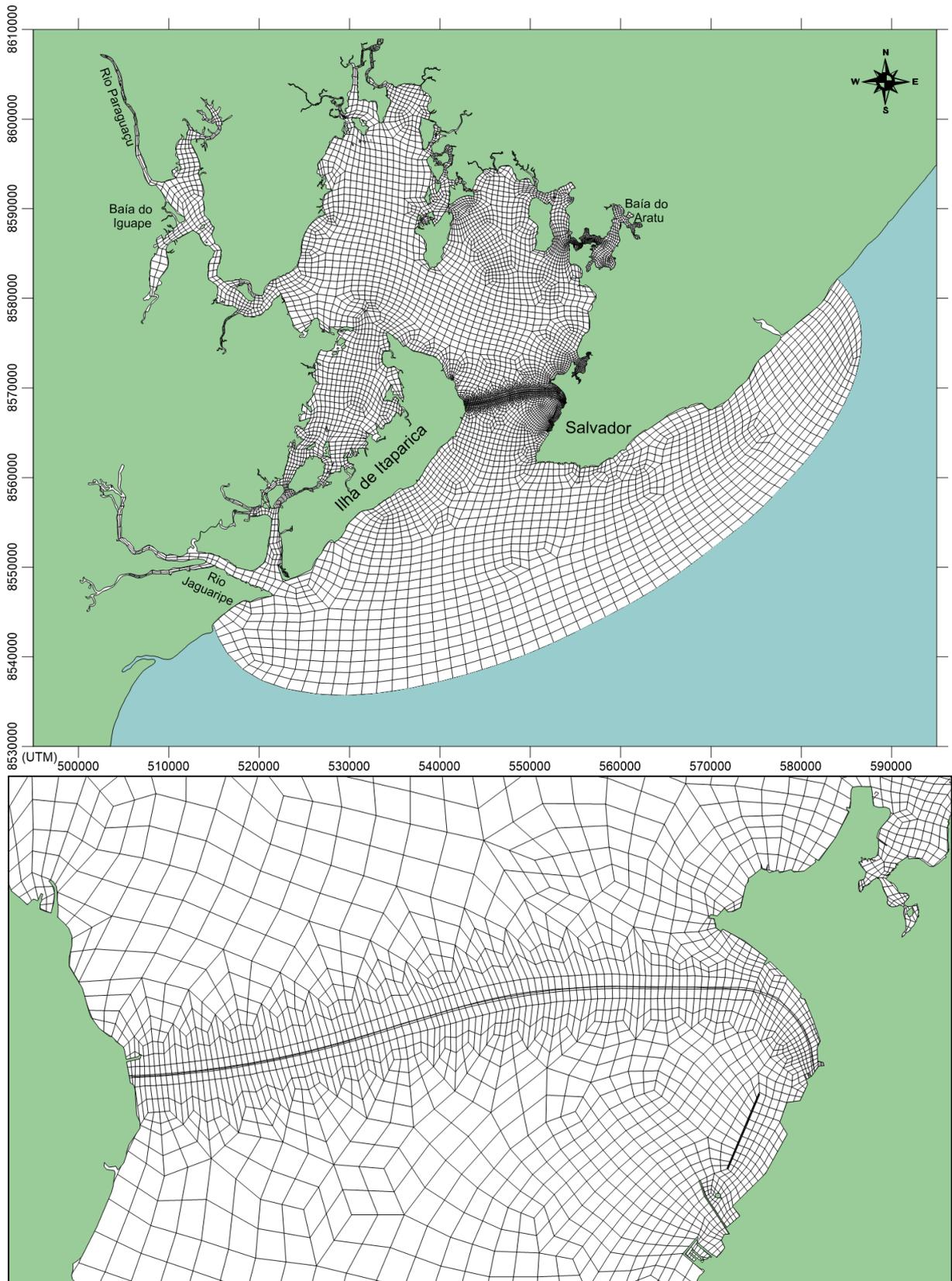


Figura 10. Mapa mostrando a malha de discretização da BTS em elementos finitos subparamétricos biquadráticos. Acima malha geral e abaixo zoom no entrono do eixo da Ponte. Dados gerais da malha na Figura 9.

A Figura 11 e a Figura 12 mostram telas dos modelos hidro-sedimentológicos desenvolvidos para as análises apresentadas neste **R14**, e descritos abaixo:

- ❖ **Modelagem Hidro-Sedimentológica da BTS –Atual (1 ano):** utilizando a Malha Final 2015\_BTS\_Ponte - Traçado 12 (Outubro 2014), objetiva obter valores de níveis, correntes e evolução morfológica de fundo ao longo de um ano, gerando base de comparação para a situação de projeto. O modelo simula por um ano, considerando registros de marés com efeitos meteorológicos devidamente calibrados para o Porto de Salvador, vazões médias nos principais rios afluentes e nos pontos de lançamento de águas servidas e curva granulométrica pertinente aos diferentes setores do domínio de modelagem.
- ❖ **Modelo Hidro-Sedimentológico BTS – Projeto (1 ano):** utilizando a Malha Final 2015\_BTS\_Ponte - Traçado 12 (Outubro 2014), incorporando tensões de atrito devido aos pilares da ponte, objetiva obter valores de níveis, correntes e evolução morfológica de fundo ao longo de um ano para avaliação de potenciais impactos da ponte, ao se comparar com resultados da situação atual. O modelo rodou por um ano, considerando os mesmos dados da situação atual: registros de marés com efeitos de meteorológicos devidamente calibrados para o Porto de Salvador, vazões médias nos principais rios afluentes e nos pontos de lançamento de águas servidas e curva granulométrica pertinente aos diferentes setores do domínio de modelagem.

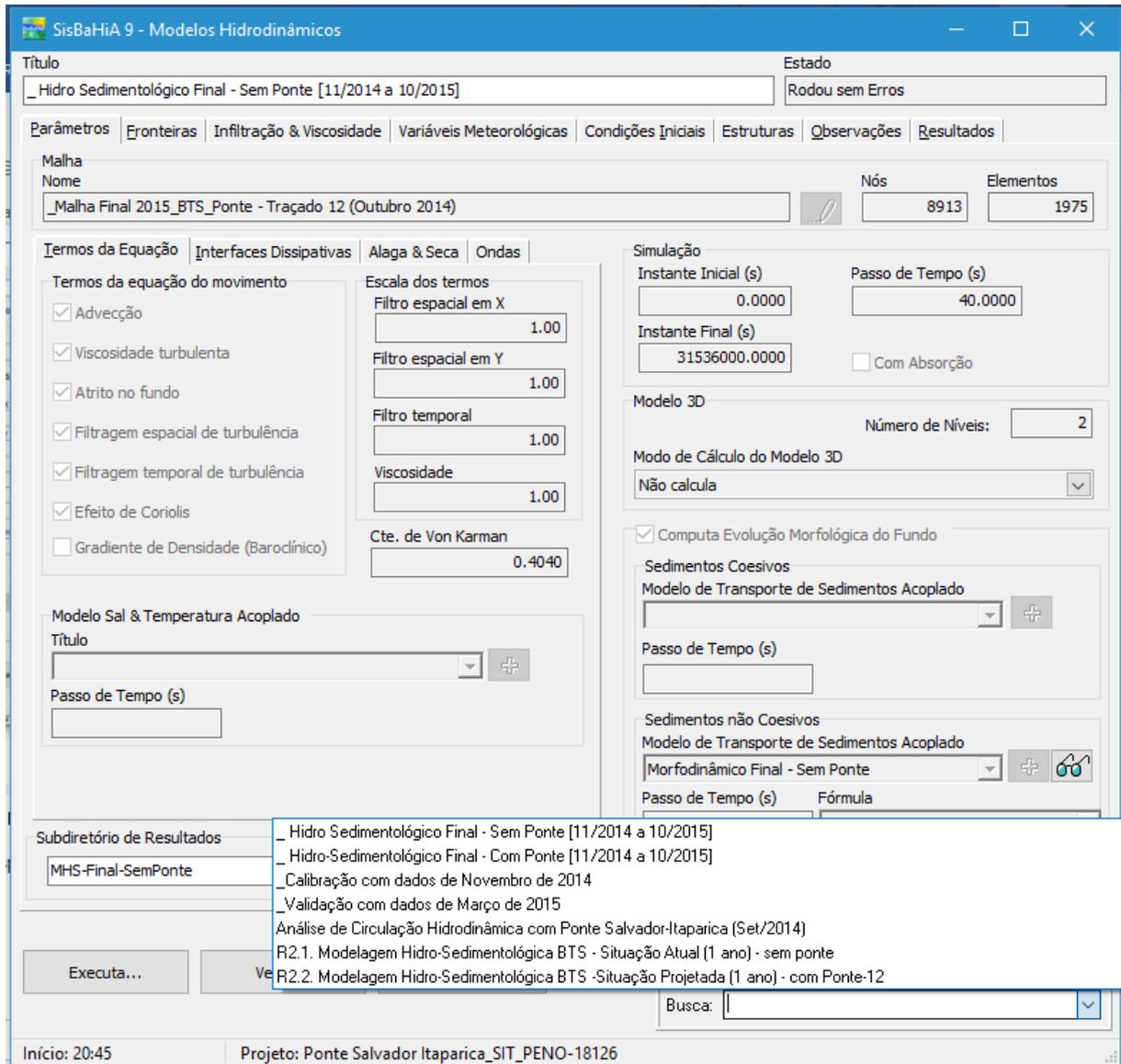


Figura 11. Imagem de tela de Modelos Hidrodinâmicos do SisBaHiA® mostrando no canto inferior direito a lista de modelos desenvolvidos. Note na parte inferior direita da tela a marcação para computar evolução morfológica do fundo e a indicação do modelo de transporte de sedimentos acoplado, cf. Figura 12.

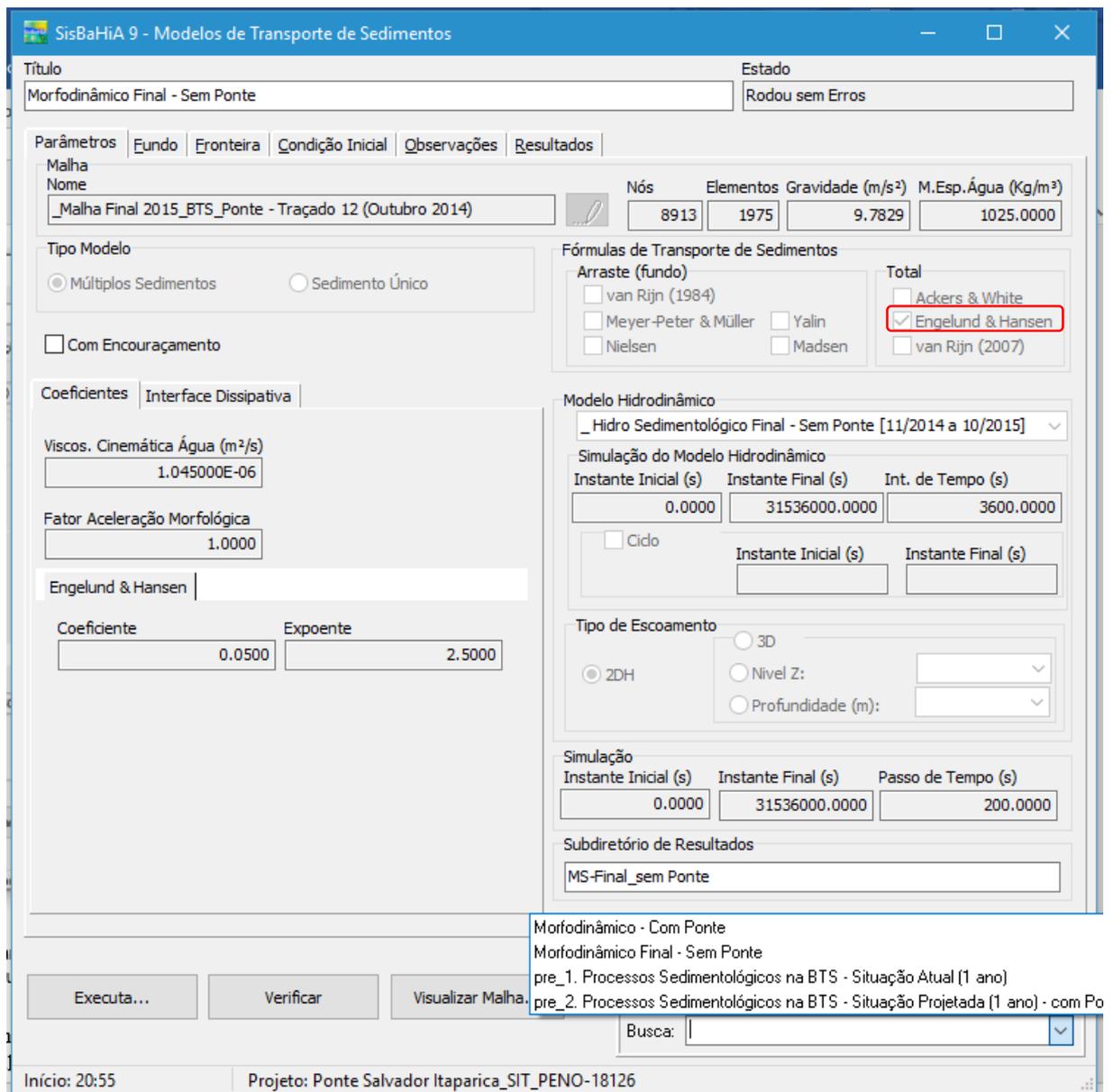
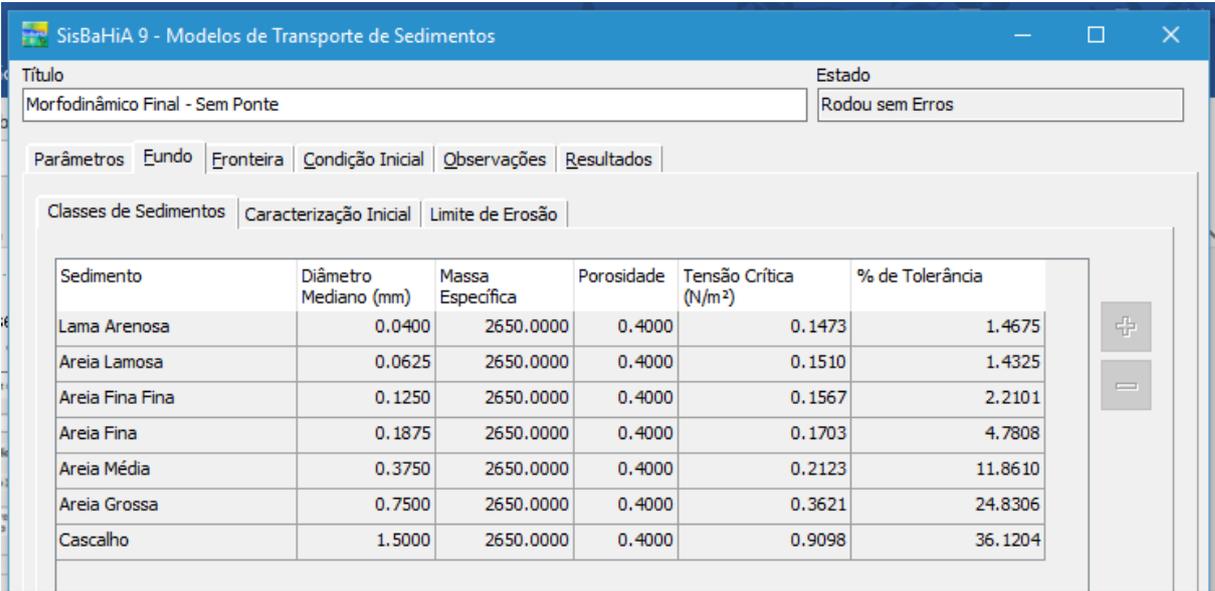


Figura 12. Imagem da tela de Modelos de Transporte de Sedimentos do SisBaHiA® mostrando no canto inferior direito lista dos modelos desenvolvidos. Note que o modelo ilustrado é o vinculado ao modelo hidrodinâmico da situação atual.

Na Figura 12, destaca-se com delineado vermelho a fórmula de Engelund & Hansen para transporte de sedimentos. Dentre as múltiplas opções de fórmulas permitidas pelo SisBaHiA®, selecionou-se a de Engelund & Hansen por calcular o transporte total, por arraste e por suspensão, de sedimentos que estão na faixa granulométrica considerada para a BTS. As classes de sedimentos consideradas e respectivas características medianas estão na Tabela 1.

Tabela 1. Características medianas das classes de sedimentos consideradas na BTS - extraído de imagem do SisBaHiA®. A Figura 40 mostra os percentuais de distribuição espacial de cada classe ao longo do domínio de modelagem.



Sedimento	Diâmetro Mediano (mm)	Massa Específica	Porosidade	Tensão Crítica (N/m <sup>2</sup> )	% de Tolerância
Lama Arenosa	0.0400	2650.0000	0.4000	0.1473	1.4675
Areia Lamosa	0.0625	2650.0000	0.4000	0.1510	1.4325
Areia Fina Fina	0.1250	2650.0000	0.4000	0.1567	2.2101
Areia Fina	0.1875	2650.0000	0.4000	0.1703	4.7808
Areia Média	0.3750	2650.0000	0.4000	0.2123	11.8610
Areia Grossa	0.7500	2650.0000	0.4000	0.3621	24.8306
Cascalho	1.5000	2650.0000	0.4000	0.9098	36.1204

Amplios detalhes sobre a modelagem de transporte de sedimentos estão na seção 4. *Modelos de Processos Sedimentológicos – evolução morfodinâmica* da Referência Técnica do SisBaHiA®, no endereço [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br). Na seção 5.5 apresenta-se tópicos selecionados de tal documento, que são mais pertinentes ao caso tratado neste **R14**.

Além de análises hidro-sedimentológicas, neste **R14** apresenta-se uma avaliação de alturas de ondas que podem atingir o eixo da Ponte. Para tal adotou-se o procedimento descrito a seguir.

- ❖ **Modelos de Propagação de Ondas:** foram propagadas ondas do largo para o interior da BTS e obtidos mapas de isolinhas de Fatores de Amplificação de Alturas de Onda. Tais fatores são definidos pela razão  $H/H_o$ , onde  $H$  é a altura da onda propagada em um dado local e  $H_o$  é a altura da onda em águas profundas. As ondas consideradas têm períodos e direções de propagação ao largo definidas por dados de reanálise ao longo de 30 anos, entre 1980 e 2010, cujas estatísticas foram determinadas no *R12 – Relatório de Extremos de Ondas*. O modelo WaveWatch III (WW3) foi validado com dados coletados por um ADCP no ponto denominado A1, localizado em 38,5746° W e 13,1224° S (Figura 13), próximo à entrada da BTS. Para maiores detalhes sobre o processo de validação do modelo espectral WW3, deve-se recorrer ao *R12*.

Pelas condicionantes geográficas da BTS, com foco na região do eixo da Ponte, as ondas consideradas têm direção incidente entre os azimutes 180° (S) e 135°(SE) com passo de 5°, e períodos na faixa de 7 a 15 s com passo de 1 s. No total foram propagadas 10 direções × 9 períodos, totalizando 90 modelos de propagação de ondas.

De modo a se obter o Fator de Amplificação de Alturas de Onda, considerou-se altura unitária  $H_o = 1.0$  m para todas as ondas propagadas do largo para o interior da BTS.

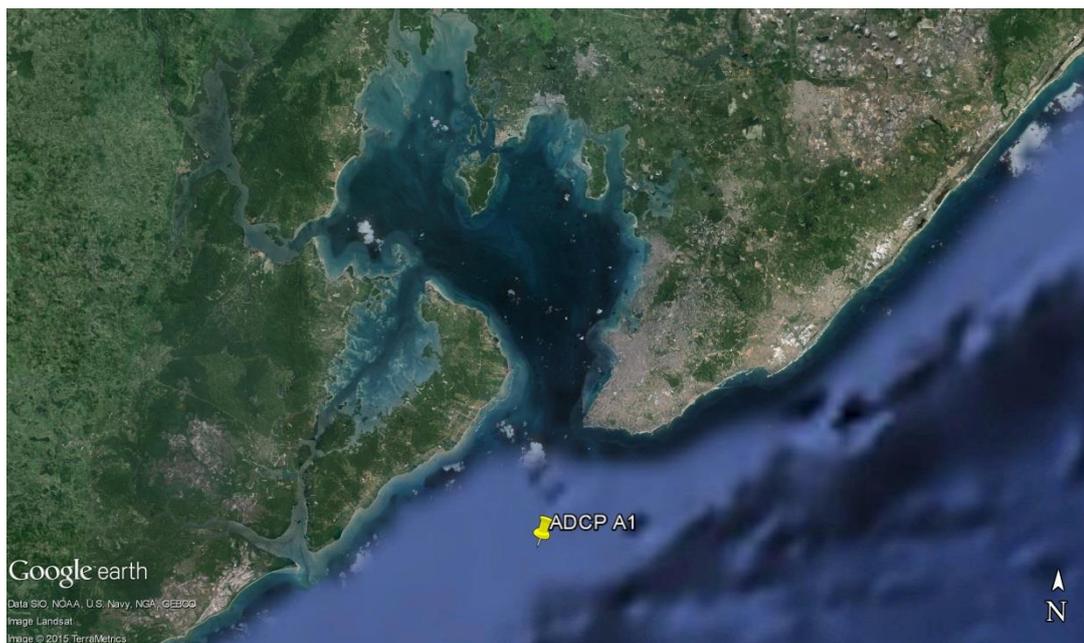


Figura 13. Na imagem do Google Earth, o marcador amarelo indica a posição do ponto de medição de ondas obtidos por um ADCP.

A Figura 14 estampa imagem da tela de Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA<sup>®</sup>, na qual aparece uma lista parcial dos 90 casos modelados.

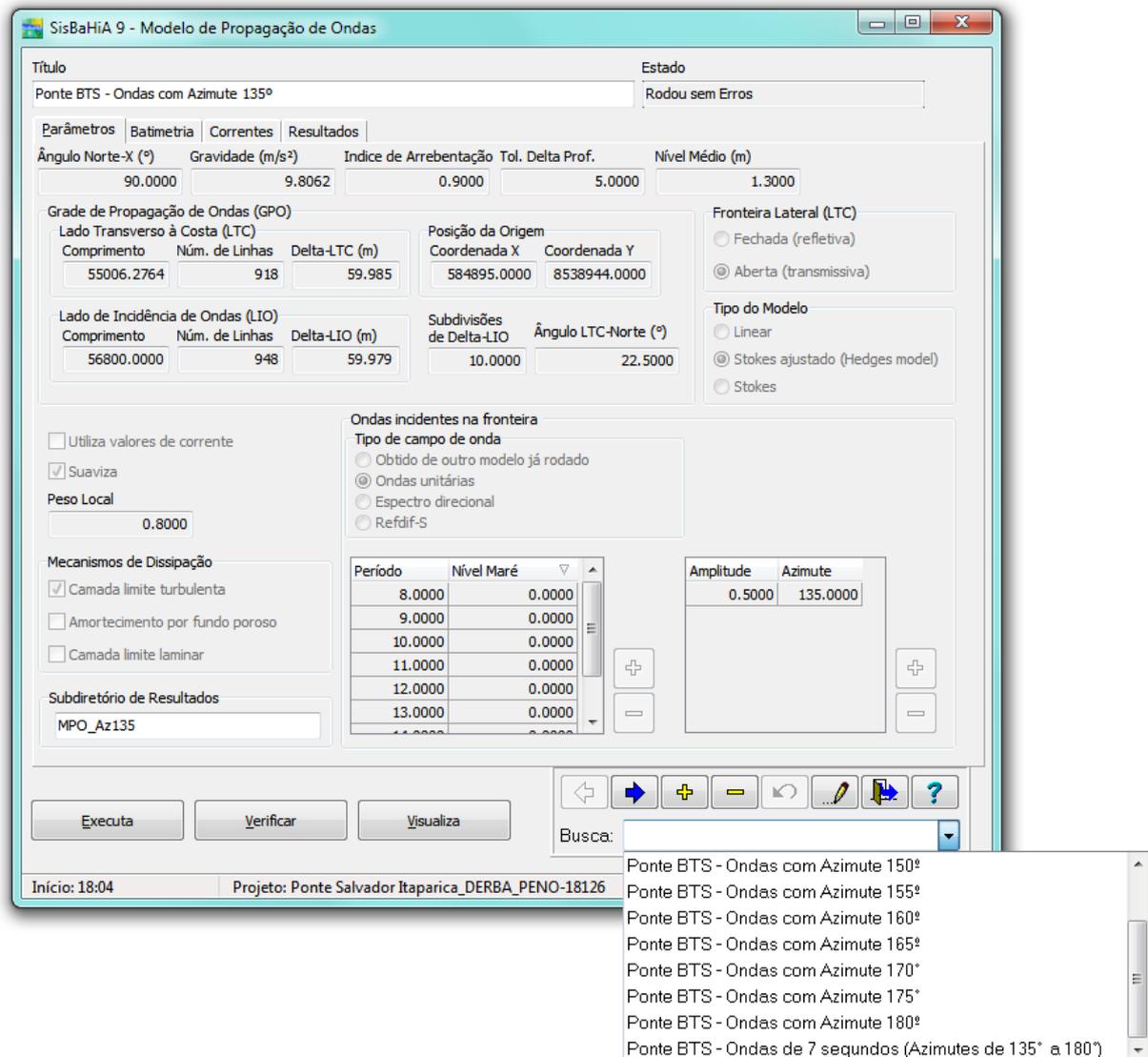


Figura 14. Imagem da tela de Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA® mostrando no canto inferior direito lista parcial dos modelos desenvolvidos.

## 5.5 Sobre modelagem de processos sedimentológicos e evolução morfodinâmica

O modelo hidrodinâmico com fundo móvel faz o balanço de massa de sedimentos no fundo, calculando ao longo do tempo o transporte de sedimentos devido à ação dos agentes hidrodinâmicos. Caso se esteja usando a possibilidade de alagamento e secamento em meio poroso, evidentemente, só há transporte sólido se o escoamento ocorrer em meio fluido.

O usuário tem a opção de escolher a fórmula de transporte de sedimentos a ser utilizada. Ao longo do tempo de cálculo, a superfície do fundo,  $S_F \equiv z + h(x, y, t) = 0$ , vai se alterando já que o valor de  $h$  torna-se variável no tempo. Deste modo, é possível fazer uma avaliação da evolução morfológica no domínio de modelagem e quantificar taxas de erosão e assoreamento.

Com a alteração da batimetria alteram-se também as correntes e ações dos agentes hidrodinâmicos, resultando em um processo com retroalimentação.

### 5.5.1 Critério de mobilidade de sedimentos

Para uma determinada granulometria de sedimentos no leito, o processo de erosão e transporte, bem como de assoreamento, depende da *tensão crítica de mobilidade*,  $\tau_c$ . Valores da tensão de arrasto no leito,  $\tau_o$ , acima deste valor crítico podem promover a erosão e transporte de grãos enquanto que, para valores inferiores a esta tensão, os grãos permanecem imóveis, ou, se em movimento, tenderão a depositar.

No caso de sedimentos predominantemente arenosos, o critério de mobilidade usualmente empregado baseia-se no parâmetro de Shields,  $\Psi$ , que tem a seguinte expressão:

$$\Psi = \frac{u_*^2}{g(S_s - 1)d} = \frac{\tau_o}{\gamma_a(S_s - 1)d} = f\left(\underbrace{\frac{du_*}{\nu}}_{R_*}\right) \quad ; \quad S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_a} = \frac{\rho_s}{\rho_o} \quad (1)$$

onde:

$\tau_o$  = tensão de arrasto no leito

$\gamma_s$  = peso específico do grão =  $g\rho_s$

$\gamma, \gamma_a$  = peso específico da água =  $g\rho_o$

$g$  = aceleração da gravidade

$\rho_s$  = massa específica do sedimento.

$\rho_o$  = massa específica da água

$d$  = diâmetro do grão

$u_*$  = velocidade de atrito no leito

$\nu$  = viscosidade cinemática da água

O termo entre parêntesis,  $R_*$ , é também conhecido como *Número de Reynolds* do grão.  $S_s$  é a densidade do sedimento em relação à água ambiente. A Figura 15 é a representação gráfica tradicional do Diagrama de Shields, mostrando a relação entre o parâmetro de Shields,  $\Psi$ , e o número de Reynolds do grão,  $R_*$ .

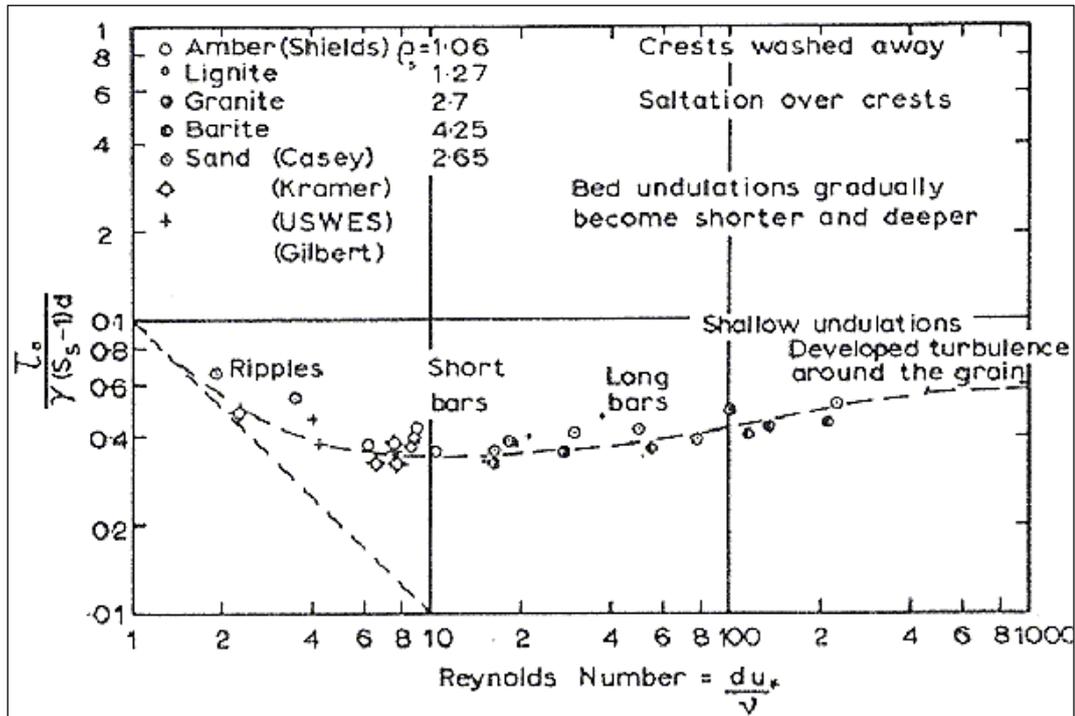


Figura 15. Diagrama de Shields tradicional, no qual a obtenção de  $\tau_o$  implica em processo iterativo, porque a velocidade de atrito  $u_*$  aparece nos dois eixos [ $u_* = \sqrt{(\tau_o / \rho)}$ ].

Como o emprego do tradicional Diagrama de Shields apresentado na Figura 15 acarreta em um processo iterativo, apresenta-se na Figura 16 um diagrama modificado, no qual a tensão crítica pode ser obtida diretamente a partir da caracterização do sedimento e da água. A Figura 17 apresenta um gráfico exemplificando de valores de  $\tau_c$  calculados para água salgada com sedimentos com diâmetros em unidades  $\phi$ .

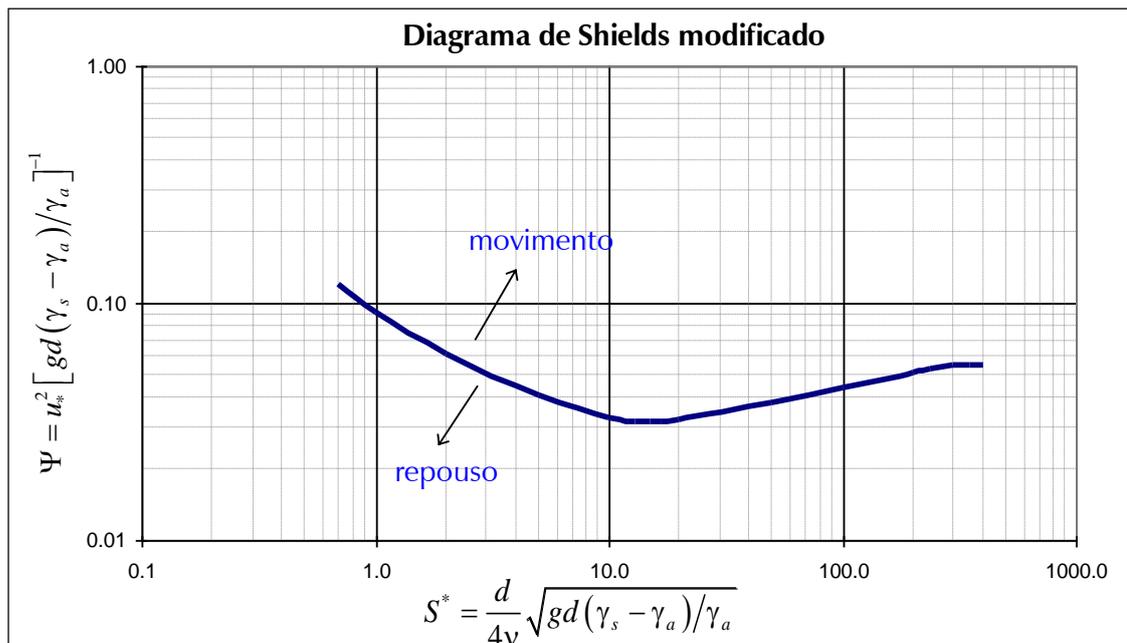


Figura 16. Diagrama de Shields modificado, no qual a tensão crítica  $\tau_c = \sqrt{(u^*/\rho_o)}$ , pode ser obtida diretamente das características do sedimento e da água.

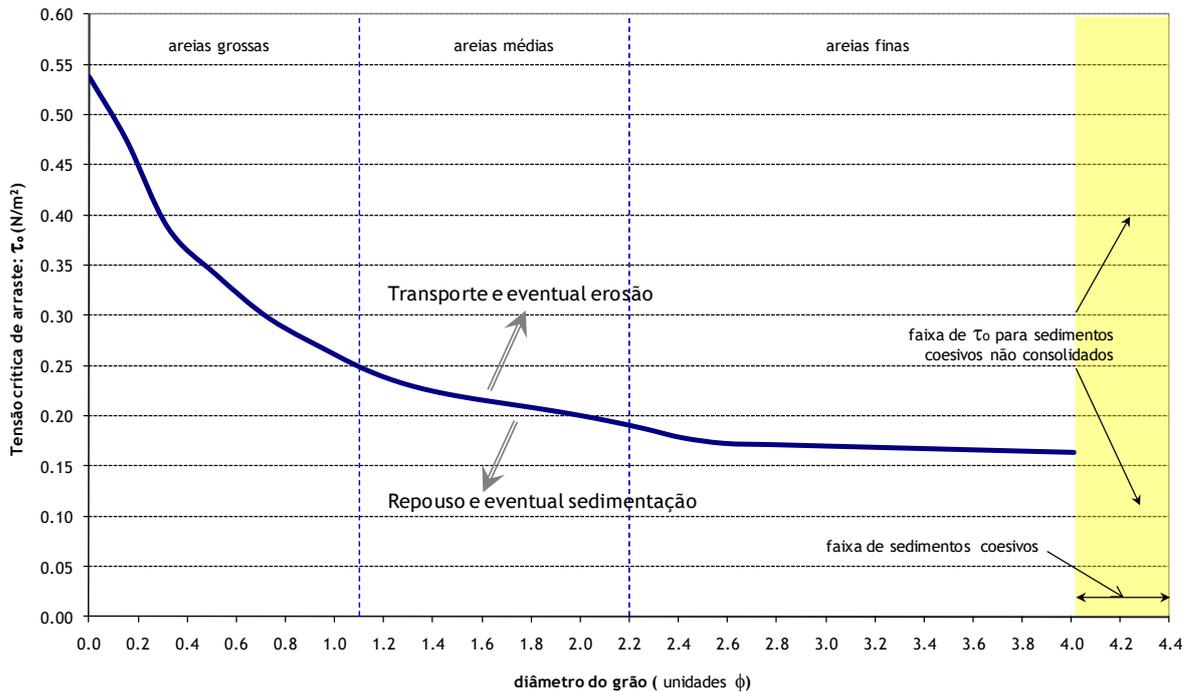


Figura 17. Tensão crítica para mobilidade,  $\tau_c$ , calculada pelo diagrama de Shields modificado. No caso considerou-se água salgada com  $\rho_o = 1025 \text{ kg/m}^3$ ,  $\nu = 1.19\text{E}-6 \text{ m}^2/\text{s}$  e sedimentos com massa específica  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ . Em unidades  $\phi = -\ln(d [\text{mm}])/\ln(2)$ .

A aplicação do critério de transporte de sedimentos baseado no parâmetro de Shields consiste na comparação entre a tensão de arraste no fundo,  $\tau_o$ , exercida pelas correntes, em um dado local e a tensão crítica para mobilidade dos sedimentos no mesmo local,  $\tau_c$ . Teoricamente, se  $\tau_o$  for maior que  $\tau_c$  admite-se que os sedimentos no local são mobilizados e transportados pelas correntes, caso contrário os sedimentos permanecem em repouso ou tendem a depositar se estiverem sendo transportados.

Se efeitos de ondas forem incluído no modelo hidrodinâmico, mudam os valores de tensão no fundo e de tensão crítica. Por um lado, a tensão de arraste no fundo será maior, pois as turbulências geradas pelas ondas no fundo aumentam a resistência ao escoamento, como descrito na Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup>. Por outro lado, diminui a tensão crítica de mobilidade dos sedimentos devido à ação conjunta de ondas e correntes, pois o movimento oscilatório gerado pelas ondas no fundo mantém os sedimentos em condição transiente, “agitando-os” de modo mais efetivo. Ambos os efeitos aumentam a capacidade de transporte de sedimentos.

Para ação conjunta de ondas e correntes, o modelo de transporte de sedimentos do SisBaHiA<sup>®</sup> segue Van Rijn (2007), que combina a tensão crítica de Shields para correntes com a tensão crítica para ondas. Definindo  $\beta$  como a magnitude relativa entre a velocidade da corrente média na vertical,  $U$ , e o máximo da velocidade orbital das ondas no fundo,  $u_{bm}$ , calcula-se o valor da velocidade crítica efetiva,  $U_{cr,e}$ .

$$U_{cr,e} = \beta U_{cr} + (1-\beta)u_{bm,cr} \quad (2)$$

$$\beta = U/(U + u_{bm}) \quad (3)$$

Nesta relação, a velocidade crítica do escoamento,  $U_{cr}$  é obtida através de uma transformação de variáveis, partindo da tensão crítica adimensional de Shields. É importante mencionar que neste caso, o valor do coeficiente de Chézy,  $v$ . Ref. Tec. SisBaHiA<sup>®</sup> é calculado com amplitude de rugosidade equivalente  $\varepsilon = 0,125d_{50}$ .

$$\tau_c^* = \frac{\rho U_{cr}^2}{C_h^2 (\rho_s - \rho) d_{50}} \therefore U_{cr} = \sqrt{\tau_c^* C_h^2 (s-1) d_{50}} \quad (4)$$

Para obter a velocidade orbital crítica segue-se a metodologia de Komar e Miller (1975). As fórmulas correlacionam a velocidade crítica com o diâmetro médio do sedimento e o período da onda em questão. Já para períodos maiores, é observado que a velocidade crítica aumenta. A fórmula tem como desvantagem o ponto de descontinuidade no diâmetro médio de 0,5mm.

$$u_{cr,bm} = 0,24 \left[ (s-1)g \right]^{0,66} d_{50}^{0,33} (T_p)^{0,33}; \text{ para } 0,05 < d_{50} \text{ (mm)} < 0,5 \quad (5)$$

$$u_{cr,bm} = 0,95 \left[ (s-1)g \right]^{0,57} d_{50}^{0,43} (T_p)^{0,14}; \text{ para } 0,5 < d_{50} \text{ (mm)} < 2,0 \quad (6)$$

Deste modo, a tensão crítica adimensional para ação conjunta de ondas e correntes é calculada pela expressão seguinte, com  $\varepsilon = 0,125d_{50}$  no cálculo de  $C_h$ :

$$\tau_c^* = \frac{\rho (\beta U_{cr,c} + (1-\beta)u_{cr,bm})^2}{C_h^2 (\rho_s - \rho) d_{50}} \quad (7)$$

Como exposto a seguir, o critério de transporte adotado nos modelos do SisBaHiA<sup>®</sup> considera um efeito probabilístico na decisão de haver ou não transporte quando a tensão no fundo  $\tau_o$  tem valor próximo do valor crítico  $\tau_c$ . De fato, por conta da variabilidade de forma e tamanho dos grãos de sedimentos naturais, o valor da tensão crítica de mobilidade para um dado grão de referência deve ser interpretado como o valor para o qual a probabilidade de mobilidade ou deposição é 50%.

### 5.5.2 Cálculo do transporte de sedimentos

Como dito na seção anterior, o método mais usado para verificar a ocorrência de transporte de sedimentos, ou transporte sólido, é baseado na diferença entre a tensão exercida no fundo pelo escoamento,  $\tau_o$ , e a tensão crítica de mobilidade do sedimento,  $\tau_c$ .

As tensões críticas de mobilidade para diferentes granulometrias de sedimentos não coesivos são obtidas através do diagrama de Shields apresentado na Figura 16. A curva no diagrama representa o valor crítico do parâmetro de Shields,  $\Psi_c$ , a partir do qual se calcula a tensão crítica no fundo,  $\tau_c$ , para a qual o grão de sedimento passaria a ter mobilidade.<sup>2</sup>

Na natureza o limite para o movimento incipiente não é bem definido, pois os sedimentos apresentam diversas irregularidades de forma e tamanho. Assim, deve-se interpretar o valor de  $\Psi_c$  como um valor de probabilidade 50% de ocorrer movimento ou não, havendo uma faixa de incerteza com tolerância  $\alpha$ . Como mostra a Figura 15, há uma nuvem de pontos no entorno da linha pontilhada que define  $\Psi_c$ . Deste modo, ao invés de um valor crítico preciso, há uma faixa de movimento incipiente definida por  $\Psi_c \pm \alpha$ .

<sup>2</sup> Note que o parâmetro de Shields é apenas a forma adimensional da tensão no fundo  $\tau$ .

Para incorporar este efeito probabilístico, define-se um fator de tolerância  $\alpha$  de modo que, para um dado tamanho de grão em um dado tempo:

1. Se a tensão no fundo exercida pelo escoamento,  $\tau_o$ , for tal que  $\Psi/\Psi_c < (1 - \alpha)$ , o modelo considera que certamente não há condições de erosão ou transporte. No caso, se no local houver sedimentos em transporte, estes se depositariam, e os sedimentos em repouso assim permaneceriam.
2. Contrariamente, se ocorrer  $\tau_o$  de modo que  $\Psi/\Psi_c > (1 + \alpha)$ , o modelo considera que certamente o escoamento tem capacidade de erosão e transporte.
3. Na situação intermediária o modelo entra no seguinte processo probabilístico:
  - a. Se  $(\Psi/\Psi_c - 1 + \alpha) < (2\alpha \times A[0,1])$  admite-se não haver capacidade de erosão e transporte, caso contrário há capacidade. Na expressão, a função  $A[0,1]$  gera números aleatórios entre 0 e 1, a cada instante.
  - b. Repare que se  $\Psi/\Psi_c = 1$  a probabilidade de erosão e transporte ou de sedimentação é de 50%. À medida que  $\Psi/\Psi_c$  se aproxima de  $(1 - \alpha)$  a probabilidade de erosão e transporte diminui até 0%, e à medida que  $\Psi/\Psi_c$  se aproxima de  $(1 + \alpha)$  a probabilidade aumenta até 100%.
  - c. Com um valor de  $\alpha$  diferente de zero simula-se a incerteza que existe na determinação de  $\Psi_c$  ou do equivalente  $\tau_c$ . Como  $\Psi_c$  é estimado através da curva do parâmetro de Shields, que é ajustada a valores experimentais, o valor de  $\alpha$  representa a amplitude da nuvem de dados experimentais, como se vê na Figura 15.
  - d. Considerando que diversas fórmulas de transporte de sedimentos operam com a diferença  $(\Psi - \Psi_c)$  e que esta deve ser positiva, visto que só há transporte por excesso de tensão no fundo, quando em processo probabilístico, os valores de  $\Psi$  e  $\Psi_c$  são reajustados dentro da faixa de tolerância pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned}\tilde{\Psi}_c &= \Psi(1.0 - \alpha \times 0.5A[0,1]) \\ \tilde{\Psi} &= \Psi(1.0 + \alpha \times 0.5A[0,1])\end{aligned}\quad (8)$$

Onde o til indica valores ajustados e a função  $A[0,1]$  não muda de valor a cada instância, é a mesma computada no item (a.) acima. Desta forma, garante-se que um excesso de tensão no fundo aleatório, dentro da faixa de tolerância<sup>3</sup>.

Destaca-se que com a utilização do fator de tolerância  $\alpha$ , incorpora-se também um efeito de continuidade entre diferentes faixas granulométricas. Como um exemplo, a Tabela 2 apresenta valores típicos para sedimentos em água doce a 20°C.

Ao lado da Tabela 2, inclui-se uma tabela menor sugerindo valores de  $\alpha$ . O caso sugerido, representa uma situação pouco usual, pois, geralmente, os sedimentos em um dado domínio de modelagem tem granulometria menos variada. Não é comum haver casos com granulometria variando de areia muito fina a areia muito grossa em uma mesma região de modelagem. Em casos com granulometrias menos variadas, os valores de  $\alpha$  para o exemplo com cinco faixas de  $\tau_{oc}$  seriam menores.

<sup>3</sup> Tais ajustes não fazem efeito na fórmula de Van Rijn (2007) e fazem pouco efeito na de Ackers and White.

Tabela 2. Exemplo de valores de tensão crítica de mobilidade  $\tau_{oc}$  para sedimentos com massa específica  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ , água com  $\rho_o = 998,1 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade cinemática  $\nu = 1.05E-06 \text{ m}^2/\text{s}$ . A tabela inferior sugere valores típicos de  $\tau_{oc}$  e mostra valores de  $\alpha$  cobrindo toda a granulometria da tabela maior, o que não é comum em casos reais.

Sedimentos	d (mm)	d ( $\phi$ )	S*	$\Psi$	$\tau_{oc}$ (N/m <sup>2</sup> )
Areia Muito Fina	0.062	4.01	0.47	0.151	0.152
	0.083	3.59	0.72	0.115	0.154
	0.104	3.27	1.01	0.093	0.156
	0.125	3.00	1.33	0.078	0.158
Areia Fina	0.146	2.78	1.68	0.068	0.159
	0.166	2.59	2.06	0.060	0.163
	0.187	2.42	2.46	0.057	0.172
	0.208	2.26	2.88	0.053	0.180
	0.229	2.13	3.32	0.050	0.186
Areia Média	0.250	2.00	3.79	0.047	0.190
	0.275	1.86	4.37	0.044	0.195
	0.300	1.74	4.98	0.041	0.199
	0.325	1.62	5.62	0.039	0.204
	0.350	1.51	6.28	0.037	0.209
	0.375	1.42	6.96	0.035	0.215
	0.400	1.32	7.67	0.034	0.222
	0.425	1.23	8.40	0.033	0.231
	0.450	1.15	9.15	0.033	0.240
	0.475	1.07	9.92	0.032	0.249
Areia grossa	0.500	1.00	10.72	0.032	0.258
	0.600	0.74	14.09	0.031	0.299
	0.700	0.51	17.76	0.030	0.345
	0.800	0.32	21.69	0.033	0.428
Areia Muito Grossa	0.900	0.15	25.88	0.034	0.491
	1.000	0.00	30.32	0.034	0.558
	2.000	-1.00	85.75	0.042	1.367

Sedimentos	$\tau_{oc}$ (N/m <sup>2</sup> )	$\alpha$
Areia Muito Fina	0.155	± 10%
Areia Fina	0.172	± 15%
Areia Média	0.219	± 30%
Areia Grossa	0.391	± 40%
Areia Muito Grossa	0.962	± 50%

### 5.5.3 Fórmulas de Transporte de Sedimentos – Vazão Sólida Potencial

Neste capítulo são apresentadas as fórmulas de transporte de sedimentos disponíveis no modelo do SisBaHiA<sup>®</sup>. Com as fórmulas apresentadas se calcula a vazão sólida potencial, isto é, a vazão sólida máxima de um dado sedimento que o escoamento fluido teria capacidade de transportar, supondo disponibilidade ilimitada do sedimento.

O transporte de sedimentos pode ocorrer em suspensão e por arrasto junto ao leito. A natureza do transporte depende do tamanho, formato e peso específico das partículas, e das condições hidrodinâmicas locais como velocidade e turbulência. O transporte em suspensão pode incluir também o transporte lavado, definido como a porção transportada proveniente de trechos a montante, e não obtida no trecho em questão, van Rijn (1987).

Em condições naturais o limite entre transporte em suspensão e por arrasto, ou pelo leito, não é bem definido, porém é necessária uma definição de cada tipo para possibilitar a seleção de fórmula adequadamente:

- Admite-se que transporte em suspensão ocorre quando a velocidade de sedimentação do grão é compensada por uma sucessão de impulsos verticais provenientes de vórtices turbulentos, Bagnold (1954). Em condições extremas de velocidade, e. g., rios com grande declividade e altas velocidades, até mesmo areias grossas e pedregulhos podem ser carregados em suspensão.

- Admite-se que transporte por arrasto, ou transporte pelo leito, ocorre quando a velocidade de sedimentação do grão prevalece sobre a sucessão de impulsos verticais provenientes de vórtices turbulentos. Os movimentos dos grãos junto ao leito podem ser por rolamento, deslizamento e saltação.

Mais de uma dezena de fórmulas para cálculo de vazão sólida potencial está disponível na literatura especializada. No SisBaHiA<sup>®</sup> é dada a opção de escolher a fórmula de transporte de sedimentos a ser utilizada, dentre as disponíveis descritas a seguir<sup>4</sup>. Embora todas sejam fórmulas bem estabelecidas, com aplicações práticas em diversos outros modelos, a escolha demanda critério, já que foram definidas por métodos semi-empíricos, presumindo condições específicas. Como o resultado obtido por diferentes fórmulas pode variar significativamente, a escolha da fórmula pode ter grande importância no resultado da modelagem.

### 5.5.3.1 Inclusão de efeitos de ondas de curto período<sup>5</sup>

Para incluir efeitos de ondas de curto período no transporte sólido, o usuário terá que rodar o modelo hidrodinâmico acoplado a um modelo de geração de ondas por vento ou de propagação de ondas, v. Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup>.

De modo a incluir efeitos de onda para todas as fórmulas, estende-se a concepção da metodologia descrita em VAN RIJN, L. C., 2007a, *Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 133, No. 6, p. 649-667.

Deve ficar claro que apenas a fórmula de van Rijn (2007) é efetivamente calibrada para estimar o transporte sólido por ação conjunta de ondas e correntes. A extensão da concepção para as outras fórmulas é teórica. Porém, o desenvolvimento de extensão para cada fórmula foi feito de modo que os resultados obtidos mostrem semelhança de comportamento com a formulação de van Rijn (2007), ao se comparar valores calculados com e sem ação de ondas.

Analisando a formulação de van Rijn, bem como as demais fórmulas de transporte sólido, pode-se constatar que, geralmente, são considerados dois fatores básicos:

1. **Fator de mobilidade:** o “fator de mobilidade do grão” é geralmente representado por uma função envolvendo a diferença entre a tensão efetiva no fundo,  $\tau_e$ , exercida só pelas correntes ou por correntes e ondas de curto período, e a tensão crítica de mobilidade do grão,  $\tau_c$ , ou seja  $(\tau_e - \tau_c)$ . Se tal fator for positivo há mobilidade caso contrário não. No caso da formulação original de van Rijn tal fator é escrito em termos de velocidades ao invés de tensões, mas o racional é o mesmo. Note que a diferença  $(\tau_e - \tau_c)$ , ou função equivalente, aparece em quase todas as fórmulas de transporte sólido apresentadas a seguir, em umas de modo explícito e em outras de maneira alternativa.

<sup>4</sup> Outras fórmulas podem ser incluídas e solicitação de usuários são bem vindas. Para isso, mande um pedido para [ppcrossman@ufrj.br](mailto:ppcrossman@ufrj.br), com descrição da fórmula, referência bibliográfica e justificativa para inclusão.

<sup>5</sup> A inclusão de efeitos de ondas para todas as fórmulas é especulativa, apenas a fórmula de van Rijn 2007 foi efetivamente calibrada para tal. Portanto, usar as demais fórmulas como efeitos de ondas deve ser feito com os devidos cuidados.

2. **Fator de modulação:** o “modulador da magnitude do transporte” é geralmente associado com a tensão no fundo devido apenas às correntes, ou com a velocidade das correntes média na vertical. Neste fator fica implícita a concepção que as ondas ajudam a mobilizar sedimentos, porém devido ao seu caráter oscilatório de curto período, têm muito menos capacidade de transporte que as correntes.

### 5.5.3.2 Parâmetros auxiliares

A seguir são apresentadas as fórmulas disponíveis para acoplamento ao modelo hidrodinâmico do SisBaHiA<sup>®</sup>, com uma breve descrição de origem e validade. Nas diversas fórmulas aparecem diversos parâmetros, lista-se os mais comuns:

$q_s$  = Vazão sólida em m<sup>3</sup>/s/m.

$\tau_o$  = Tensão de arrasto no leito exercida pelas correntes.

$\tau_e$  = Tensão efetiva no leito exercida por ação de ondas e correntes.

$\tau_{cr}$  = Tensão crítica de mobilidade do grão.

$\rho_a$  = Massa específica da água.

$\rho_s$  = Massa específica do sedimento do leito.

$\gamma_a$  = Peso específico da água =  $g\rho_a$ .

$\gamma_s$  = Peso específico do sedimento =  $g\rho_s$ .

$d_{50}$  = Diâmetro 50% na curva granulométrica.

Parâmetros não listados são definidos na seção da fórmula. As diferentes fórmulas são apresentadas na forma adimensional para facilitar a visualização e comparação. As expressões abaixo são usadas para adimensionalizar a vazão sólida e a tensão de atrito no fundo, respectivamente. Note que o asterisco no canto direito superior da variável indica uma grandeza adimensional.

$$q_s^* = q_s / d \sqrt{g(S_s - 1)d} \quad (9)$$

$$\tau_o^* = \Psi = \tau_o / g(\rho_s - \rho_a)d \quad ; \text{ idem para } \tau_c^* \text{ ou } \tau_e^* \quad (10)$$

Acima,  $d$  é o diâmetro característico dos sedimentos, usualmente representado pelo diâmetro mediano  $d_{50}$ , e  $S_s = \rho_s/\rho_o$  é a densidade do sedimento em relação à água ambiente. A tensão de fundo,  $\tau_o$ , utilizada nas fórmulas vem da soma vetorial das componentes  $x$  e  $y$ ,  $v$ . Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup>. Seguem parâmetros adimensionais usados em algumas fórmulas:

- Fator de excesso de tensão no fundo (correntes):  $T^* = \frac{\tau_o - \tau_c}{\tau_c}$
- Fator de excesso de tensão no fundo (correntes e ondas):  $T_e^* = \frac{\tau_e - \tau_c}{\tau_c}$
- Diâmetro adimensional:  $d_* = d_{50} \left( \frac{g(S_s - 1)}{v^2} \right)^{1/3}$

Para inclusão de efeitos de ondas, considera-se uma velocidade efetiva adicionando na velocidade das correntes,  $U$ , efeitos de ondas – com período de pico  $T_p$  e altura significativa  $H_s$ . A velocidade efetiva é calculada por:

$$U_e = U + \gamma u_w \quad ; \quad u_w = \frac{\omega H_s}{2 \sinh(kH)} \quad ; \quad \omega = \frac{2\pi}{T_p} \quad (11)$$

Acima  $u_w$  é o módulo da máxima velocidade orbital no fundo gerada pelas ondas com período  $T_p$ , altura significativa  $H_s$  em local com coluna de água de altura  $H$ . O número de onda, ou frequência circular, é  $k = 2\pi/L$  e  $\omega$  é a frequência angular. Segundo van Rijn (2007) o parâmetro  $\gamma$  varia de 0,4 para ondas irregulares a 0,8 para ondas regulares.

Em termos de tensões, a tensão de atrito efetiva no fundo é dada por:

$$\tau_e = \rho_0 \frac{g}{C_h^2} (U + \gamma u_w)^2 \quad (12)$$

Onde:

- $U_e$  Velocidade efetiva proposta por Soulsby (1997), para estender o transporte por arraste devido apenas às correntes para áreas costeiras para correntes + ondas.
- $U$  Velocidade da corrente média na coluna d'água.
- $\gamma$  Parâmetro de calibração determinado através de modelo numérico detalhado na escala de comprimento de onda, van Rijn (2007). Valores recomendados entre  $\gamma = 0.4$  para ondas irregulares e  $\gamma = 0.8$  para ondas regulares.
- $u_{cr}$  Velocidade média na coluna d'água crítica para mobilidade do grão.
- $u_{cr,c}$  Velocidade crítica para a corrente determinada pelo diagrama de Shields.
- $u_{cr,w}$  Velocidade crítica para as ondas determinada por Komar & Miller (1975).
- $H$  Altura da coluna de água.
- $T_p$  Período de pico das ondas.
- $H_s$  Altura significativa das ondas.

Vale lembrar que todas as fórmulas a seguir são para *vazão sólida potencial*, em função da capacidade de transporte do escoamento. Isto é, presume-se que a disponibilidade de sedimentos seja ilimitada. Na seção 5.5.4.2, mostra-se como se calcula a vazão sólida efetiva, levando-se em conta o estoque de sedimentos no fundo.

Todas as fórmulas adotadas no SisBaHiA<sup>®</sup> são bem avaliadas em comparações com dados de campo e ensaios de laboratório<sup>6</sup>. Em especial, destacam-se as fórmulas de Engelund & Hansen, Ackers & White e van Rijn.

### 5.5.3.3 Fórmulas de transporte por arraste

As fórmulas são apresentadas em ordem cronológica de publicação.

**Meyer-Peter e Muller (1948):** A fórmula de Meyer-Peter e Müller é muito utilizada na prática da engenharia. Quantifica o transporte por arraste e deve ser utilizada apenas quando o transporte em suspensão for pouco relevante. Foi desenvolvida a partir de experimentos em canais objetivando estudar o fenômeno de transporte em rios na região alpina Suíça. Veja “Meyer-

<sup>6</sup> Veja em *Journal of the American Water Resources Association* – (Vol. 46, No. 6, 12/2010) os trabalhos de Saeed Khorram S. & Mustafa E. comparando dezenas de fórmulas de transporte sólido: “A SENSITIVITY ANALYSIS OF TOTAL-LOAD PREDICTION PARAMETERS IN STANDARD SEDIMENT TRANSPORT EQUATIONS” e “MOST INFLUENTIAL PARAMETERS FOR THE BED-LOAD SEDIMENT FLUX EQUATIONS USED IN ALLUVIAL RIVERS”.

Peter, E. and R. Muller, 1948 - *Formula for Bed-Load Transport*. Proceeding of International Association for Hydraulic Research, 2nd Meeting, Stockholm, June 7-9, 1948”.

No seu desenvolvimento, foram adotados canais de laboratório com larguras entre 15 e 200 cm, e declividades entre 0,0004 e 0,02, enquanto as colunas de água variaram de 1,0 a 120 cm. Foram testados diferentes tipos de sedimentos, com o intuito de abranger diversos pesos específicos e granulometrias, que variaram de 0.4 mm a 30mm, cf. Vanoni (1975).

$$q_s^* = 8(\tau_o^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad (13)$$

Uma reanálise dos dados usados por Meyer Peter e Muller foi apresentada por WONG, M., e PARKER, G. (2006) – *Re-analysis and correction of bedload relation of Meyer-Peter and Muller using their own database*. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE, 132(11), pp. 1159-1168. Os autores concluem que na expressão original de 1948 havia uma correção para rugosidade de fundo desnecessária, e propõem alterações que resultam em:

$$q_s^* = 4,93(\tau_o^* - \tau_c^*)^{1,6} \quad (14)$$

$$q_s^* = 3,97(\tau_o^* - \tau_c^*)^{1,5} \quad (15)$$

No SisBaHiA<sup>®</sup>, a expressão original de 1948 é presumida com coeficiente 8 e expoente 3/2, porém, o usuário pode calibrar a fórmula para melhor ajuste a dados de campo, alterando os valores. Pode-se assim, entre outras possibilidades, utilizar as fórmulas propostas por Wong e Parker (2006).

**Yalin (1963/1977):** Fórmula usualmente empregada para transporte por arraste, mas também utilizada para transporte total, desenvolvida com métodos probabilísticos, conforme “YALIN, M.S., 1977. *Mechanics of Sediment Transport* (Second Edition). Pergamon Press, Oxford, United Kingdom”. Funciona melhor com areias médias a grossas, na faixa entre 0.3 e 30mm.

$$q_s^* = 0.635\sqrt{\tau_o^*} \left[ T^* - \frac{\ln(1 + aT^*)}{a} \right] ; \quad a = 2.45\sqrt{\tau_c^*}/S_s^{0.4} \quad (16)$$

No SisBaHiA<sup>®</sup>, a fórmula de Yalin adota os coeficientes 2.45 e 0.635 da equação (16), porém, o usuário pode calibrar a fórmula, para melhor ajuste a dados de campo, alterando os valores.

**Van Rijn (1984):** A formulação de van Rijn é usada para o cálculo de transporte por arrasto ou pelo leito. Desenvolvida originalmente para transporte em rios, tem sido aplicada também em corpos de água costeiros como estuários e canais de maré. É recomendável para sedimentos com granulometria na faixa de areias finas a muito grossas, indo de 0.2 a 2.0 mm. A fórmula original, considerando apenas ação de correntes é dada por:

$$q_s^* = \frac{0,053}{d_*^{0,3}} (T^*)^{2,1} \quad \text{ou} \quad q_s^* = \frac{0,053}{d_*^{0,3}} \left( \frac{\tau_o - \tau_c}{\tau_c} \right)^{2,1} \quad (17)$$

Em diversos experimentos realizados por van Rijn (1984), 77% resultaram em valores calculados com desvio entre 0,5 e 2,0 em relação aos valores experimentais. No caso, o desvio é definido com a razão entre valores medidos e valores obtidos pela fórmula. Veja “van Rijn, L.C., 1984. *Sediment Transport. Part I: Bed Load Transport*. Journal of Hydraulic Engineering 110(10): 1431-1456; e “van Rijn, L.C., 1993. *Principles of Sediment Transport in Rivers*,

*Estuaries and Coastal Seas*, Amsterdam. Aqua Publications, The Netherlands.”

No SisBaHiA<sup>®</sup>, a fórmula de van Rijn presume o coeficiente 0,053 e o expoente 2,1, dados na equação (17), porém, o usuário pode calibrar a fórmula, para melhor ajuste a dados de campo, alterando os valores presumidos.

**Madsen (1991):** fórmula baseada em ajuste de curvas experimentais para transporte por arraste, conforme “Madsen, O.S., 1991. *Mechanics of Cohesionless Sediment Transport in Coastal Waters*. Proceedings of Coastal Sediments 91: 15-27”. É usada em áreas costeiras com areias finas a grossas, na faixa de 0.08 a 6.0 mm:

$$q_s^* = a \underbrace{\left( \sqrt{\tau_o^*} - b \sqrt{\tau_c^*} \right)}_{\text{fator de modulação}} \underbrace{\left( \tau_o^* - \tau_c^* \right)}_{\text{fator de mobilidade}} \quad (18)$$

No SisBaHiA<sup>®</sup>, a fórmula de Madsen adota coeficientes  $a = 10$  e  $b = 0.7$  na equação (18), porém, o usuário pode calibrar a fórmula, para melhor ajuste a dados de campo, alterando os valores.

**Nielsen (1992):** Nielsen introduziu ajustes com base em dados experimentais na fórmula original de Meyer-Peter Muller. Veja “Nielsen, P., 1992. *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 4, World Scientific Publishing, Singapore”. Tal formulação que tem sido aplicada com sucesso em áreas costeiras com sedimentos arenosos, na faixa de 0.6 a 30 mm.

$$q_s^* = 12 \sqrt{\tau_o^*} \left[ \tau_o^* - \tau_c^* \right] \quad (19)$$

Novamente, destaca-se que a seleção de uma dada fórmula de transporte sólido potencial deve ser feita levando em conta o caso a ser estudado e as condições de validade da fórmula. O resultado obtido com a ativação de fundo móvel, isto é, modelo hidrodinâmico com atualização de batimetria, ou modelo morfodinâmico, descrito na próxima seção, está fortemente relacionado à fórmula utilizada. Portanto, a escolha da fórmula deve levar em conta as condições para as quais elas foram desenvolvidas, tais como granulometria e condições do escoamento.

No SisBaHiA<sup>®</sup>, a fórmula de Nielsen adota o coeficiente 12 e o expoente 1/2, dados na equação (19), porém, o usuário pode calibrar a fórmula, para melhor ajuste a dados de campo, alterando os valores.

#### 5.5.3.4 Fórmulas de transporte total – arraste e suspensão

As fórmulas são apresentadas em ordem cronológica. Note que a fórmula de Yalin incluída na seção anterior também é utilizada para transporte total.

**Ackers & White (1973-1990):** Fórmula para transporte total, baseada em princípio de balanço de energia, publicada em “ACKERS, P. & WHITE, W.R. 1973 - Sediment Transport: New Approach and Analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE 99(11) pp. 2041-2060”. O SisBaHiA<sup>®</sup> adotada a versão com coeficientes atualizados em 1990, para aprimorar estimativas para sedimentos muito finos ou muito grossos, conforme proposto em HYDRAULIC RESEARCH (1990) - *Sediment Transport: the Ackers and White Theory Revised, Report*

SR237 – Wallingford, England. É aplicável para sedimentos arenosos de muito finos a grossos, na faixa de 0.04mm a 4,0mm.

$$q_s^* = \frac{S_s U}{\sqrt{g(S_s - 1)d_{50}}} \left(\frac{U}{u_*}\right)^n C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1\right)^m \quad (20)$$

Onde o fator de mobilidade do grão  $F_{gr}$  e os parâmetros  $A$ ,  $C$ ,  $m$  e  $n$  são dados pelas expressões abaixo, sendo  $H$  a coluna de água e  $U$  a velocidade 2DH.

$$F_{gr} = \max \left[ u_*^n / \sqrt{gd_{50}(S_s - 1)} \left( U / \left[ \sqrt{32} \log(10H/d_{50}) \right] \right)^{1-n}; A \right]$$

$$D_* = \min(d_*; 60) \begin{cases} A = \max(0.17; 0.23D_*^{-0.5} + 0.14) \\ C = 10^{(-3.46 + 2.79 \log D_* - 0.98(\log D_*)^2)} \\ m = \max(1.78; 6.83 / D_* + 1.67) \\ n = \max(0.0; \min(1.0; 1 - 0.56 \log D_*)) \end{cases}$$

**Engelund e Hansen (1967):** A fórmula de Engelund-Hansen para transporte total, arraste e suspensão, foi desenvolvida com base em dados experimentais, cf. Guy et al. (1966), em canal com 2,4 m de largura e 45,7 m de comprimento. Foram realizados testes com quatro diferentes tipos de sedimentos arenosos com diâmetros médios de 0,19 mm, 0,27 mm, 0,45 mm e 0,93 mm. O desvio padrão para a classe de sedimentos mais finos foi de 1,3 e para os demais foi 1,6. Trata-se de uma das fórmulas mais utilizadas para corpos de água costeiros como estuários e canais de maré. Veja “Engelund, F. and E. Hansen, 1967. *A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams*. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark”. Tal fórmula calcula o transporte total, sendo ideal para sedimentos na faixa de 0,08mm a 45,0mm:

$$q_s^* = \begin{cases} \frac{0,05}{c_f} (\tau_o^*)^{5/2} & \text{se } \tau_o^* > \tau_c^* \\ 0 & \text{se } \tau_o^* < \tau_c^* \end{cases} \quad (21)$$

Onde  $c_f$  é o coeficiente de atrito no fundo definido no modelo hidrodinâmico. Conforme exposto na Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup>, pode-se obter  $c_f$  através das seguintes expressões:

$$c_f = \frac{g}{C_h^2} = g / \left[ 18 \log_{10} \left( \frac{6H}{\varepsilon} \right) \right]^2 \quad \text{ou} \quad c_f = \tau_o / (\rho U_e^2) \quad (22)$$

No SisBaHiA<sup>®</sup>, a fórmula de Engelund e Hansen presume o coeficiente 0,05 e o expoente 5/2 como na equação (21), porém, o usuário pode calibrar a fórmula para melhor ajuste a valores medidos, alterando os valores presumidos.

**van Rijn (2007):** A formulação de van Rijn usada para o cálculo de transporte total resulta da soma do transporte de fundo por arraste, *bed load*,  $q_{sb}$ , com o transporte em suspensão,  $q_{ss}$ .

A fórmula para **transporte por arraste**,  $q_{sb}$ , é apresentada em VAN RIJN, L. C., 2007a, *Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness*,

and Bed-Load Transport, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 133, No. 6, p. 649-667:

$$q_{sb} = \alpha \rho_s UH (d_{50}/H)^{1.2} M_e^n \quad (23)$$

Onde o fator de mobilidade do grão,  $M_e$ , é definido como:

$$M_e = (u_e - u_{cr}) / \sqrt{g(s-1)d_{50}} \quad (24)$$

A velocidade efetiva, considerando efeitos de ondas – com período de pico  $T_p$  e altura significativa  $H_s$  – e de correntes, é calculada por:

$$u_e = U + \gamma u_w ; u_w = \frac{\omega H_s}{2 \sinh(kH)} ; \omega = \frac{2\pi}{T_p} \quad (25)$$

Acima  $u_w$  é o módulo da velocidade orbital no fundo gerada pelas ondas.

A velocidade crítica de mobilidade de sedimentos é dada por:

$$u_{cr} = \theta u_{cr,c} + (1 - \theta) u_{cr,w} ; \theta = U / (U + \hat{u}_\delta) \quad (26)$$

Acima, as velocidades críticas  $u_{cr,c}$  e  $u_{cr,w}$  devido às ações de correntes e de ondas são definidas por:

$$\begin{aligned} u_{cr,c} &= 0.19 d_{50}^{0.1} \log(12H/3d_{90}) \text{ para } 0.00005 < d_{50} < 0.00050\text{m} \\ u_{cr,c} &= 8.50 d_{50}^{0.6} \log(12H/3d_{90}) \text{ para } 0.00050 < d_{50} < 0.00200\text{m} \\ u_{cr,w} &= 0.24 [(s-1)g]^{0.66} d_{50}^{0.33} T_p^{0.33} \text{ para } 0.00005 < d_{50} < 0.00050\text{m} \\ u_{cr,w} &= 0.95 [(s-1)g]^{0.57} d_{50}^{0.43} T_p^{0.14} \text{ para } 0.00050 < d_{50} < 0.00200\text{m} \end{aligned}$$

Resumo de termos e parâmetros:

- $q_b$  Taxa de transporte por arraste (kg/s/m).
- $M_e$  Parâmetro de mobilidade.
- $u_e$  Velocidade efetiva proposta por Soulsby (1997), para estender o transporte por arraste devido apenas às correntes para áreas costeiras (correntes + ondas).
- $U$  Velocidade da corrente média na coluna d'água.
- $\gamma$  Parâmetro de calibração determinado através de modelo numérico detalhado na escala de comprimento de onda, van Rijn (2007). Valores recomendados:  $\gamma = 0.4$  para ondas irregulares e  $\gamma = 0.8$  para ondas regulares.
- $u_{cr}$  Velocidade crítica média na coluna d'água.
- $u_{cr,c}$  Velocidade crítica para as correntes determinada pelo diagrama de Shields.
- $u_{cr,w}$  Velocidade crítica para as ondas determinada por Komar & Miller (1975).
- $\alpha$  Coeficiente de calibração: valor recomendado = 0.015
- $\eta$  Expoente de calibração: valor recomendado = 1.5
- $H$  Altura da coluna de água.
- $T_p$  Período de pico das ondas.
- $H_s$  Altura significativa das ondas.

Na forma adimensional, a expressão pode ser escrita em termos de velocidades como:

$$q_{sb}^* = \frac{0.015}{[g(s-1)d_{50}]^{1.25}} \left(\frac{d_{50}}{H}\right)^{0.2} U(U_e - U_{cr})^{1.5} \quad (27)$$

Usando as tensões de atrito efetiva e crítica dadas por:

$$\tau_e = \rho_0 \frac{g}{C_h^2} (U + \gamma u_w)^2 \quad ; \quad \tau_{cr} = \rho_0 \frac{g}{C_h^2} (\theta u_{cr,c} + (1-\theta)u_{cr,w})^2 \quad (28)$$

Pode-se reescrever a forma adimensional da taxa de transporte de sedimentos por arraste como:

$$q_{sb}^* = \frac{0.015}{c_f^{1.25}} \left(\frac{d_{50}}{H}\right)^{0.2} \underbrace{\sqrt{\tau^*}}_{\text{fator de modulação}} \underbrace{\left(\sqrt{\tau_e^*} - \sqrt{\tau_{cr}^*}\right)^{1.5}}_{\text{fator de mobilidade}} \quad ; \quad c_f = \frac{g}{C_h^2} \quad (29)$$

A fórmula para transporte em suspensão,  $q_{ss}$ , é apresentada em VAN RIJN, L. C., 2007b, *Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II: Suspended Transport*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 133, No. 6, p. 668-689. Na forma adimensional, em termos de velocidades, pode ser escrita como:

$$q_{ss}^* = \frac{0.012}{[g(s-1)d_{50}]^{1.7}} D_*^{-0.6} U(U_e - U_{cr})^{2.4} \quad (30)$$

Usando as tensões de atrito expressas em (28), pode-se reescrever a forma adimensional da taxa de transporte de sedimentos em suspensão como:

$$q_{ss}^* = \frac{0.012}{c_f^{1.7}} D_*^{-0.6} \underbrace{\sqrt{\tau^*}}_{\text{fator de modulação}} \underbrace{\left(\sqrt{\tau_e^*} - \sqrt{\tau_{cr}^*}\right)^{2.4}}_{\text{fator de mobilidade}} \quad ; \quad c_f = \frac{g}{C_h^2} \quad (31)$$

A expressão de van Rijn (2007) para transporte total resulta:

$$q_s^* = \underbrace{\frac{0.015}{c_f^{1.25}} \left(\frac{d_{50}}{H}\right)^{0.2} \sqrt{\tau^*} \left(\sqrt{\tau_e^*} - \sqrt{\tau_{cr}^*}\right)^{1.5}}_{q_{sb}^*} + \underbrace{\frac{0.012}{c_f^{1.7}} D_*^{-0.6} \sqrt{\tau^*} \left(\sqrt{\tau_e^*} - \sqrt{\tau_{cr}^*}\right)^{2.4}}_{q_{ss}^*} \quad (32)$$

No SisBaHiA<sup>®</sup>, a fórmula de van Rijn (2007) presume os coeficiente 0.015 e 0.012, além dos expoentes 1.5 e 2.4, como na equação (32). Porém, o usuário pode calibrar a fórmula para melhor ajuste a valores medidos, alterando os valores presumidos.

#### 5.5.4 Atualização da batimetria via modelo morfodinâmico com curva granulométrica

Em um dado local a altura da camada erodível de sedimentos no fundo por metro quadrado é dada por  $S_E(x,y,t)$ . Em cada instante, a altura da camada erodível corresponde à diferença entre a cota do fundo e a cota da camada não erodível mais abaixo. Um valor inicial  $S_{E0}$  tem que ser prescrito para todos os pontos do modelo.

Em geral, valores de  $S_{E0}$  são desconhecidos. Em locais de fundo não erodível, por exemplo, leito rochoso ou de concreto como em rampas a jusante de barragens, prescrever valor nulo é usual. Em locais com fundos de sedimentos, se não houver dados, o usuário terá que prescrever

valores de  $S_{E0}$  inferidos ou convenientes, como condição inicial. Valores de  $S_{E0}$  podem ser estimados considerando valores de velocidades de correntes obtidas de modelagens prévias feitas com fundo fixo. Em locais com velocidades mais intensas é provável que  $S_{E0}$  seja menor, pois a capacidade erosiva seria maior.

Na entrada de dados iniciais para a modelagem de um dado domínio, deve-se definir, *a priori*, o total de classes de sedimentos,  $M$ , a ser considerada no modelo. Na criação de uma dada classe  $m$  de sedimentos, o SisBaHiA<sup>®</sup> atribui um número interno e um nome automático sequencial, e.g., Sed-1, Sed-2...Sed- $m$ ...Sed- $M$ . O usuário pode alterar os nomes da forma que achar melhor, por exemplo: *Areia muito fina, Areia fina, Areia média...Areia grossa*. Admite-se um máximo de  $M = 10$  classes.

O máximo número de classes de sedimentos  $M = 10$  é mais que suficiente, considerando que a prescrição de valores adequados do parâmetro  $\alpha$ , i.e., o percentual da faixa de tolerância para tensão crítica de mobilidade, produz um efeito de continuidade entre as diferentes faixas. Tal parâmetro está discutido na seção 5.5.2. Usualmente  $M = 5$  já é suficiente.

Todas as classes serão automaticamente colocadas em todos os pontos da malha do domínio, devendo o usuário prover os seguintes valores pertinentes a cada classe:

- $d_{50}$  = Diâmetro mediano em [mm] – usual entre 0.05 e 5.0.
- $\rho$  = Massa específica em [kg/m<sup>3</sup>] – usual entre 1400 e 2700.
- $p$  = Porosidade – usual entre 0.2 e 0.5.
- $\tau_c$  = Tensão crítica de mobilidade em [N/m<sup>2</sup>].
- $\alpha$  = Percentual da faixa de tolerância para  $\tau_c$

**Entrada Inicial de Curvas Granulométricas:** No instante inicial, em cada ponto da malha, a curva granulométrica local é dada para o modelo através da prescrição dos percentuais de cada uma das  $M$  classes de sedimentos no ponto. Portanto, uma curva granulométrica será representada por  $M$  classes, tendo cada classe uma fração equivalente  $f_m$ , de modo que:

$$\sum_{m=1}^M f_m(x, y, t) = 1.0 \quad (33)$$

Se em um ponto a altura erodível  $S_{E0}$  for nula, pode-se adotar  $f_m = 1.0/M$  para todas as classes. Caso contrário, o usuário definirá em cada ponto<sup>7</sup> o valor de  $f_m$ , i.e., fração de sedimento com diâmetro mediano  $d_{50m}$ . Todos os pontos sempre têm registro das  $M$  classes de sedimentos do domínio, mesmo que o valor de  $f_m$  seja ‘zero’ para uma dada classe no ponto.

No instante inicial,  $t_0$ , o modelo calcula o estoque inicial de sedimentos de cada classe  $S_{E0m}$ , em cada ponto:

$$S_{E0m}(x, y) = f_m S_{E0}(x, y) \quad (34)$$

Note que os valores de  $S_{E0m}$  também correspondem às alturas erodíveis limite de cada classe de sedimentos, que somadas correspondem ao limite total em cada local:

<sup>7</sup> Na interface do modelo há ferramentas que facilitam prescrever tais dados por regiões do domínio.

$$\sum_{m=1}^M S_{E0m}(x, y) = S_{E0}(x, y) \quad (35)$$

Ao longo do tempo, o estoque de sedimentos, ou altura erodível remanescente de cada classe de sedimentos será dada por:

$$S_{Em}(x, y, t) = \max[S_{E0m}(x, y) + DS_{Em}(x, y, t); 0] \quad (36)$$

A variação acumulada da altura erodível de cada sedimento,  $DS_{Em}$ , define a ordem de erosão, possibilitando o processo de encouraçamento. Note que  $DS_{Em}$  é sempre medido em relação ao topo original do terreno  $S_{E0}$ . A classe de sedimentos com maior  $S_{E0} + DS_{Em}$  indicará qual classe de sedimentos estará por cima, e dependendo da espessura, formando uma couraça clássica no caso de ser também o sedimento com maior  $d_{50}$ . Para o cálculo, os valores de  $DS_{Em}$  devem ser ordenados do maior para o menor, sendo o maior designada por  $DS_{E1}$ , em seguida  $DS_{E2}$ , etc. A classe  $m$  a ser computada primeiro será a do sedimento com maior altura  $DS_{E1}$ , e terá uma camada superficial com espessura dada pela diferença  $(S_{E0} + DS_{E1}) - (S_{E0} + DS_{E2}) = DS_{E1} - DS_{E2}$ .

Em um dado instante, o procedimento para calcular a variação do estoque, ou altura erodível, de cada classe de sedimento  $S_{Em}$  das diversas classes tem que iniciar pela classe de sedimentos com maior valor de  $DS_{Em}$ . E, continuar para as demais classes de sedimentos seguindo a ordem decrescente de valores de  $DS_{Em}$ .

A equação de balanço de massa para cada classe de sedimento permite calcular a variação temporal de  $S_{Em}$ , e pode ser escrita como:

$$(1 - p_m) \frac{\partial S_{Em}}{\partial t} + \left( \frac{\partial q_{smx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{smy}}{\partial y} \right) = 0 \therefore \frac{\partial S_{Em}}{\partial t} = - \frac{1}{1 - p_m} \left( \frac{\partial q_{smx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{smy}}{\partial y} \right) \quad (37)$$

**Observação:** na formulação implementada no SisBaHiA<sup>®</sup> com apenas um tipo de sedimento, a equação é escrita em termos da cota negativa do fundo  $h(x, y, t) = -z_{\text{fundo}}$ . No caso, a equação correspondente fica com sinal trocado:

$$(1 - p) \frac{\partial h}{\partial t} - \left( \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) = 0 \therefore \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1 - p} \left( \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right)$$

Onde a vazão sólida efetiva  $q_{sm}$  está decomposta nas componentes  $x$  e  $y$ . O cálculo de  $q_{sm}$  leva em conta a fração disponível de sedimento, conforme apresentado na seção 5.5.4.2. Em termos discretos, em um passo de tempo  $\Delta t$ , a expressão acima torna-se:

$$\Delta S_{Em}^{n+1} = -\Delta t \frac{1}{1 - p_m} \left( \frac{\partial q_{smx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{smy}}{\partial y} \right)^{n+1/2} \quad (38)$$

**Observação:** na formulação implementada no SisBaHiA<sup>®</sup> com apenas um tipo de sedimento, a equação é escrita em termos da cota negativa do fundo  $h(x, y, t) = -z_{\text{fundo}}$ . No caso, a equação correspondente fica com sinal trocado:

$$\Delta h^{n+1} = \Delta t \frac{1}{1 - p} \left( \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right)^{n+1/2}$$

Onde  $n$  indica o tempo discretizado escrito como  $t = n\Delta t$ .

Uma vez computado o valor de  $\Delta S_{Em}^{n+1}$  para todas as classes, atualiza-se as seguintes variáveis, seguindo a ordem:

1. Variação cumulativa da altura de cada classe de sedimentos,  $DS_{Em}$ :

$$DS_{Em}^{n+1} = \max(DS_{Em}^n + \Delta S_{Em}^{n+1}; -S_{E0m}) \quad (39)$$

2. Estoque de cada classe sedimento, ou altura erodível remanescente,  $S_{Em}$ :

$$S_{Em}^{n+1} = S_{E0m} + DS_{Em}^{n+1} \quad (40)$$

3. Fração disponível de cada classe de sedimento,  $e_m$ :

$$S_T = \sum_{m=1}^M S_{Em}^{n+1} \quad (\text{Estoque total remanescente})$$

$$\left. \begin{array}{l} S_T > 0 \rightarrow e_m^* = S_{Em}^{n+1} / S_T \rightarrow e_m^{n+1} = e_m^* / \sum_{m=1}^M e_m^* \\ S_T = 0 \rightarrow e_m^{n+1} = e_m^n \end{array} \right\} \quad (41)$$

No instante inicial, a fração disponível de cada classe de sedimento será  $e_m = f_m$ .

4. A batimetria, definida pela posição da superfície do fundo  $S_F \equiv \zeta + h(x, y, t) = 0$ , é atualizada pela equação abaixo, onde  $h_0$  é o valor inicial de  $h$  na malha, e  $F_{am}$  é o fator de aceleração morfológica:

$$h^{n+1} = h_0 + F_{am} \delta h^{n+1} \rightarrow \delta h^{n+1} = -\sum_{m=1}^m DS_{Em} \quad (42)$$

Lembre-se que a cota do fundo é dada por  $z = -h(x, y, t)$ , por isso o sinal (-) na frente do somatório é necessário, pois  $DS_{Em} > 0$  significa assoreamento e  $DS_{Em} < 0$  erosão.

#### 5.5.4.1 Sobre uso do fator de Aceleração Morfológica

O uso do  $F_{am} > 1.0$  permite se estimar a evolução morfológica do fundo de modo acelerado, porém há que saber usar.

Embora os resultados finais de evolução batimétrica através de modelagem de  $N$  ciclos hidro-sedimentológicos, com  $F_{am} = 1.0$ , sejam similares aos resultados de modelagem de 1 ciclo com  $F_{am} = N$ , os resultados intermediários não são comparáveis.

O problema está em variações cíclicas. Se as condições hidro-sedimentológicas impostas ao modelo forem constantes os resultados intermediários também seriam comparáveis. Porém, resultados intermediários não são comparáveis quando há ciclos, como é usual em estudos de corpos de água naturais, que estão sujeitos a grande variabilidade hidro-sedimentológica com épocas de cheia e estiagem.

Nas modelagens apresentadas neste **R14** não se aplicou efeitos de aceleração morfológica, portanto usou-se  $F_{am} = 1.0$ .

### 5.5.4.2 Cálculo da vazão sólida efetiva

Na equação (38), a vazão sólida efetiva  $q_s$ , decomposta nas componentes  $x$  e  $y$ , é computada como:

$$q_{sm} = \min(q_{pm}, q_{dm}) \quad (43)$$

Onde  $q_{pm}$  é a *vazão sólida potencial* para o sedimento caracterizado por  $d_{50m}$  calculada por uma das fórmulas apresentadas na seção anterior, e  $q_{dm}$  é a *vazão sólida disponível* no fundo em função do estoque de sedimentos da classe  $m$  no local. Em um dado ponto, só precisa calcular  $q_{dm}$ , se  $q_{pm} > 0$  e  $e_m > 0$ . Caso contrário,  $q_{sm} = 0$ .

A determinação de  $q_{dm}$  é uma questão chave para os efeitos de encouraçamento. No instante inicial, ou se todos os valores de  $DS_{Em}$  forem iguais calcula-se:

$$\text{Neste caso, } q_{sm} = \min(e_m q_{pm}, q_{dm})$$

- Vazão sólida disponível<sup>8</sup> do sedimento  $m$ :

$$|?) \left\{ \begin{array}{l} DS_{Em} \geq 100d_{50m} \rightarrow q_{dm} = e_m q_{pm} \\ DS_{Em} < 100d_{50m} \rightarrow q_{dm} = e_m q_{pm} (DS_{Em}/100d_{50m}) \end{array} \right. \quad (44)$$

Na expressão acima e nas similares para as demais camadas,  $q_{dm}$  será igual a  $q_{pm}$  desde que haja no fundo um estoque mínimo com espessura de  $100d_{50m}$ . Por exemplo, para areia com diâmetro de 0.25 mm, equivale a um estoque com espessura mínima de 2.5 cm. Na medida em que o estoque mínimo é erodido, a *vazão disponível* diminui linearmente com o estoque existente. Em locais com fundo inicial sem camada erodível, o estoque inicial seria nulo e consequentemente  $q_{dm} = 0$ . Em tais locais,  $q_{dm}$  aumentaria linearmente com a espessura da camada de sedimentos que estiver se formando pelo transporte sobre o fundo não erodível.

Quando houver valores de  $DS_{Em}$  diferenciados a *vazão disponível* será computada pelo seguinte processo, seguindo em ordem decrescente de  $DS_{Em}$ :

- ❖ Verificação do estoque disponível na primeira camada de espessura  $DS_{E1} - DS_{E2}$ . Supondo que haja  $K1$  classes de sedimentos com  $DS_{E1}$ , deve-se computar para cada uma das classes de sedimentos  $m$  de 1 a  $K1$  da camada:

- Vazão sólida potencial do sedimento  $m$  na primeira camada:

$$q_{p12m} = q_{pm} e_m \left/ \sum_{j=1}^{K1} e_j \right. \quad (45)$$

- Vazão sólida disponível<sup>9</sup> do sedimento  $m$  na primeira camada:

<sup>8</sup> Originalmente a estimativa da *vazão sólida disponível* era feita pela expressão  $q_{dm} = (1 - p_m) S_{Em} / \Delta t$ , porém esta formulação fica dependente do passo de tempo do modelo de sedimentos, e pode trazer inconsistências se  $\Delta t$  for grande.

<sup>9</sup> Originalmente calculado como  $q_{d12m} = \frac{DS_{E1} - DS_{E2}}{\Delta t} (1 - p_m) e_m \left/ \sum_{j=1}^{K1} e_j \right.$ , porém esta formulação fica dependente do passo de tempo do modelo de sedimentos, e pode trazer inconsistências se  $\Delta t$  for grande.

$$DS_{12} = (DS_{E1} - DS_{E2})(1 - p_m) e_m / \sum_{j=1}^{K1} e_j \quad \therefore \quad (46)$$

$$|?) \left\{ \begin{array}{l} DS_{12} \geq 100d_{50m} \rightarrow q_{d12m} = q_{p12m} \\ DS_{12} < 100d_{50m} \rightarrow q_{d12m} = q_{p12m} (DS_{12}/100d_{50m}) \end{array} \right.$$

- Se no ponto de cálculo  $q_{d12m} \geq q_{p12m}$  para os  $K1$  sedimento da primeira camada, só estes estarão disponíveis para transporte, caracterizando efeito de encouraçamento. Neste caso, e de modo similar nos demais explicados a seguir, o efeito de encouraçamento só deve ser considerado efetivo se houver uma mínima espessura de sedimentos de um tipo cobrindo os demais, caso contrário deve-se incluir os tipos de sedimentos da camada abaixo. Note que  $K1$  é o limite do contador genérico  $j$  sem valor definido, provavelmente, quase sempre será 1.

**Sobre mecanismos de encouraçamento:** O algoritmo considera que pode haver encouraçamento se ocorrer  $(DS_{E1} - DS_{E2})e_m > \text{máx}[1.0\text{mm}, 4 \times d_{50m}]$ , neste caso, os sedimentos da camada inferior ficam bloqueados e cessa o transporte. O valor 1.0 mm acima não impede, mas dificulta eventos de encouraçamento por sedimentos muito finos, que, em geral, não são comuns. A explicação acima usa a espessura entre as camadas 1 e 2 como exemplo, porém o algoritmo vale para qualquer camada. No modelo, a opção de considerar ou não efeitos de encouraçamento é opcional.

Notas para todos os casos, em um dado ponto:

- As contas que  $q_d$  e  $q_p$  só precisam ser feitas para sedimentos com  $e_m > 0$ .
- Se o total de classes de sedimentos na camada for igual a  $M$ , o somatório em  $j$  nos denominadores é igual a 1.0, e não precisa ser calculado.

- ❖ Caso contrário, se  $q_{d12m} < q_{p12m}$  para algum dos  $K1$  sedimentos da primeira camada, há que incluir a camada seguinte, que contém os tipos de sedimentos da classe com  $S_{E1}$  e os da classe com  $S_{E2}$ . Supondo que haja  $K2$  classes de sedimentos na segunda camada de espessura  $S_{E2} - S_{E3}$ , deve-se computar para cada uma das classes de sedimentos  $m$  de 1 a  $K2$  da camada:

- Vazão sólida potencial do sedimento  $m$  na segunda camada:

$$q_{p23m} = q_{pm} e_m / \sum_{j=1}^{K2} e_j \quad (47)$$

- Vazão sólida disponível do sedimento  $m$  na segunda camada:

$$DS_{23} = (DS_{E2} - DS_{E3})(1 - p_m) e_m / \sum_{j=1}^{K2} e_j \quad \therefore \quad (48)$$

$$|?) \left\{ \begin{array}{l} DS_{23} \geq 100d_{50m} \rightarrow q_{d23m} = q_{p23m} \\ DS_{23} < 100d_{50m} \rightarrow q_{d23m} = q_{p23m} (DS_{23}/100d_{50m}) \end{array} \right.$$

- Se no ponto de cálculo  $q_{d23m} \geq q_{p23m} - q_{d12m}$  para os  $K2$  sedimento da segunda camada, só estes estarão disponíveis para transporte, e as camadas seguintes estão fora do processo.

- ❖ Caso contrário, repete-se o passo anterior incluindo mais uma camada sucessivamente até, se necessário, chegar à penúltima camada ( $M - 1$ ), com  $K(M - 1)$  classes de sedimentos:

- Vazão sólida potencial do sedimento  $m$  na penúltima camada :

$$q_{p(M-1)Mm} = q_{pm} e_m / \sum_{j=1}^{KM-1} e_j \quad (49)$$

- Vazão sólida disponível do sedimento  $m$  na penúltima camada:

$$DS_{(M-1)M} = (DS_{E(M-1)} - DS_{EM})(1 - p_m) e_m / \sum_{j=1}^{KM-1} e_j \quad (50)$$

$$|?) \left\{ \begin{array}{l} DS_{(M-1)M} \geq 100d_{50m} \rightarrow q_{d(M-1)Mm} = q_{p(M-1)Mm} \\ DS_{(M-1)M} < 100d_{50m} \rightarrow q_{d(M-1)Mm} = q_{p(M-1)Mm} (DS_{(M-1)M} / 100d_{50m}) \end{array} \right.$$

- Se no ponto de cálculo  $q_{d(M-1)Mm} \geq q_{p(M-1)Mm} - q_{d12m} - q_{d23m} - \dots - q_{d(M-2)(M-1)m}$  para os  $K(M - 1)$  sedimento da penúltima camada, só estes estarão disponíveis para transporte, última camada está fora do processo.

- ❖ Caso contrário há que se verificar o estoque incluindo a camada  $M$ , que é a última, com altura  $S_{EM}$ , e  $M$  classes de sedimentos:

- Vazão sólida potencial do sedimento  $m$  na última camada:

$$q_{pMm} = q_{pm} e_m \quad (51)$$

- Vazão sólida disponível do sedimento  $m$  na última camada:

$$DS_{EM} = S_{EM} (1 - p_m) e_m \quad (52)$$

$$|?) \left\{ \begin{array}{l} DS_{EM} \geq 100d_{50m} \rightarrow q_{dMm} = q_{pMm} \\ DS_{EM} < 100d_{50m} \rightarrow q_{dMm} = q_{pMm} (DS_{EM} / 100d_{50m}) \end{array} \right.$$

$$q_{dMm} = \frac{S_{EM}}{\Delta t} (1 - p_m) e_m \quad (53)$$

Na última camada há todas as  $M$  classes de sedimentos, por isso o somatório em  $j$  das frações de cada classe é igual a 1.0.

### 5.5.5 Sobre as condições de contorno no modelo de transporte de sedimentos

No modelo de transporte de sedimentos, seja no modo acoplado ou desacoplado há dois tipos de condição de contorno que podem ser aplicadas a qualquer ponto do contorno:

- **Tipo 0:** em pontos tipo 0, adota-se condições de equilíbrio no contorno, considerando as  $M$  classes de sedimentos pertinentes ao domínio. No caso, a proporção das diferentes classes de sedimentos será a definida nas condições iniciais para o nó de contorno. Condição de equilíbrio implica em que a vazão sólida no ponto para cada uma das  $M$  classes de sedimento será igual à vazão sólida potencial, ou capacidade de transporte do escoamento, para cada sedimento, na proporção da curva granulométrica prescrita. Este é o

tipo presumido para os pontos de fronteira, e recomenda-se ser mantido para todos os pontos de fronteira em que não haja afluxo hidrodinâmico.

- **Tipo 1:** em pontos tipo 1, aplica-se as vazões sólidas normais à fronteira prescritas para cada uma das  $M$  classes de sedimentos pertinentes ao domínio. Note que, como nos demais modelos do SisBaHiA<sup>®</sup>, eventuais valores constantes colocados no ponto serão adicionados aos valores variáveis prescritos.
- **Tipo 2:** similar ao Tipo 0, porém com batimetria permanente, i.e.  $\delta h = 0$ . Este caso é importante para pontos onde se prescreve curva chave hidrodinâmica, com níveis e vazões líquidas, deixando a vazão sólida em equilíbrio. Como a vazão nodal é o produto da coluna de água,  $H = \zeta + h$ , pela velocidade  $2DH$ , se houver variação de batimetria, poderá haver variação de vazão nodal. *Recomenda-se este tipo para pontos com afluxos hidrodinâmicos e vazão sólida de equilíbrio.*
- **Tipo 3:** similar ao Tipo 1, porém com batimetria permanente, i.e.  $\delta h = 0$ . Este caso é importante para pontos onde se prescreve curva chave hidrodinâmica e sedimentológica, com imposição de níveis, vazões líquidas e vazões sólidas. Como a vazão nodal é o produto da coluna de água,  $H = \zeta + h$ , pela velocidade  $2DH$ , se houver variação de batimetria, poderá haver variação de vazão nodal. *Recomenda-se este tipo para pontos com afluxos hidrodinâmicos nos quais se queira prescrever vazões sólidas.*

No tipo 0 a vazão sólida afluente para cada uma das  $M$  classes de sedimentos é calculada levando em conta a hidrodinâmica vigente no local. As variáveis necessárias são obtidas do módulo hidrodinâmico, e o cálculo da vazão sólida normal à fronteira é realizado com a fórmula previamente selecionada no módulo de transporte de sedimentos, como visto na seção 5.5.2. Este modo de prescrição da condição de contorno é usualmente denominado condição de equilíbrio, pois as vazões sólidas na fronteira são iguais à capacidade de transporte do escoamento, ou seja admite-se a vazão sólida potencial, respeitando a proporção das diferentes classes de sedimentos definida nas condições iniciais para o nó de contorno.

No tipo 1 a vazão sólida normal à fronteira é prescrita para cada uma das  $m$  classes de sedimentos do domínio. Esta opção é útil quando se tem a disposição dados obtidos em campo ou dados provenientes de outro modelo. A vazão sólida imposta pode ser permanente ou variável no tempo, na forma de uma série temporal. Recomenda-se em conjunto com essa abordagem um ajuste das fórmulas de transporte a fim de obter resultados mais fidedignos. Esta abordagem pode ser muito útil em modelos a jusante de usinas hidrelétricas, onde o transporte de sedimentos na usina é nulo, ou muito reduzido.

Uma consequência comum na utilização do tipo 1 é a ocorrência de erosão ou assoreamento nas proximidades da fronteira onde foi prescrita a condição de contorno. Caso a vazão sólida normal prescrita seja menor que a capacidade de transporte do escoamento, é provável que ocorra erosão, se for maior que a capacidade de transporte do escoamento haverá assoreamento.

## 5.6 Sobre modelagem dos efeitos de pilares de Ponte<sup>10</sup>

No estudo de corpos de água naturais através da modelagem computacional surgem situações nas quais determinadas estruturas fazem parte do domínio de modelagem. Um desses casos é

<sup>10</sup> Esta seção foi em maior parte desenvolvida pelo Eng. Eduardo E. Gonzáles-Gorbeña, D.Sc.

quando uma ponte atravessa o corpo d'água objeto de análise. Nesses casos, os pilares da ponte devem ser considerados na modelagem para a análise hidrodinâmica. A inclusão dos efeitos dos pilares na modelagem computacional pode ser realizada através de diversas técnicas. Cada uma destas técnicas apresenta uma série de vantagens e desvantagens que devem ser consideradas na hora de estabelecer os objetivos procurados.

Nesta seção avalia-se os efeitos de pilares na hidrodinâmica em cenários idealizados, utilizando três métodos de modelagem diferentes:

1. Representação dos pilares da ponte fisicamente com a discretização da malha.
2. Representação dos pilares da ponte como ilhas nodais.
3. O efeito dos pilares é representado ao incluir um termo de tensão adicional nas equações de conservação de quantidade de movimento, dando origem a uma perda de carga.

### 5.6.1 Técnicas de Modelagem

No presente item são discutidas cada uma das técnicas de modelagem a serem avaliadas. As três técnicas, a seguir discutidas, são: refinamento da malha, ilha nodal, termo de tensão adicional.

**Refinamento da malha:** A técnica de refinamento da malha consiste em discretizar o domínio de modelagem de modo que cada um dos pilares seja fisicamente representado, isto é, contornado pela malha de cálculo. A principal vantagem desta técnica é que aproxima-se mais à realidade. Entretanto, a grande desvantagem é seu alto custo computacional devido ao reduzido tamanho dos elementos empregados na discretização espacial do domínio de cálculo. O que inviabiliza seu uso em domínios de modelagem de grande escala como baías ou estuários onde a área ocupada pela estrutura corresponde a uma pequena parte do domínio de modelagem total.

**Ilhas nodais:** Nesta técnica, no(s) nó(s) onde é posicionado cada um dos pilares da ponte especifica-se uma condição de ilha nodal. Esta condição implica que a velocidade no(s) nó(s) é nula. A vantagem desta técnica é que permite uma discretização menos detalhada aumentando o desempenho computacional. Em contrapartida, o perfil de velocidade longitudinal e transversal obtido na região próxima aos pilares é menos realista. Isto é devido à interpolação entre nós ser afetada pela condição de ilha nodal. Além disso, a área de influência do nó deve se adequar ao tamanho ocupado pelo pilar ou pilares posicionados nesse nó. Por último, esta técnica tem a grande limitação que em domínios com discretização espacial de grande escala, onde os pilares ocupam a totalidade dos nós da seção que percorre a ponte, cria-se uma barreira artificial para o escoamento.

**Termo de tensão adicional:** Este último método consiste na inclusão de um termo de tensão adicional nas equações de conservação de quantidade de massa promediadas na vertical (2DH),

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + \hat{u}_j \frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{1}{H} \left[ \frac{1}{\partial x_i} \left( H \hat{\tau}_{ij}^T \right) + \tau_i^S + \tau_i^B + \tau_i^T \right] + \hat{a}_i, \quad i, j = 1, 2 \quad (1)$$

onde:  $\hat{u}_i$  a velocidade do escoamento promediada na vertical,  $\zeta$  a elevação da superfície livre,  $\rho$  a massa específica da água,  $g$  é aceleração da gravidade,  $H$  a altura instantânea da coluna de água,  $\hat{a}_i$  representa a aceleração de Coriolis,  $1^*$  são as tensões dinâmicas turbulentas,  $2^*$  são as tensões do vento na superfície livre,  $3^*$  são as tensões de atrito atuantes no fundo do escoamento

e 4\* são termos adicionais de tensão para representar o efeito de perda de carga associado à influência de estruturas que interatuam com o escoamento. Este termo de tensão é definido por:

$$\tau_i^T = \frac{1}{2} \rho C_T (\hat{u}^2 + \hat{v}^2)^{0.5} \hat{u}_i \cdot \Theta, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

$C_T$  é o coeficiente de arrasto. Se  $A_I$  é a área de influência de cada nó computacional,  $A_T$  a área da estrutura exposta ao escoamento, e  $N_P$  o número de estruturas por nó,

$$\Theta = N_T (A_T / A_I) \quad (3)$$

representa a área total de estruturas por nó de cálculo, que se denomina fator de obstrução nodal. As principais vantagens desta técnica é que permite ter uma discretização menos detalhada na região de interesse, mas diferentemente da técnica de ilha nodal, não obstrui totalmente o passo do escoamento. Além disso, permite controlar a tensão atribuída a cada nó, assim como relacionar o número de pilares em cada nó com a área de influência deste. Porém, existe a dificuldade de definir, corretamente, o coeficiente de arrasto para cada tipo de estrutura.

### 5.6.2 Metodologia

Para analisar as diferentes técnica foram realizadas simulações hidrodinâmicas promediadas na vertical (2DH), utilizando o SisBaHiA<sup>®</sup> (ROSMAN, 2014), em vários cenários idealizados em canais retangulares:

1. Canal retangular de 9.800 m × 60 m com um pilar de diâmetro 2,2 m centralizado no canal.
2. Canal retangular de 9.800 m × 80 m com uma ilha nodal centralizado no canal.
3. Canal retangular de 9.800 m × 60 m com uma tensão adicional, centralizada na seção transversal do canal na coordenada (4.800 m, 30 m), e representando o pilar com características similares às do cenário 1.

#### 5.6.2.1 Malha de cálculo

A discretização dos domínios de cada um dos cenários de modelagem realizou-se via elementos finitos quadráticos triangulares no cenário 1 e retangulares nos cenários 2 e 3. A técnica de refinamento de malha, cf. Figura 18, utiliza uma maior quantidade de elementos em comparação com as outras técnicas.

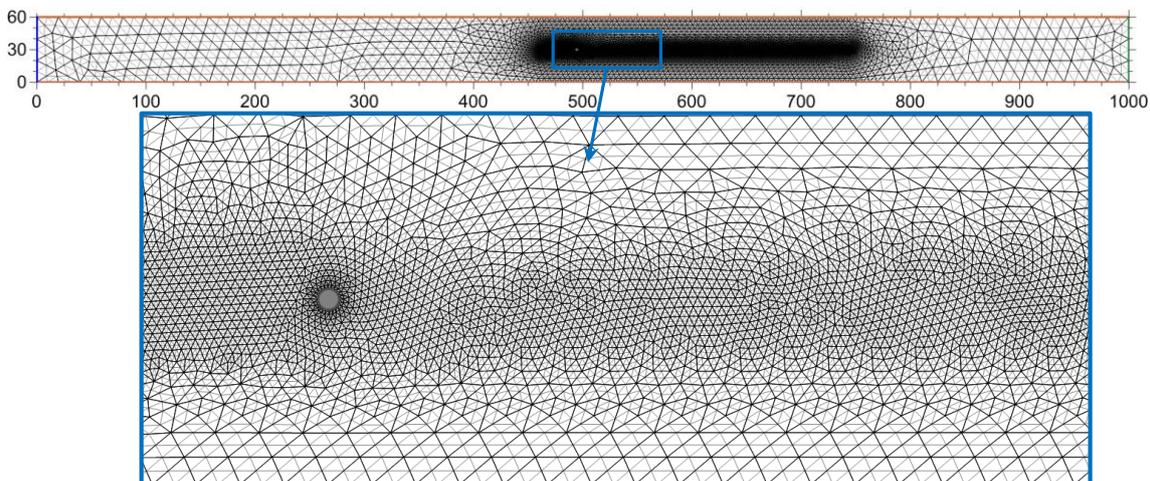


Figura 18. Malha de cálculo utilizada na técnica de discretização detalhada do pilar.

A discretização utilizada nos métodos de ilha nodal e termo adicional de tensão são similares exceto por seus domínios de modelagem. Foram utilizados elementos finitos retangulares bi-quadráticos com tamanho  $\Delta x = 400$  m e  $\Delta y = 200$  m. Tamanho que corresponde às dimensões dos elementos utilizados na região da ponte no modelo da BTS. Essa diferença na largura do domínio visa manter a simetria e evitar erros numéricos associados à localização da ilha nodal e termo adicional de tensão. A Figura 19 e a Figura 20 ilustram as malhas de cálculo utilizadas em estes cenários.

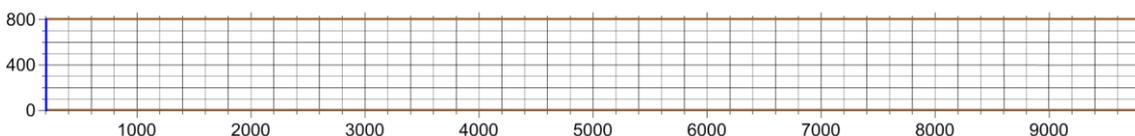


Figura 19. Malha de cálculo utilizada na técnica da ilha nodal.

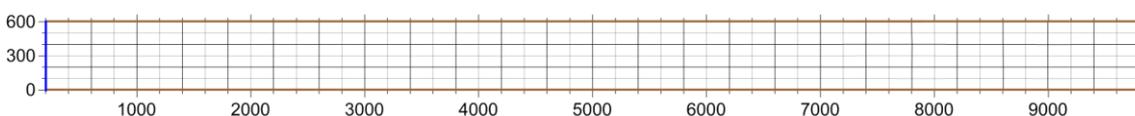


Figura 20. Malha de cálculo utilizada na técnica do termo adicional de tensão.

As malhas exibidas na Figura 21 e na Figura 22 correspondem as diferentes seções de uma ponte com variadas soluções de apoio. Essas malhas são utilizadas no estudo de sensibilidade do coeficiente de arrasto,  $C_D$ , apresentado no item 5.6.4 Calibração do coeficiente de arrasto.

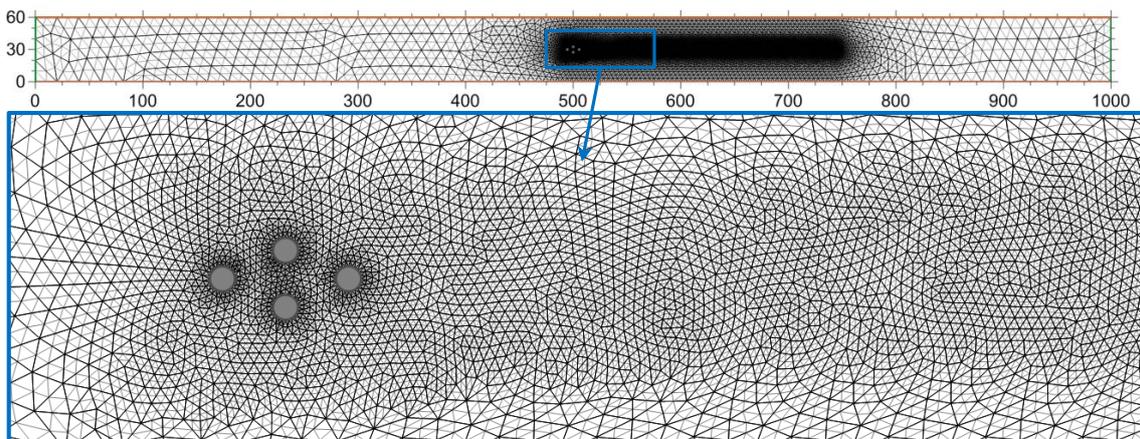


Figura 21. Malha Seção 60 m.

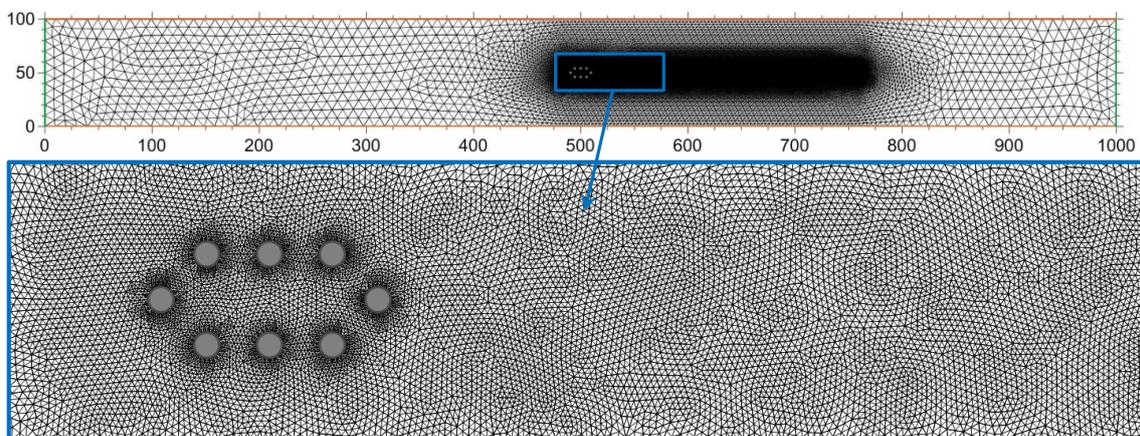


Figura 22. Malha Seção 100 m.

**Condições de contorno:** Com o propósito de originar um escoamento unidirecional com sentido de esquerda para a direita, prescreveu-se no contorno esquerdo (em azul) uma fronteira terrestre com afluxo de vazão com velocidade de escoamento permanente e uniforme de 1 m/s. No contorno direito se impôs uma condição de fronteira aberta (em verde) para permitir o efluxo da vazão no domínio. No contorno terrestre, superior e inferior (marrom), se impôs uma condição de deslizamento. No método de discretização detalhada, na fronteira de terra correspondente ao pilar prescreveu-se uma condição de não deslizamento, i.e. velocidade tangencial nula ( $U_T = 0$ ).

### 5.6.3 Comparação das técnicas de modelagem

Discute-se as técnicas de modelagem de pilares, acima mencionadas, e analisa-se os resultados obtidos. Os resultados de isolinhas de magnitude de velocidade são ilustrados da Figura 23 à Figura 25 para cada caso.

A Figura 23 representa a solução do campo de velocidades para o modelo detalhado que representa a geometria exata do pilar. Este modelo proporciona a solução com maior grau de aproximação à realidade, porém é inviável ser utilizada em domínios de grande escala devido a seu alto custo computacional.

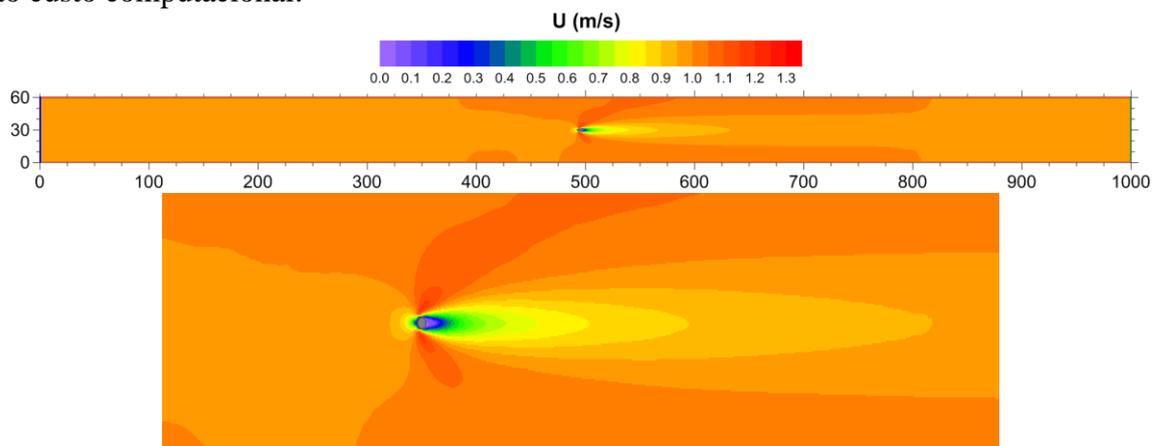


Figura 23. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem detalhada de um pilar da ponte.

A Figura 24 representa a solução do campo de velocidades para a modelagem com o pilar da ponte como uma ilha nodal. Observa-se na figura que esta técnica gera uma perda de carga, tanto na dimensão longitudinal como transversal, excessiva quando comparada ao caso anterior.

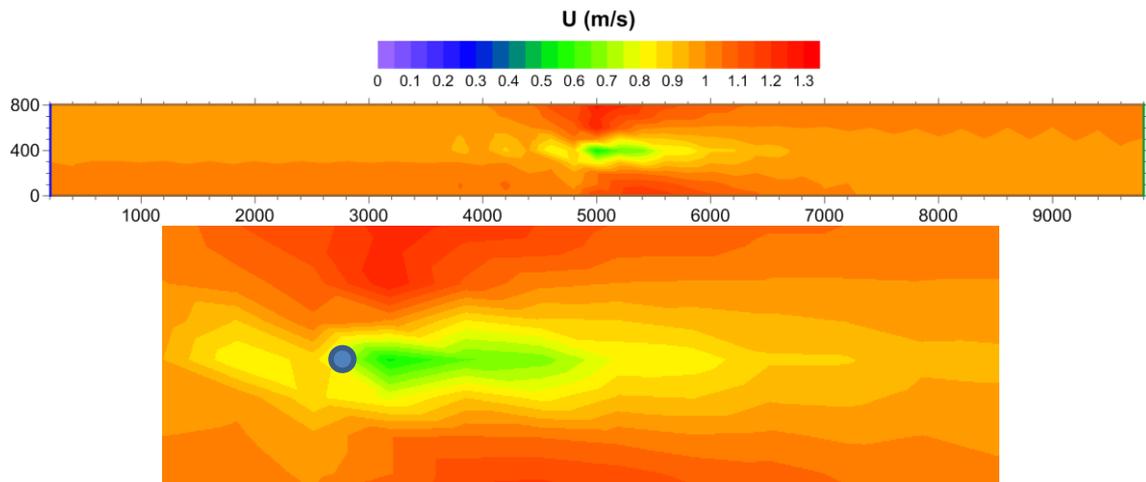


Figura 24. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem utilizando o método da Ilha-nodal.

A Figura 25 representa a solução do campo de velocidades para a modelagem que representa o pilar da ponte através de um termo adicional de tensão. O valor do coeficiente de arrasto de  $C_D = 1.2$  foi determinado em base aos valores recomendado para pilares circulares no Manual de Hidráulica do Departamento de Transporte de Texas – EUA e disponível online (MAREK, 2014). É apreciável que a perda de carga com  $C_D = 1.2$  é muito menor que o gerado no caso anterior, na técnica da ilha nodal. A maior vantagem da técnica do termo adicional de tensão é que possibilita controlar a magnitude da perda de carga e associar o efeito de múltiplas estruturas em um só nó de cálculo. A principal desvantagem consiste na impossibilidade de definir a disposição das estruturas no nó, o que pode influenciar significativamente a recuperação da esteira.

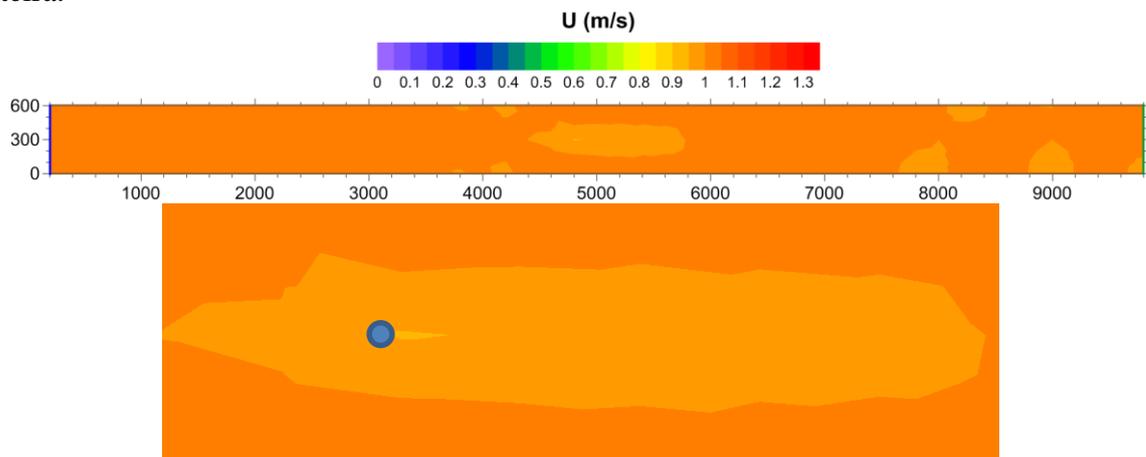


Figura 25. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto  $C_D = 1.2$ .

A Figura 26 apresenta o perfil de velocidades longitudinal a jusante do pilar obtido em cada uma das modelagens.

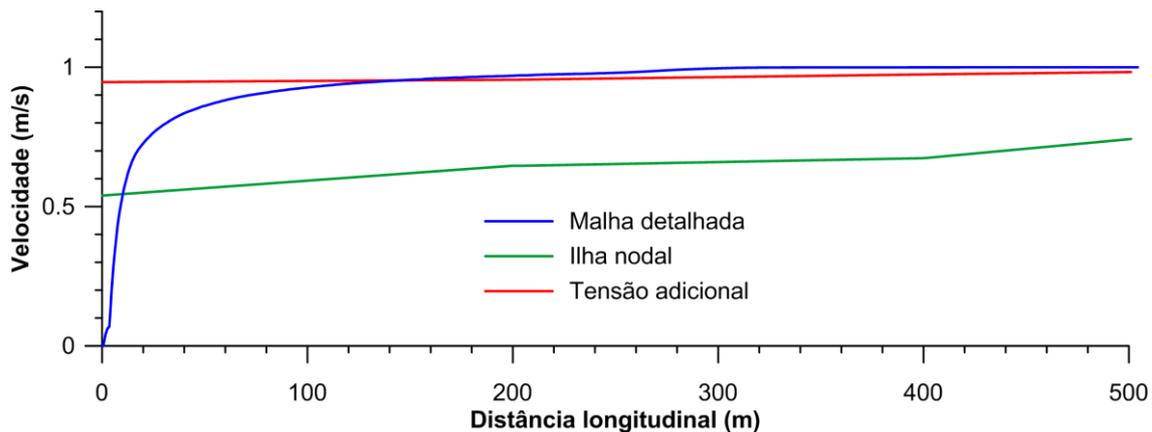


Figura 26. Perfil de velocidades longitudinal a jusante do pilar para cada modelagem.

Da análise dos resultados acima apresentados pode se concluir que, a modelagem da presença de pilares de pontes em grandes domínios com a técnica de inclusão de um termo adicional de tensão se apresenta como a mais atrativa das três avaliadas por: 1) proporcionar resultados próximos à modelagem detalhada, 2) ter um desempenho computacional factível, 3) permitir incluir vários pilares em um único nó, assim como 4) alterar o valor do coeficiente de arrasto utilizado.

#### 5.6.4 Calibração do coeficiente de arrasto

Uma vez escolhida a técnica do termo adicional de tensão como o método mais apropriado para a modelagem de pilares de pontes, é necessário definir qual deve ser o valor do coeficiente de arrasto que gere a perda de carga tencionada. Para esse propósito foi realizada uma nova simulação utilizando o método de termo adicional de tensão, mas dessa vez com  $C_D = 3$ . Cabe destacar que o máximo valor do coeficiente de arrasto, apresentado em MAREK (2014), é de  $C_D = 2$  para pilares com seção retangular. O objetivo de aumentar o valor do coeficiente de arrasto consiste em gerar uma perda de carga maior e poder avaliar a sensibilidade do parâmetro  $C_D$  nos resultados.

Os resultados obtidos, v. Figura 27, são comparados com o cenário de modelagem com malha detalhada e com o cenário para  $C_D = 1.2$ . A análise dos resultados é realizada para duas regiões da esteira: a região imediatamente a jusante do pilar até uma distância de 50 m, que denominamos como campo próximo da esteira, e a região a jusante além desse ponto, que denominamos como campo afastado da esteira. Na região do campo próximo da esteira os resultados diferem significativamente entre as duas técnicas. Já no campo afastado da esteira, os resultados dos dois métodos têm comportamentos similares, mostrando uma tendência linear de igual inclinação. As diferenças obtidas entre os resultados dos cenários com mesmo método de modelagem são inferiores a 7%. Entretanto, os resultados no campo afastado da esteira entre os dois métodos diferem em até 9%. O método do termo adicional de tensão consegue representar adequadamente a magnitude da velocidade a partir de uns 80 m dos pilares.

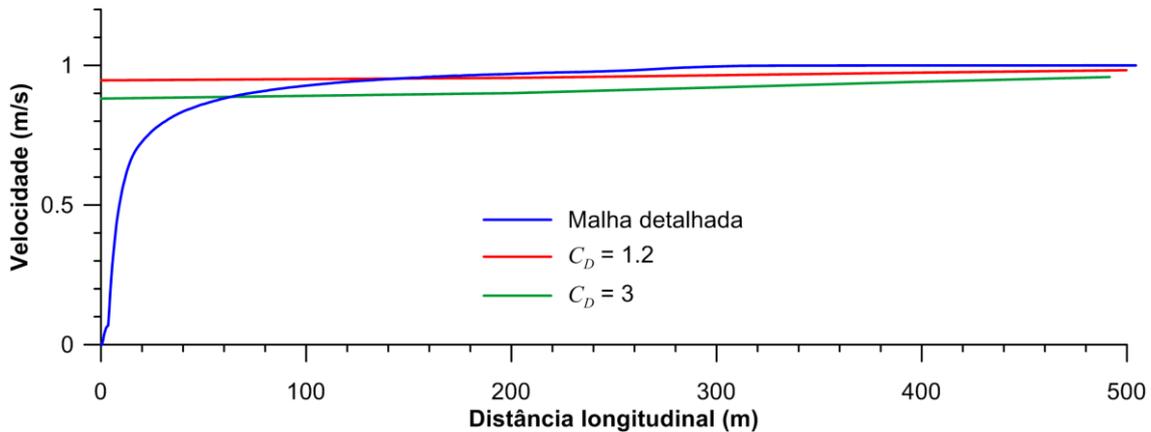


Figura 27. Perfil de velocidades longitudinal para os cenários de malha detalhada e termo de tensão adicional com  $C_D = 1.2$  e  $C_D = 3$ .

A título de comparação, na continuação seguem os resultados obtidos dos métodos de malha detalhada e termo de tensão adicional, com  $C_D = 1.2$  e  $C_D = 3$ , para os apoios representativos de duas seções da ponte objeto de estudo. As seções modeladas são:

1. Seção de 60 m formada por 4 pilares com diâmetro 2,2 m e dispostos como ilustrados na Figura 21.
2. Seção de 100 m formada por 8 pilares com diâmetro 2,2 m e dispostos como ilustrados na Figura 22.

O apoio correspondente ao mastro, formada por 54 pilares com diâmetro 2,5 m, foi evitado nas modelagens pelo alto custo computacional das simulações.

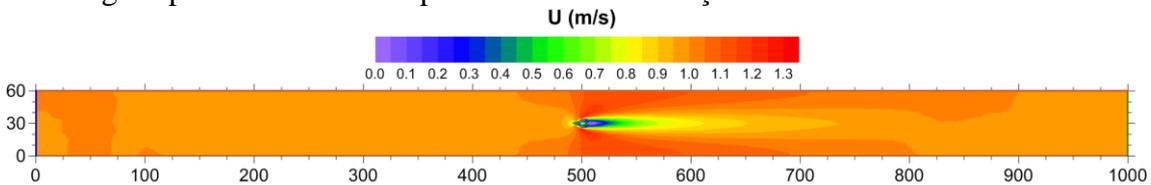


Figura 28. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem detalhada de um apoio de 4 pilares (Seção 60 m).

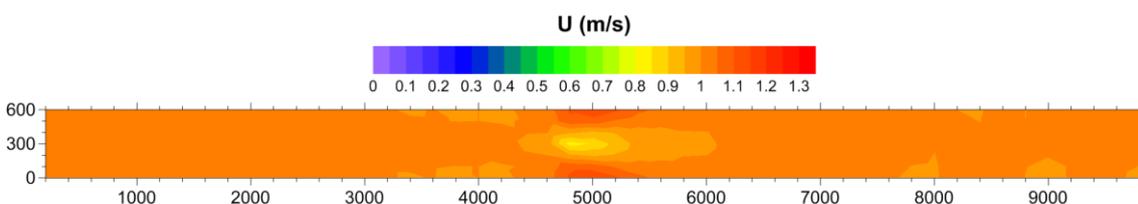


Figura 29. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto  $C_D = 1.2$  de um apoio de 4 pilares (Seção 60 m).

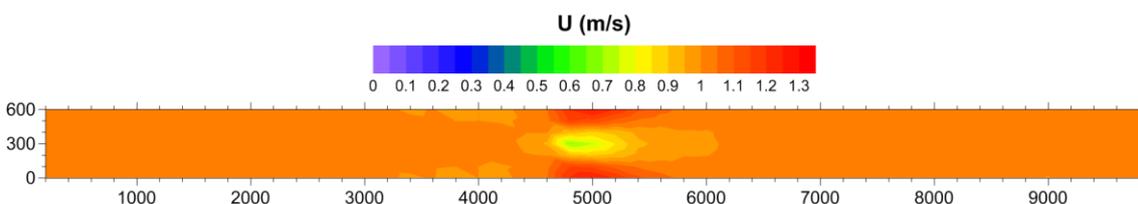


Figura 30. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto  $C_D = 3$  de um apoio de 4 pilares (Seção 60 m).

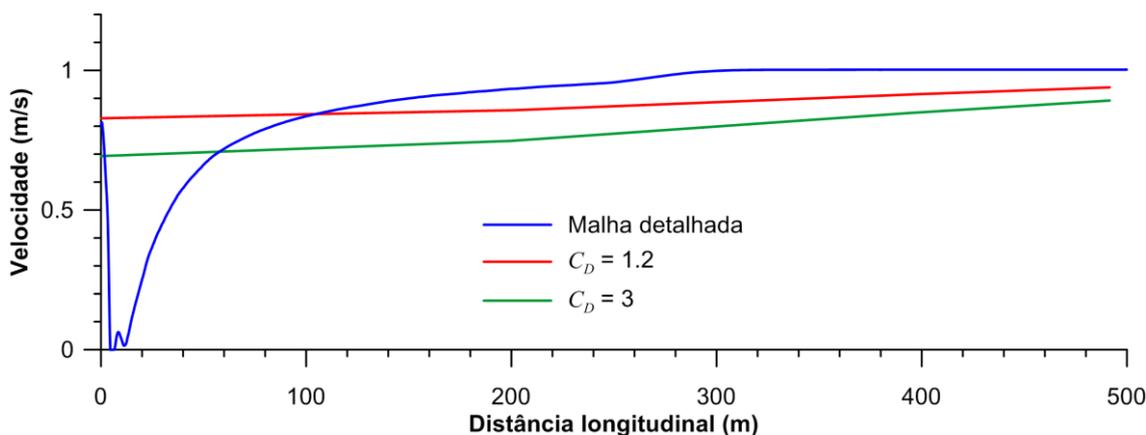


Figura 31. Perfil de velocidades longitudinal para os cenários de malha detalhada e termo de tensão adicional com  $C_D = 1.2$  e  $C_D = 3$ ; apoio de 4 pilares (Seção 60 m).

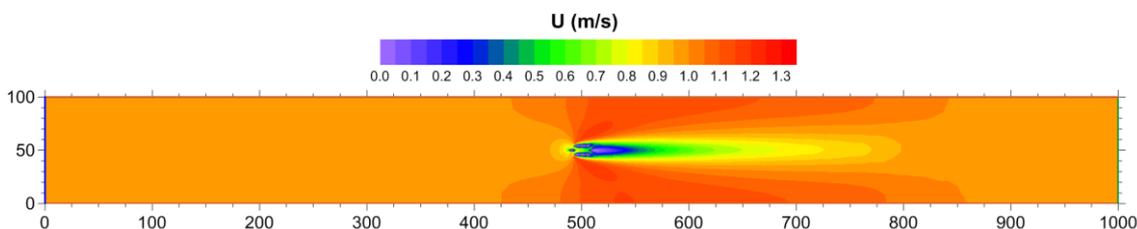


Figura 32. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem detalhada de um apoio de 8 pilares (Seção 100 m).

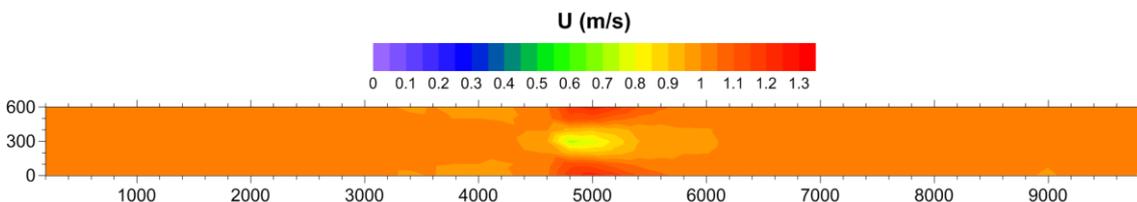


Figura 33. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto  $C_D = 1.2$  de um apoio de 4 pilares (Seção 100 m).

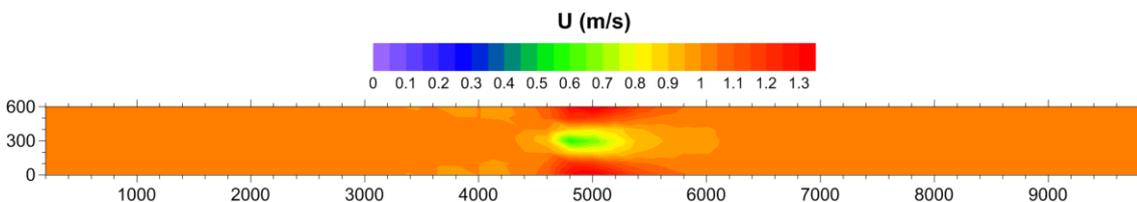


Figura 34. Isolinhas de velocidade obtidas com a modelagem por meio da inclusão de um termo de tensão adicional com coeficiente de arrasto  $C_D = 3$  de um apoio de 4 pilares (Seção 100 m).

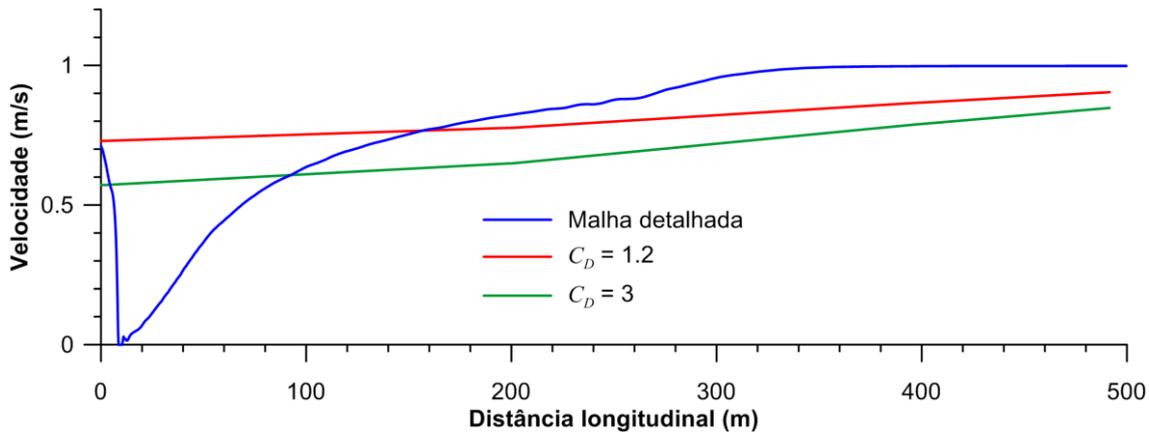


Figura 35. Perfil de velocidades longitudinal para os cenários de malha detalhada e termo de tensão adicional com  $C_D = 1.2$  e  $C_D = 3$ ; apoio de 8 pilares (Seção 100 m)..

Em cada um dos cenários modelados com o termo de tensão adicional nota-se uma subestimação da magnitude de velocidade no campo afastado da esteira. Essa diferença pode ser associada à impossibilidade da técnica representar a disposição em planta dos pilares, fator que influencia a recuperação da esteira.

### 5.6.5 Conclusões

A modelagem computacional do efeito da presença de pilares de pontes em domínios de grande escala precisa de uma abordagem diferenciada da discretização detalhada destas estruturas. O motivo principal para a análise de técnicas alternativas é o altíssimo custo computacional da modelagem detalhada que inviabiliza o estudo. Por esse motivo, neste trabalho são avaliadas duas técnicas alternativas, denominadas: ilha nodal e termo de tensão adicional. Do estudo se concluiu:

- A técnica de modelagem de ilha nodal gera perdas de carga excessivas em comparação com a modelagem detalhada, na seção longitudinal e transversal.
- A técnica da inclusão de um termo adicional de tensão nas equações de conservação de quantidade de movimento permite obter perdas de carga semelhantes às da modelagem detalhada na região afastada da esteira.
- As principais vantagens da modelagem com termo de tensão adicional são: 1) permite aumentar a discretização espacial do domínio de modelagem reduzindo o custo computacional da simulação, 2) existe a possibilidade de incluir a presença de várias estruturas com diferentes geometrias, 3) ao invés que a técnica da ilha nodal, o termo de tensão adicional permite gerar uma perda de carga em toda uma seção do domínio sem criar uma barreira artificial, e 4) o coeficiente de arrasto pode ser utilizado como parâmetro de calibração.
- Evidentemente a modelagem com termo de tensão adicional não consegue representar adequadamente o campo próximo da esteira, porém, este tipo de resultado só é necessário para estudos locais de interação fluido estrutura, ou análises de processos no campo próximo das estruturas. Análises de tal tipo podem ser feitas por demanda para casos especiais, mas não fazem sentido quando se deseja analisar aspectos hidro-sedimentológicos em toda a BTS, por exemplo.
- Dos dois valores de coeficiente de arrasto analisados,  $CD = 1,2$  e  $CD = 3$ , o primeiro, indicado por MAREK (2014) para pilares circulares, proporcionou uma solução, no campo afastado da esteira, similar à obtida no modelado detalhado do cenário com 1 pilar. Nos

cenários com múltiplos pilares, a técnica do termo adicional de tensão subestimou e superestimou a perda de carga no campo próximo e afastado da esteira, respectivamente. Numa modelagem preliminar recomenda-se adotar  $CD = 3$  para núcleos de pilares. Posteriormente, convém avaliar uso de valores mais próximos da literatura para pilares individuais, e.g. o valor de  $CD = 1.2$ . Vale lembrar que, em média, as perdas de carga foram similares.

## Referências

- MAREK, M.A., 2014. *Hydraulic Design Manual*. Texas Department of Transportation. Acessado em: 08/2014. Disponível online em: [http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hyd/manual\\_notice.htm](http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hyd/manual_notice.htm)
- ROSMAN, P.C.C., Ed., 2014. *Referência técnica do SisBaHiA*. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 09/2014, em [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br).

## 5.7 Dados usados nas modelagens da etapa preliminar

Descreve-se a seguir os dados utilizados nas modelagens analisadas neste **R14**, incluindo batimetria tipos de sedimentos de fundo, vazões fluviais, níveis de maré e ventos.

### 5.7.1 Domínios considerados e dados de batimetria e linha de orla

As linhas de orla foram atualizadas através de imagens georreferenciadas do Google Earth, por serem mais atuais que as disponíveis em cartas náuticas. O eixo da ponte considerado foi o do desenho P-GMT-001-DE-01200-EN-RB6-MM-REV24-Samir.dwg, fornecido por técnicos da SIT em outubro de 2014.

Para batimetria, usou-se os dados de cartas náuticas mais atuais para a região de interesse, especialmente as em negrito na listagem abaixo:

- **Carta Náutica\DHN\1101-PROXIMIDADES DO PORTO DE SALVADOR**
- **Carta Náutica\DHN\1102-PORTO DE SALVADOR**
- Carta Náutica\DHN\1103-BAÍA DE ARATU E ADJACÊNCIAS
- Carta Náutica\DHN\1104-BAÍA DE TODOS OS SANTOS PARTE NORDESTE
- Carta Náutica\DHN\1105-PORTO DE MADRE DE DEUS
- Carta Náutica\DHN\1108-BAÍA DE TODOS OS SANTOS PORTO DE SÃO ROQUE E PROXIMIDADES
- **Carta Náutica\DHN\1110-BAÍA DE TODOS OS SANTOS**

O Centro de Hidrografia da Marinha, CHM, da Diretoria de Hidrografia e Navegação, DHN, forneceu dados batimétricos de forma digital. Todos os dados de batimetria utilizados estão descritos no **R3 - Relatório de Inventário de Dados**<sup>11</sup>.

A Figura 36 mostra o domínio de modelagem hidro-sedimentológica com mapa de isolinhas de batimetria e linhas de orla consideradas. A Figura 10 mostra a discretização do domínio em elementos finitos.

A Figura 37 mostra o domínio de modelagem de propagação de ondas, que se estende para águas mais profundas, com mapa de isolinhas de batimetria e linhas de orla consideradas.

<sup>11</sup> Como informado no R3, até 12/2015 os dados inventariados estarão disponíveis no link:

<https://www.dropbox.com/s/kbtjz98mc7jgcu/Dados%20BTS%20-%20Invent%C3%A1rio%20DERBA.zip?dl=0>

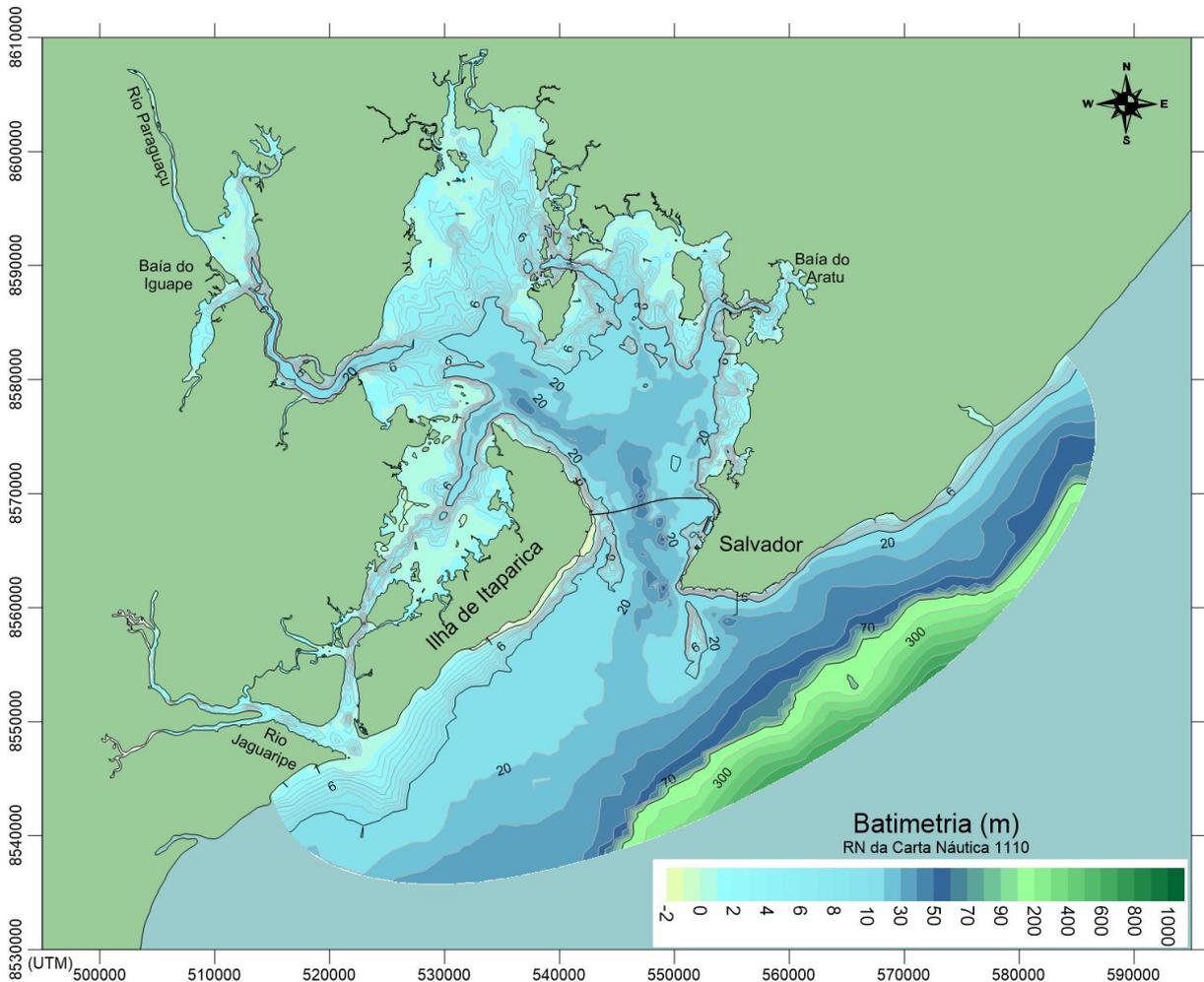


Figura 36. Resultado da modelagem digital do terreno, mostrando linha de orla e isolinhas de batimetria como vista pelo modelo implementado. A Figura 10 apresenta a malha de elemento finitos que discretiza o domínio considerado e contém os pontos de batimetria que geraram o mapa acima.

A Figura 38 mostra a imagem da tela de edição do Modelo de Propagação de Ondas, delineando os limites da grade de dados de batimetria, grade de propagação de onda e de área de registro de resultados. O limite considerado para o domínio do modelo de propagação de ondas estende-se cerca de 26 km para o sul do mapa mostrado na Figura 37.

Deve-se esclarecer que, embora os dados sejam os mesmos, a discretização de batimetria do modelo de propagação de ondas necessita ser consideravelmente mais detalhada que a do modelo hidro-sedimentológico. Tal fato decorre da diferença de escalas entre os fenômenos de interesse. No caso das ondas com períodos de 7 segundos, o comprimento da onda junto da costa mal passa de 30 m, por isso o detalhamento de batimetria necessita ser mais fino.

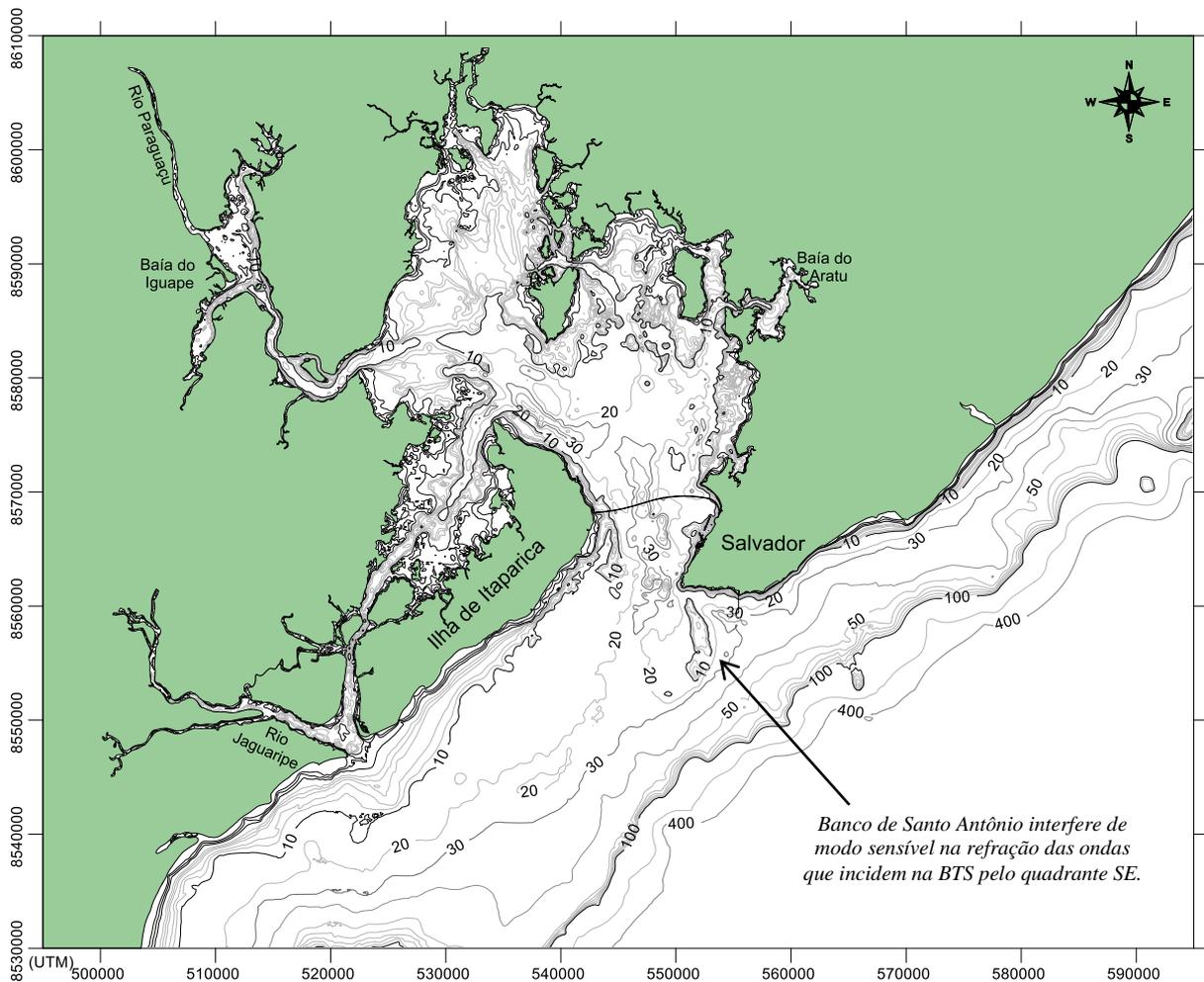


Figura 37. Parte do domínio de modelagem de propagação de ondas, que se estende para águas mais profundas ao sul até a coordenada 8.503.915 m (cerca de 26km para o sul do eixo vertical), como indicado na Figura 38. Indica-se o banco de Santo Antônio na entrada Leste da BTS.

### 5.7.1.1 Sobre datum horizontal e referência de nível

Os dados de elevação e batimetria apresentados em mapas e gráficos neste **R14** adotam os seguintes datum horizontal e referência de nível:

- **Datum Horizontal:** Adotado o WGS-84 - UTM Zona 24S, com projeção Universal Transversa de Mercator.
- **Referências de Nível e Maregrafia:** Adotado como referências de nível (RRNN) os marcos encontrados na Ficha Descritiva de Estação maregráfica F-41 - Capitania de Salvador - Versão 1/2011. Uma vez que esta estação é homologada pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) a partir de observações de longo período, fica assegurada a robustez de seu uso como referência dos levantamentos na área.

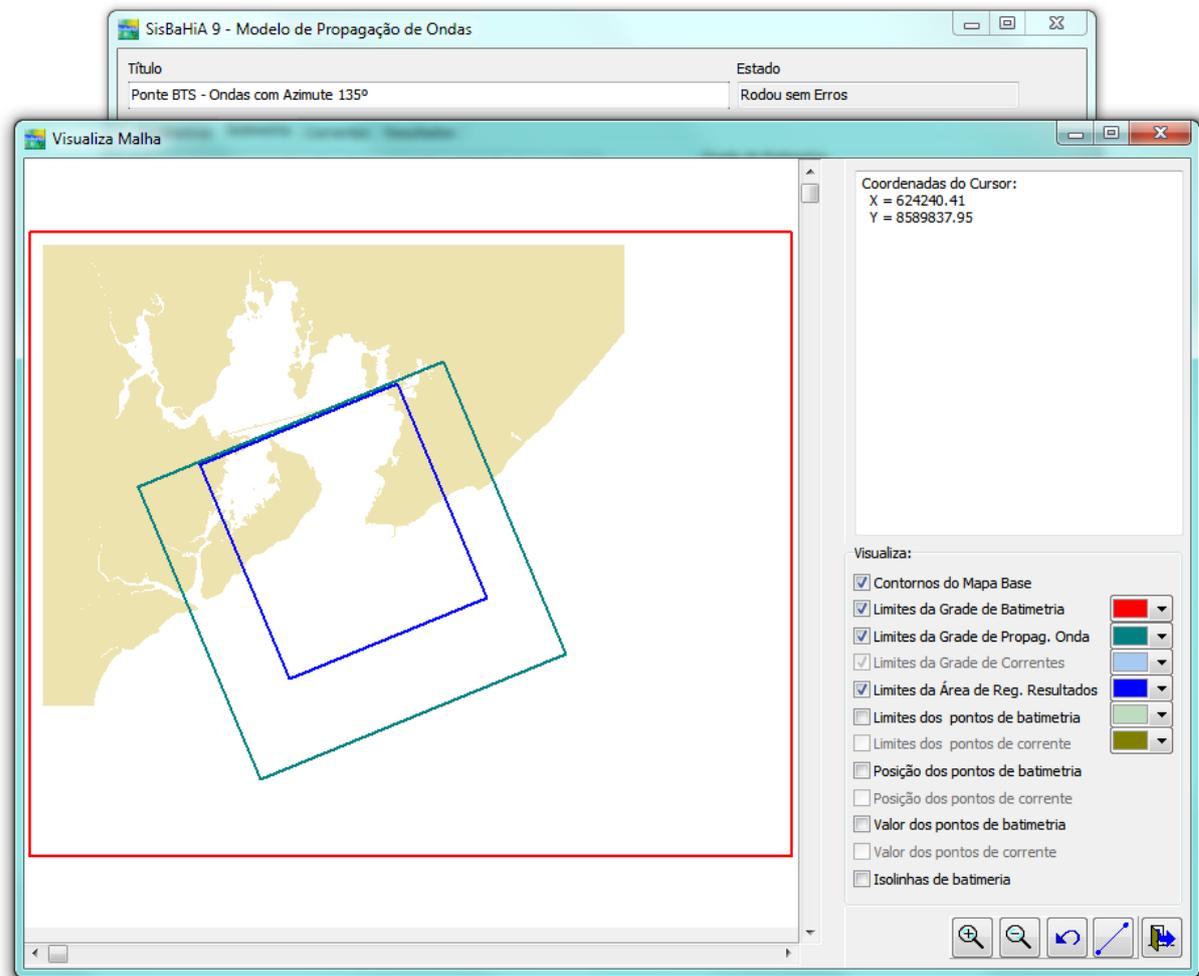


Figura 38. Imagem da tela de edição de Modelo de Propagação de Ondas, delineando os limites das grades de dados de batimetria, propagação de onda e de registro de resultados. Confrontando com o mapa da Figura 37, verifica-se que a grade de propagação de ondas parte de local com profundidades maiores que 400m, configurando águas profundas para todas as ondas consideradas.

### 5.7.2 Dados de distribuição sedimentológica na BTS

Lessa e Dias (2009) realizaram uma integração e padronização das informações pretéritas de diferentes autores quanto às coletas de sedimentos nas diversas regiões ou compartimentos da BTS. Para complementar esses dados, amostras de fundo foram coletadas na área de projeto da ponte entre Salvador e a Ilha de Itaparica, durante a campanha de batimetria de janeiro de 2015, relatada no R7 – *Relatório de Batimetria e Sísmica com Dados Associados*. O R4 – *Relatório de Caracterização Sedimentológica I* e R8 – *Relatório de Caracterização Sedimentológica II* apresentam de forma detalhada a integração de todas essas informações.

A Figura 39 apresenta seus resultados em termos de classificação textural dos sedimentos superficiais do fundo da BTS. De areia média a areia muito grossa são observadas na entrada sul e norte da BTS, atrás da ilha de Itaparica, na saída do Rio Paraguaçu, ao longo da margem ocidental do Canal de Itaparica e em torno da ilha de Maré, bem como nas zonas dispersas dentro da parte central da baía.

Ainda em referência à Figura 39, sedimentos lamosos caracterizam a maior parte da metade norte da BTS e baía Aratu, sendo também muito visíveis no canal Paraguaçu e ao lado do mar da baía Iguape. Por outro lado, as areias finas a muito finas ocorrem principalmente ao longo do canal Itaparica e de forma contínua em toda a parte central da baía e ao longo da margem noroeste do canal Paraguaçu. A mesma figura também indica as amostras coletadas na área do traçado do eixo da futura ponte, sob o qual se observa a dominância de areias ao longo da sua extensão

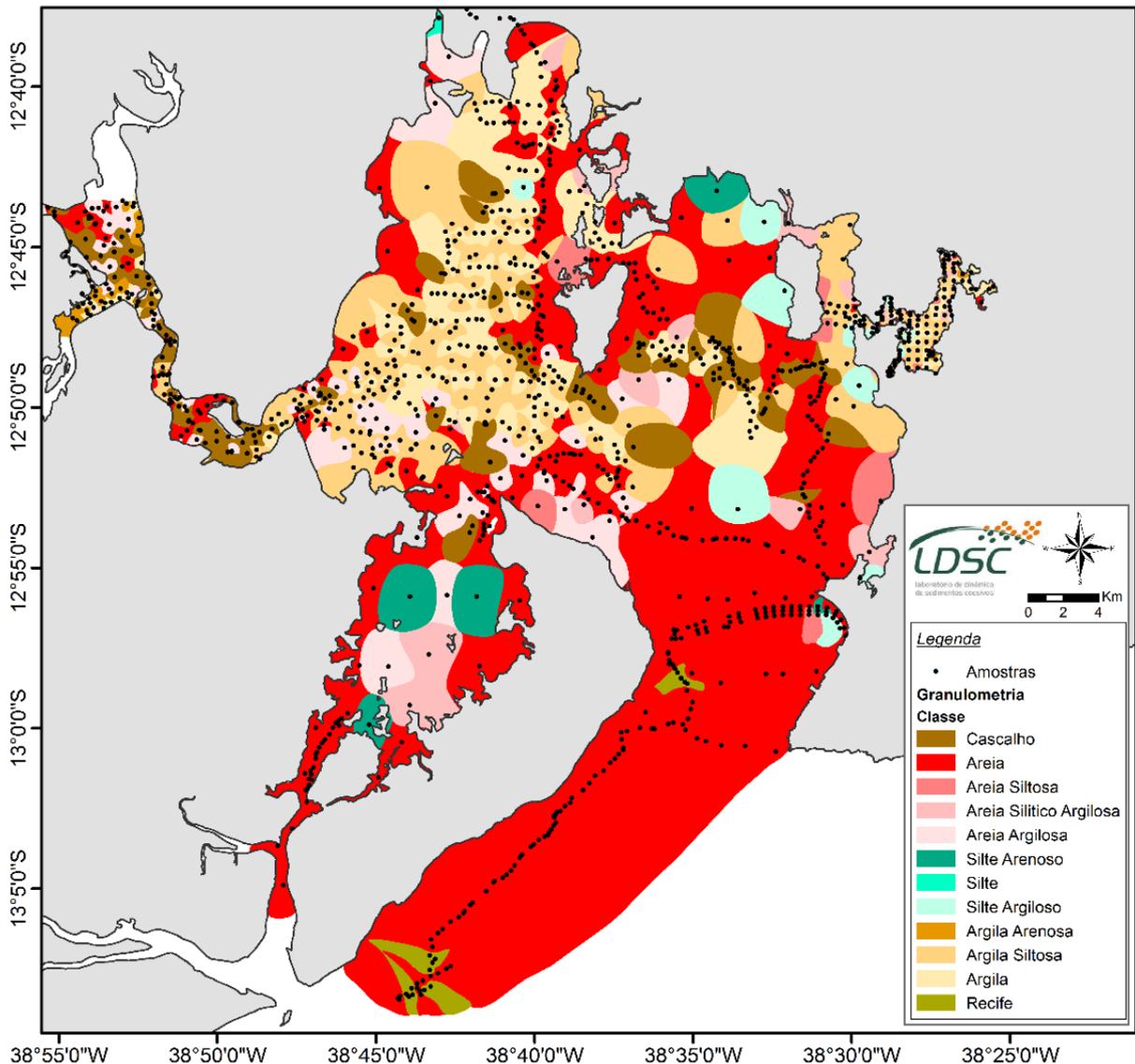


Figura 39. Proposta de distribuição de fácies texturais na BTS apresentada por Lessa e Dias (2009), incluindo as amostras analisadas neste projeto. Escala com 12 classes de tamanhos e todos os pontos de coletas (pretéritos e atuais) utilizados na interpolação.

Com base nos dados mencionados, definiu-se curvas granulométricas para a modelagem hidro-sedimentológica, conforme ilustram os mapas de isolinhas de percentuais de classes de sedimentos apresentados na Figura 40.

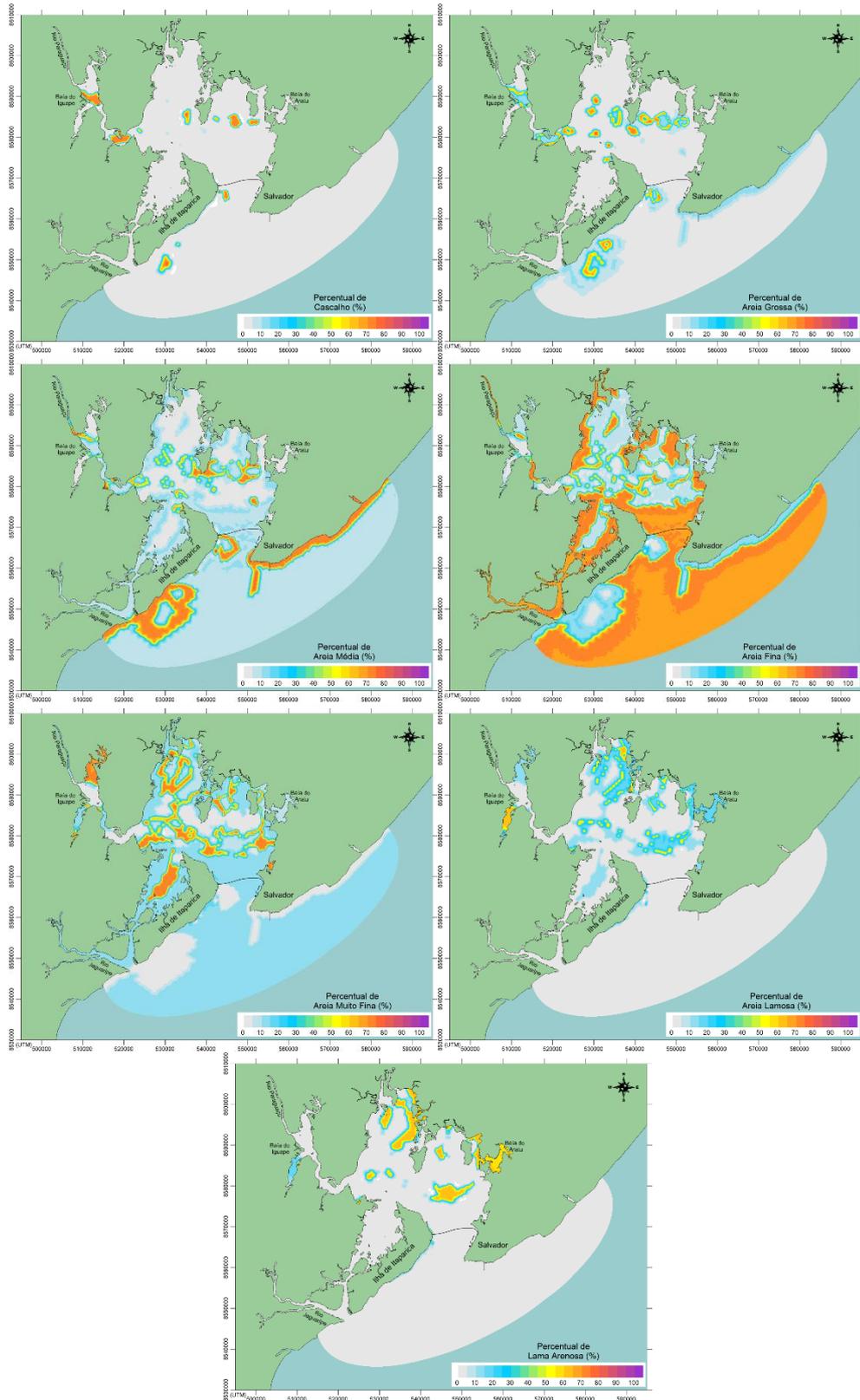


Figura 40. Isolinhas de distribuição inicial de sedimentos no fundo da BTS considerados nas modelagem hidro-sedimentológica. Cada mapa mostra isolinhas de percentuais da classe de sedimentos indicada. A soma dos percentuais de todos os mapas é 100%.

### 5.7.3 Vazões de rios

Dados de vazões fluviais médias dos principais rios foram incluídas, embora a distância da região de interesse, eixo da ponte, seja tal que a influência dos rios é pouco relevante.

Destaca-se que a BTS tem coluna de água quase verticalmente homogênea, exceto no trecho final dos estuários de alguns rios afluentes. Os rios e respectivas vazões médias considerados são os indicados no mapa da Figura 41.

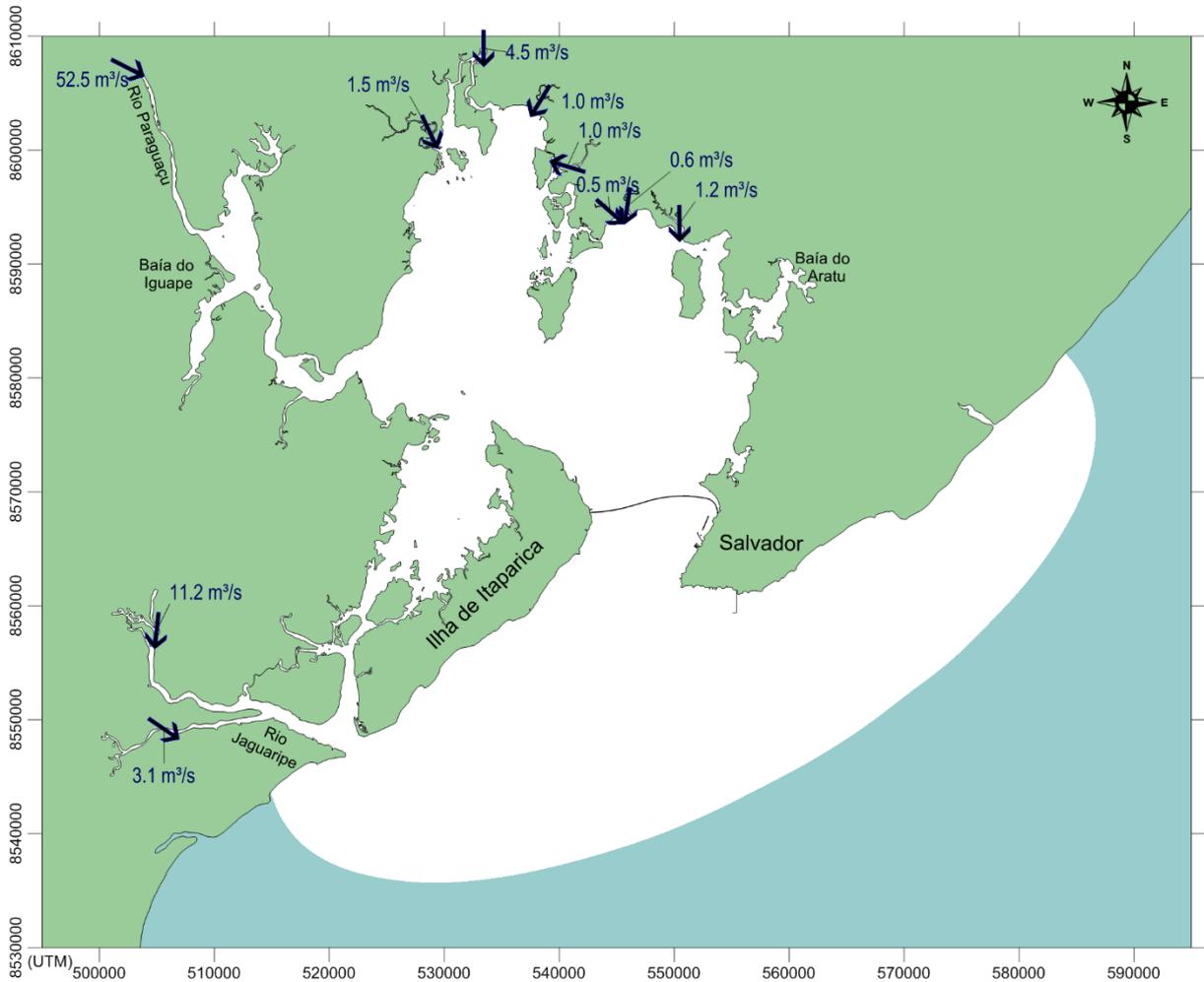


Figura 41. Mapa com indicação de vazões fluviais médias incluídas na modelagem hidrodinâmica.

### 5.7.4 Dados de maré

Conforme discutido no item 5.2, os níveis d'água foram calibrados e validados a partir de medições de campo. A

Tabela 3 lista os nomes das constantes harmônicas, suas amplitudes em metros e fases locais em radianos, que foram implementadas na fronteira aberta do modelo hidrodinâmico. Nota-se que a maré segue um padrão semidiurno.

Tabela 3. Constantes harmônicas inseridas na fronteira aberta do modelo hidrodinâmico.

Constante	Amplitude (m)	Fase (rad)	Constante	Amplitude (m)	Fase (rad)	Constante	Amplitude (m)	Fase (rad)
<i>NMM</i>	1,25	---	<i>Mm</i>	0,0167	4,236	<i>2MS6</i>	0,0029	16,151
<i>M2</i>	0,6933	1,789	<i>M4</i>	0,0118	2,971	<i>M6</i>	0,0028	5,041
<i>S2</i>	0,2593	2,049	<i>M3</i>	0,0082	1,761	<i>MO3</i>	0,0026	3,461
<i>N2</i>	0,1291	1,648	<i>MSf</i>	0,0081	4,733	<i>S4</i>	0,0020	4,164
<i>O1</i>	0,0622	2,101	<i>MS4</i>	0,0052	4,611	<i>2MN6</i>	0,0017	6,243
<i>K1</i>	0,0415	3,534	<i>MN4</i>	0,0049	2,093	<i>alpha1</i>	0,0014	16,554
<i>L2</i>	0,0269	1,688	<i>SK3</i>	0,0032	3,763	<i>2MK5</i>	0,0008	1,766
<i>mu2</i>	0,0249	16,968	<i>OO1</i>	0,0031	3,630	<i>MK3</i>	0,0006	2,189
<i>Q1</i>	0,0202	16,092	<i>2Q1</i>	0,0030	10,037	<i>M8</i>	0,0003	3,681

Para as modelagens apresentadas neste **R14**, usou-se os níveis de maré referentes ao período entre novembro de 2014 a outubro de 2015. A Figura 42 mostra gráfico de série temporal e elevações de maré geradas pelo SisBaHiA<sup>®</sup> no Porto de Salvador. Analisando o gráfico nota-se a sequência de marés de sizígia e quadratura intercaladas a cada 14,6 dias. Nas sizígias as marés tem maiores amplitudes com baixa-mares (BM) mais baixas e as preamares (PM) mais altas. Inversamente nas quadraturas as amplitudes são menores, com baixa-mares menos baixas e preamares menos altas. No gráfico verifica-se que as maiores alturas de maré (PM – BM) ocorreram nas marés de sizígia próximas dos períodos equinociais de março e de setembro.

A Figura 43 apresenta a análise da permanência de nível de água na estação N1 (Porto de Salvador). A curva foi construída com os dados medidos ao longo de novembro de 2014 a outubro de 2015. Os níveis mínimos e máximos medidos foram de -0,17 m e 2,82 m, respectivamente.

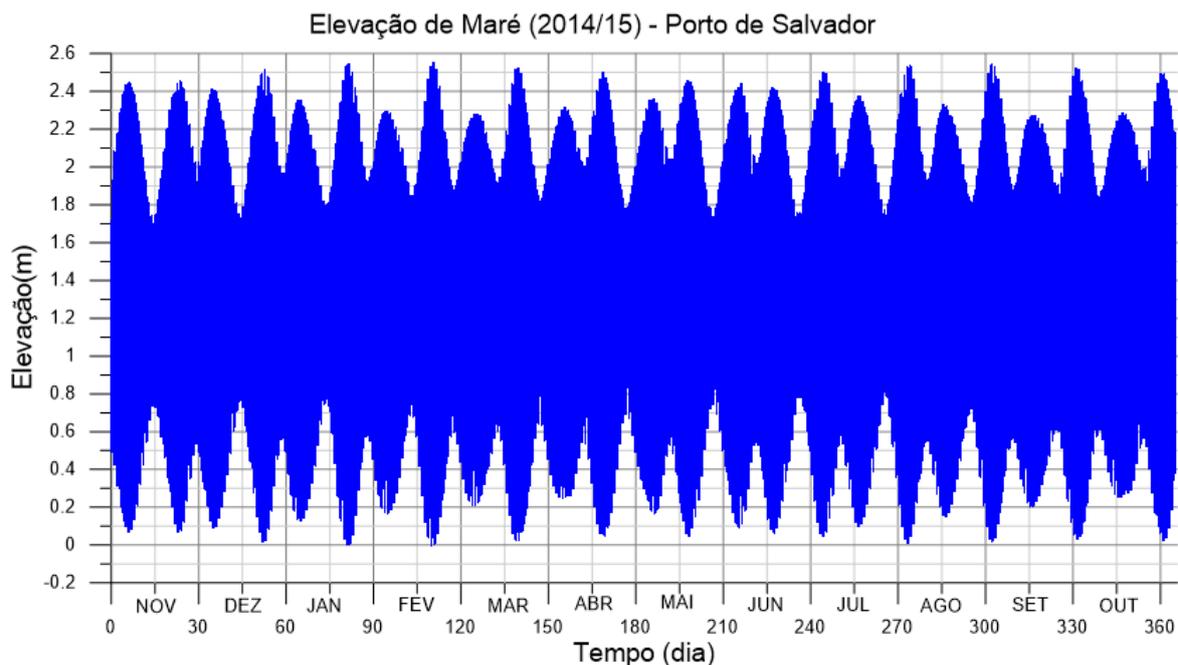


Figura 42. Elevações de maré geradas pelo modelo no Porto de Salvador para o período entre novembro/2014 de outubro/2015.

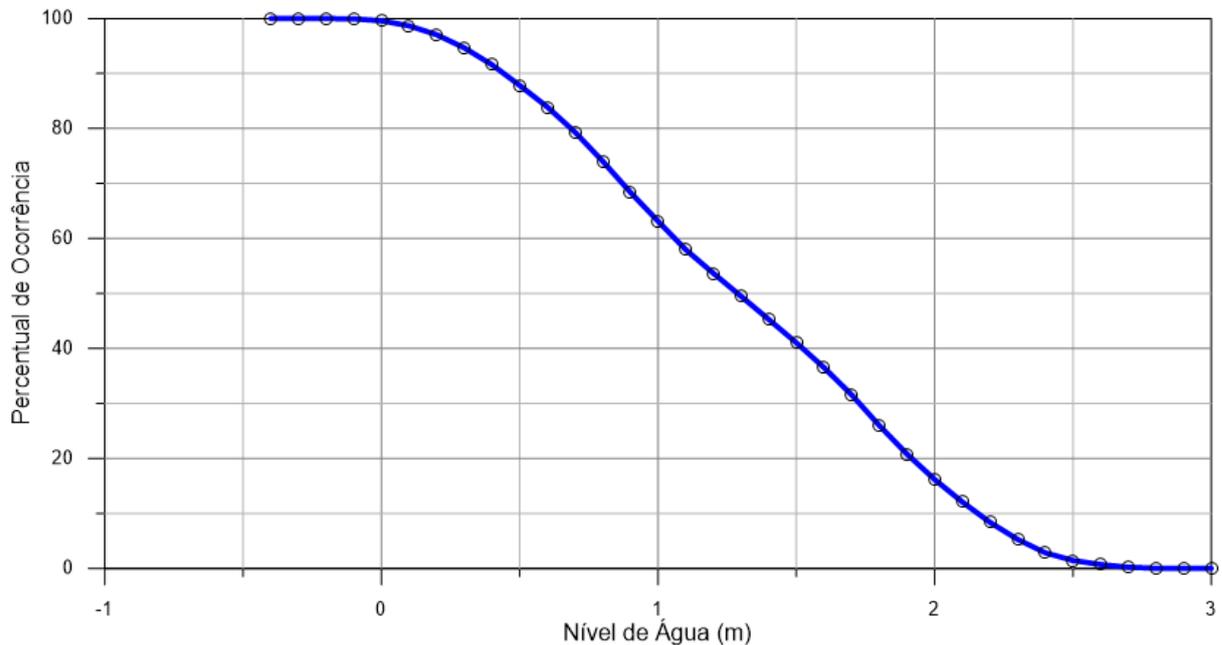


Figura 43. Permanência de nível de água no Porto de Salvador (estação N1).

### 5.7.5 Dados de vento

Os dados de vento utilizados na modelagem foram obtidos a partir das medições de campo realizadas entre novembro de 2014 e outubro de 2015. As informações de direção e magnitude nas estações de Amaralina (M1), Ilha de Itaparica (M2) e Ilha do Frade (M3), foram interpoladas, gerando o campo de ventos para o restante do domínio. A Figura 2 apresenta a localização dessas estações, enquanto que a Figura 44 ilustra um mês típico de dados de vento na estação M2, mais representativa dos ventos na ponte, para o mês de julho de 2015.

A Figura 45 apresenta a rosa dos ventos para a mesma estação, considerando um ano completo de medições. Nota-se que o vento reinante (de maior frequência) é proveniente de ESE. No entanto, o vento dominante – aquele que possui maior valor do produto frequência  $\times$  quadrado da velocidade, é de ENE. A velocidade máxima registrada na estação M2 atingiu 18,73 m/s, proveniente de ENE. A Tabela 4 resume as estatísticas para as três estações meteorológicas.

Tabela 4. Estatística dos ventos medidos nas estações meteorológicas.

Estação	Código	Vento Reinante	Vento Dominante	Velocidade Máxima (m/s)
Amaralina	M1	ENE	E	16,89 de SO
Ilha de Itaparica	M2	ESE	ENE	18,73 de ENE
Ilha do Frade	M3	ESE	ESE	12,66 de ESE

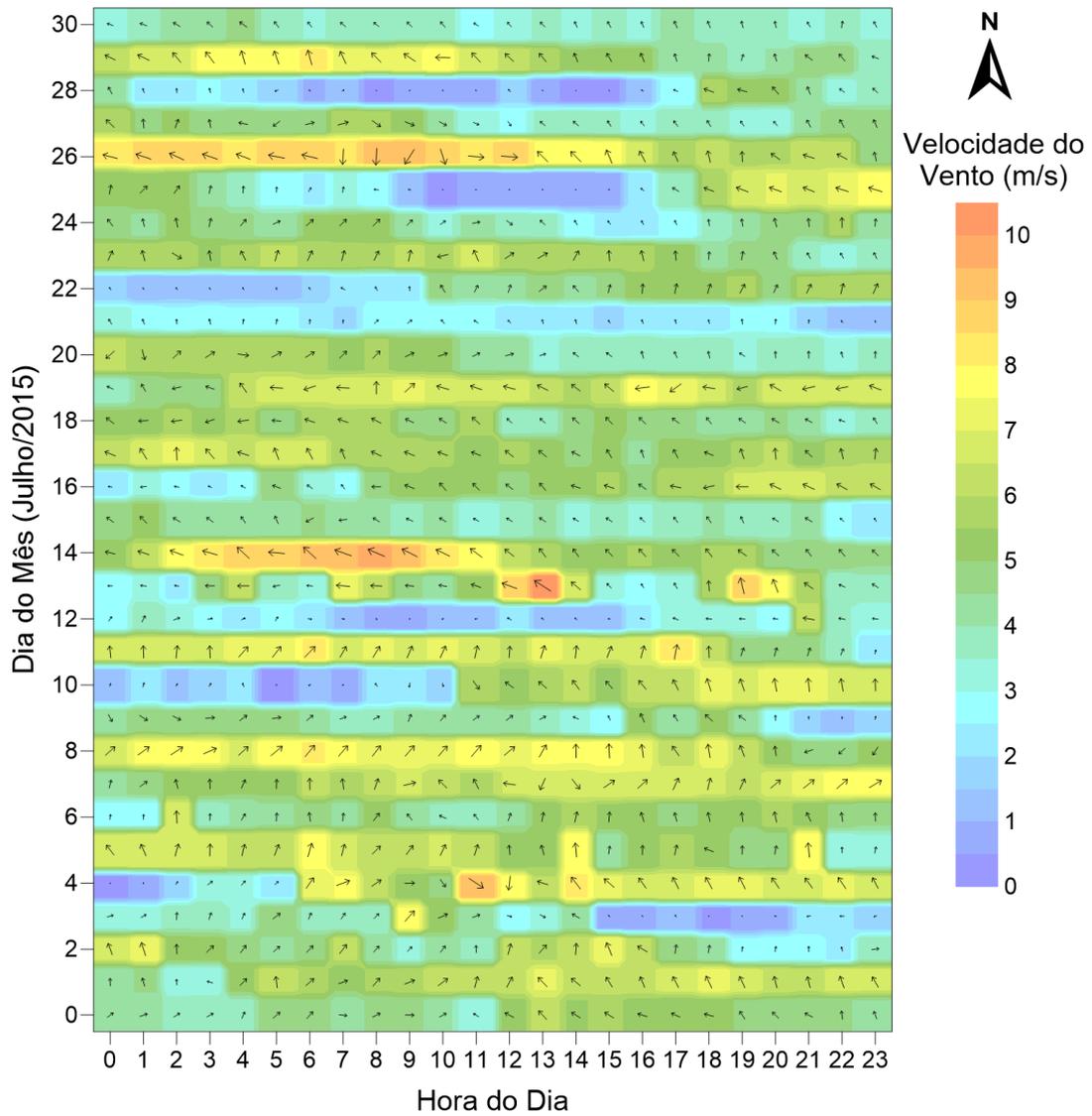


Figura 44. Ventos de julho de 2015 medidos na estação da Ilha de Itaparica (M2).

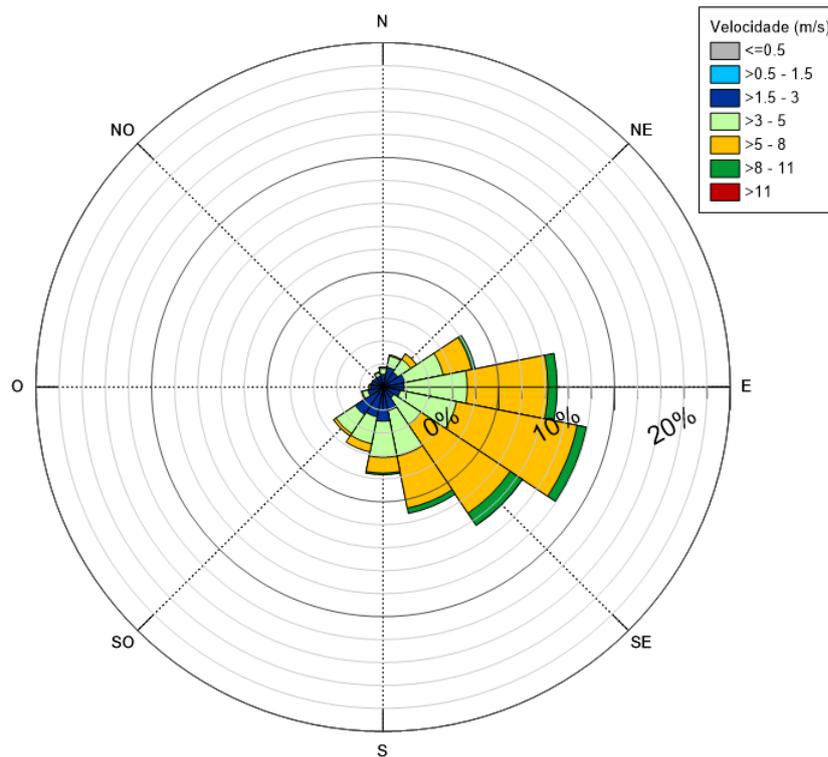


Figura 45. Estatística dos ventos na estação da Ilha de Itaparica (M2).

### 5.7.6 Dados de clima de ondas ao largo

O R2 – *Relatório de Análises Preliminares com Modelagem Computacional* apresentou uma caracterização do clima de ondas, com alturas significativas, períodos de pico e direções de propagação ao largo definidas por dados de reanálise ao longo de 60 anos, entre 1948 e 2008, cujas estatísticas são fornecidas pelo SMC-Brasil disponibilizado pelo Ministério do Meio Ambiente<sup>12</sup>.

O R12 – *Relatório de Extremos de Ondas* apresentou uma caracterização do clima de ondas para um ponto na entrada da BTS, com 32 m de profundidade. A caracterização do clima de ondas foi realizada com base em 30 anos (1980 a 2010) de reconstituição da agitação marítima, utilizando-se o modelo WW3.

Pelas condicionantes geográficas da BTS, com foco na região do eixo da Ponte, as ondas consideradas têm direção incidente entre os azimutes 180° (S) e 135°(SE) com passo de 5°, e períodos na faixa de 7 a 15s com passo de 1s. No total foram propagadas 10 direções × 9 períodos, totalizando 90 modelos de propagação de ondas.

De modo a se obter os Fatores de Amplificação de Alturas de Onda, que são definidos pela razão  $H/H_o$ , onde  $H$  é a altura da onda propagada em um dado local e  $H_o$  é a altura da onda em águas profundas, considerou-se altura unitária  $H_o = 1.0\text{m}$  para todas as ondas propagadas do largo para o interior da BTS.

<sup>12</sup> [www.mma.gov.br/gestao-territorial/gerenciamento-costeiro/smc-brasil](http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/gerenciamento-costeiro/smc-brasil)

Pelo SMC-Brasil, obteve-se os dados estatísticos apresentados nos histogramas e tabelas reproduzidos a seguir, para o ponto de Latitude = -13.4106 e Longitude = -38.3889, em águas profundas ao sul da entrada da BTS. Pelo WW3, o R12 detalha os dados estatísticos apresentados nos histogramas e tabelas reproduzidos a seguir, para o ponto de medição A1, indicado na Figura 13, ao sul da entrada da BTS. Com tais dados pode-se determinar as alturas de onda no eixo da Ponte em função de  $H/H_o$ . Nos histogramas e tabelas de alturas significativas de onda e de período de pico espectral de onda, retratando estatísticas de 60 anos de registros de reanálise de 1948 a 2008 (SMC-Brasil) e de 30 anos de registros de reanálise de 1980 a 2010 (WW3) define-se:

- Altura significativa,  $H_s$ , ou  $H_{1/3}$ , é a média do terço mais alto das ondas registradas. Por exemplo, se em um dado período forem registradas 3000 ondas, a média das alturas das 1000 ondas mais altas é a altura significativa daquele período. Tal parâmetro tem este nome por se aproximar do valor estimado a olho por observadores experientes. É um parâmetro estatístico usualmente tomado como referência em projetos de engenharia costeira e portuária.
- Período de pico espectral de ondas,  $T_p$ , é o período que corresponde ao pico do espectro de energia de um dado estado de mar. O espectro de energia é uma função de distribuição que informa a energia das ondas nos diversos períodos de onda que ocorrem em um dado estado de mar. Em geral,  $T_p$  é associado a  $H_s$ .
- Nas tabelas, os sub índices 50%, 90%, 99% correspondem a frequências acumuladas de ocorrência, por exemplo,  $H_{s50\%}$  indica o valor abaixo do qual estão 50% das alturas significativas registradas. Similarmente,  $T_{p99\%}$  indica o valor abaixo do qual estão 99% dos períodos de pico espectral de ondas registrados.
- Nas tabelas, o sub índice 12h indica o valor máximo de média móvel com período de 12h ao longo de todo o registro da série temporal de dados. Por exemplo,  $H_{s12h}$  indica o máximo valor de altura significativa promediada por períodos de 12h em todo o registro. No caso de um registro de 60 anos, o período de 12h corresponde a 0.0023%, ou seja, 99,77% das ondas registradas teriam altura significativa inferior a  $H_{s12h}$ .

O clima de ondas reconstituído com ambas as técnicas apresentou dados bastante similares, conforme pode ser visto nas figuras e tabelas a seguir. Isso é um indicativo de que a representação do clima de ondas para a região está adequada.

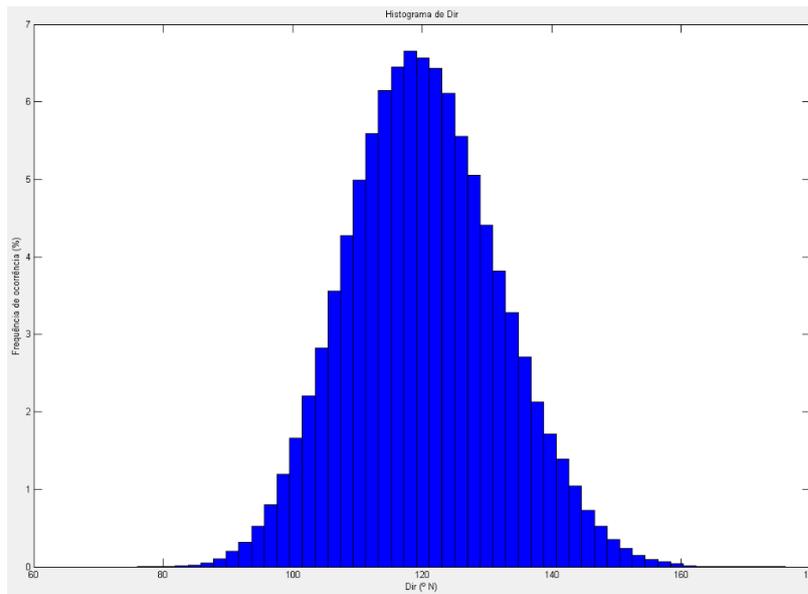


Figura 46. Histograma de direções de incidência de ondas reconstituídas através do SMC-Brasil. O eixo horizontal indica os azimutes das direções (N = 0°, E = 90°, S = 180° e W = 270°).

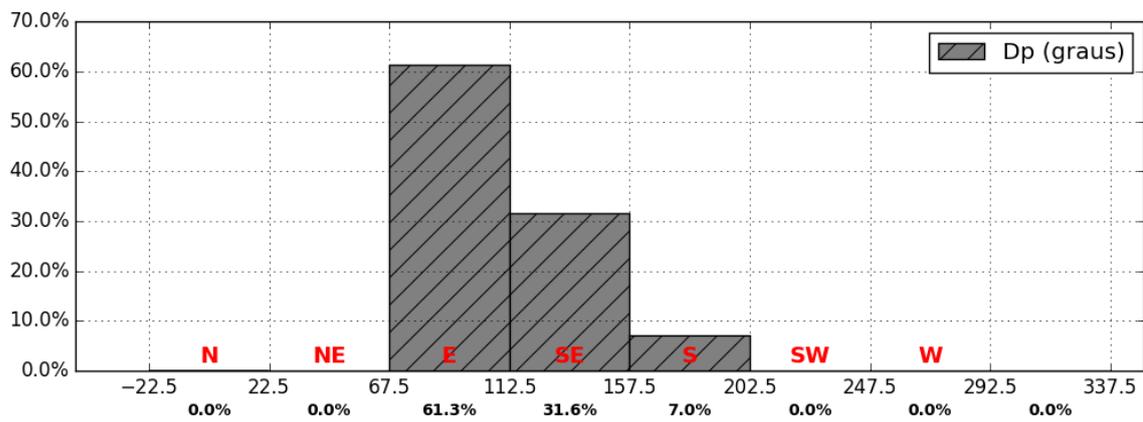


Figura 47. Histograma de direções de incidência de ondas reconstituídas através do modelo WW3.

Tabela 5. Estatísticas de alturas significativas de onda,  $H_s$ , reconstituídas através do SMC-Brasil.

Direção	Prob. Dir (%)	$H_{s50\%}$	$H_{s90\%}$	$H_{s99\%}$	$H_{s12h}$
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	1.2125	1.2229	1.2229	1.2229
E	0.0464	1.4742	1.9232	2.3779	2.6957
ESE	0.5809	1.5318	2.1197	2.7333	3.1567
SE	0.3566	1.5795	2.1713	2.7816	3.2043
SSE	0.0160	1.6680	2.2781	2.9235	3.2799
S	0.0000	1.0278	1.8117	1.8224	1.8224
SSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

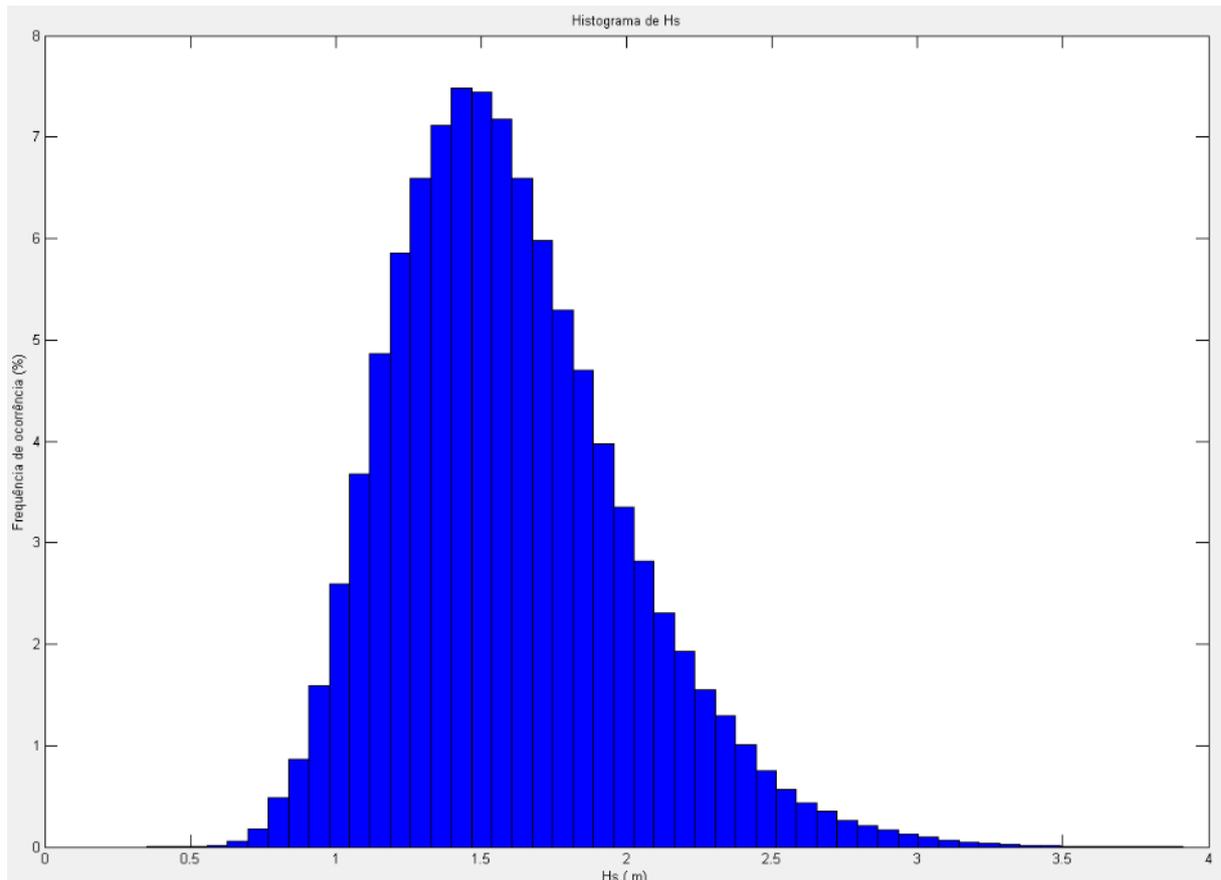


Figura 48. Histograma de alturas significativas de ondas reconstituídas através do SMC-Brasil.

Tabela 6. Estatísticas de alturas significativas de onda, Hs em metros, no ponto de medição do ADCP A1, reconstituídas através do modelo WW3.

<b>Estatística</b>	<b>NE</b>	<b>E</b>	<b>SE</b>	<b>S</b>	<b>SW</b>
<b>Média</b>	0,00	1,22	1,34	1,22	0,00
<b>Percentil 90%</b>	0,00	1,59	1,92	1,72	0,00
<b>Percentil 99%</b>	0,00	2,11	2,60	2,46	0,00
<b>Máximo</b>	0,00	2,88	3,79	3,67	0,00

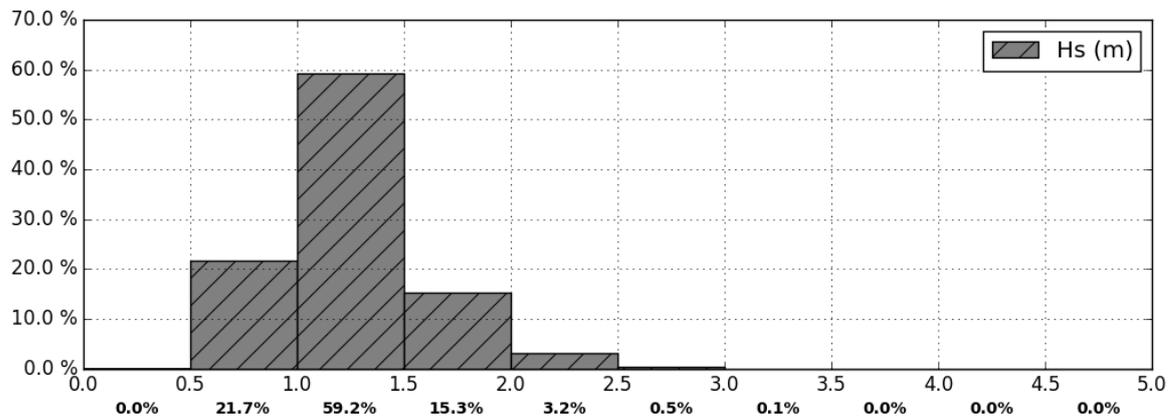


Figura 49. Histograma de alturas significativas de ondas no ponto indicado na Figura 13 - sul da entrada da BTS, reconstituídas através do modelo WW3.

Tabela 7. Estatísticas de períodos de pico espectral de ondas,  $T_p$ , reconstituídas através do SMC-Brasil.

Direção	Prob. Dir (%)	$T_{P50\%}$	$T_{P90\%}$	$T_{P99\%}$	$T_{P12T}$
NE	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ENE	0.0000	5.3838	5.4200	5.4200	5.4200
E	0.0464	8.0410	9.4869	10.4156	11.1013
ESE	0.5809	7.5148	9.2575	10.5990	11.6052
SE	0.3566	6.9657	9.2791	11.8824	13.3332
SSE	0.0160	8.6803	12.3017	14.0325	14.6295
S	0.0000	5.2485	7.6162	10.7678	10.7678
SSW	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

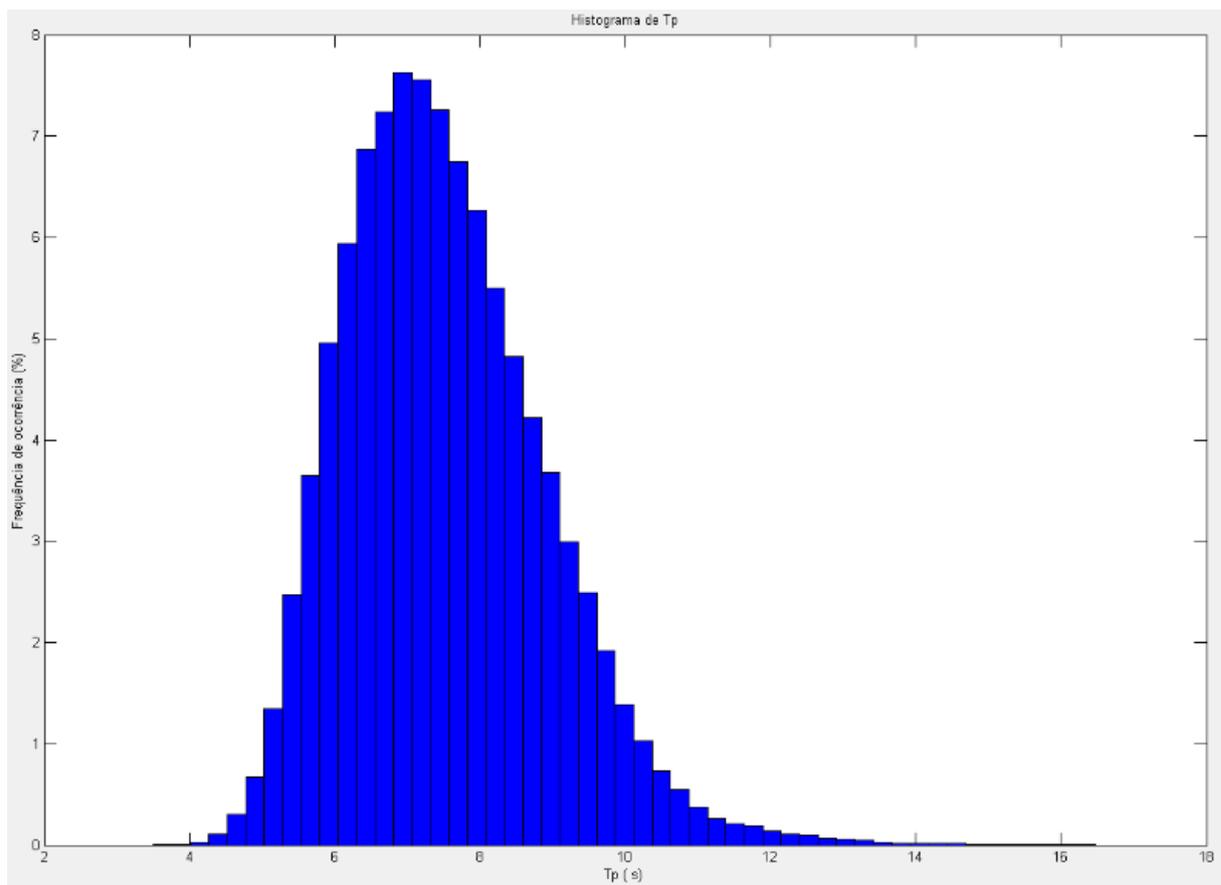


Figura 50. Histograma de períodos de pico espectral de ondas reconstituídas através do SMC-Brasil.

Tabela 8. Estatísticas de período de pico de onda,  $T_p$  em segundos, no ponto de medição do ADCP01, reconstituídas através do modelo WW3.

Estatística	NE	E	SE	S	SW
<b>Média</b>	0,0	8,1	9,7	12,6	0,0
<b>Percentil 90%</b>	0,0	9,2	12,7	14,8	0,0
<b>Percentil 99%</b>	0,0	10,2	16,5	17,0	0,0
<b>Máximo</b>	0,0	12,3	19,6	19,7	0,0

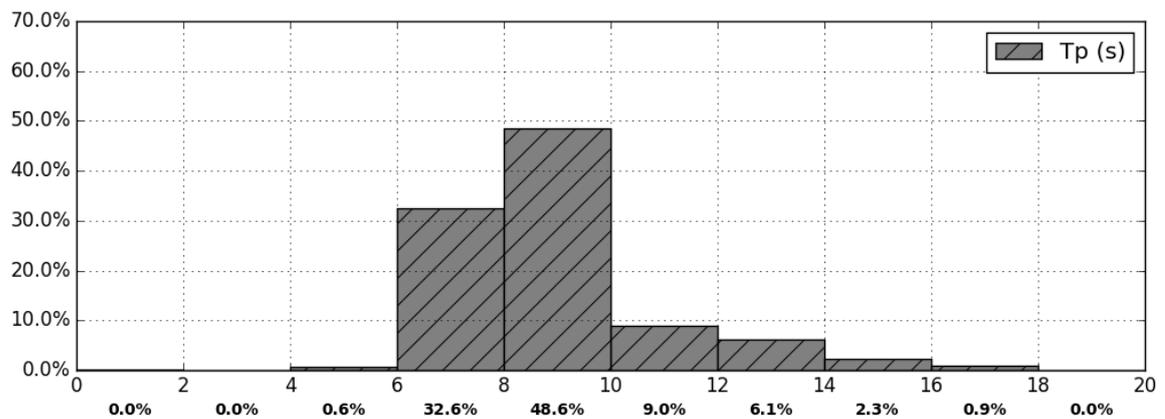


Figura 51. Histograma de períodos de pico espectral de ondas no ponto indicado na Figura 13 - sul da entrada da BTS, reconstituídas através do modelo WW3.

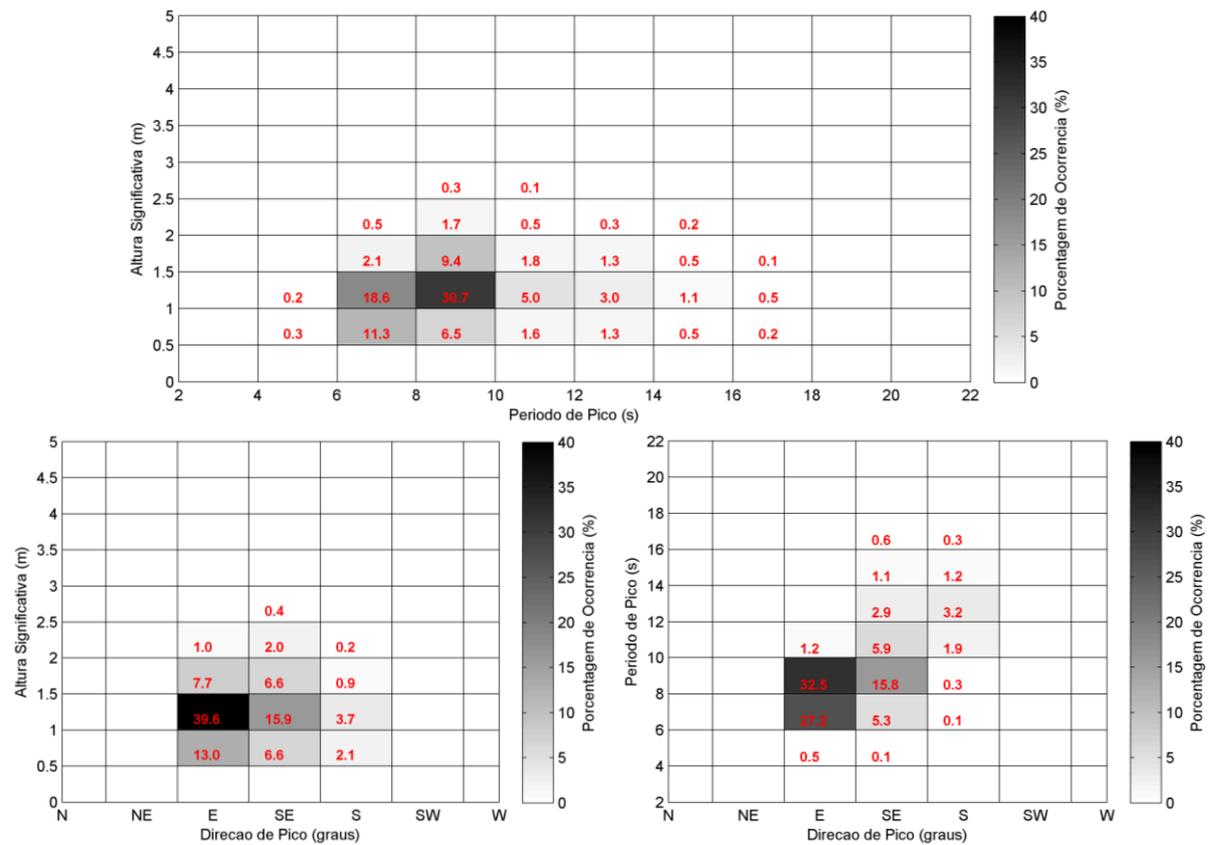


Figura 52: A) Histograma de distribuição conjunta de Hs e Tp; B) Histograma de distribuição conjunta de Hs e Dp; e C) Histograma de distribuição conjunta de Tp e Dp para o ponto de medição do ADCP A1 durante todo o período simulado (1980 a 2010), reconstituído através do modelo WW3.

## 5.8 Condições iniciais e condições de contorno dos modelos

Os modelos hidrodinâmicos e de processos sedimentológicos necessitam de condições de contorno e de condições iniciais para serem rodados. Amplos detalhes sobre especificação de condições de contorno nos diversos modelos está disponível em [www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br), na Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup>. O que segue é uma adaptação com explicações gerais.

As condições iniciais do modelo hidrodinâmico correspondem a se especificar valores de elevação de nível de água e correntes em todos os pontos do domínio de modelagem. No caso do modelo de transporte de sedimentos especifica-se como condição inicial a distribuição granulométrica e a espessura erodível em cada ponto do domínio.

Para o problema de circulação hidrodinâmica e transporte de sedimentos, é necessário o estabelecimento de condições de contorno para o campo de velocidades, elevação da superfície livre da água e fluxos de sedimentos cruzando as fronteiras.

Tomando a Figura 53 como referência, a imposição da elevação da superfície livre, ou níveis de água, é geralmente o principal forçante prescrito ao longo dos **contornos abertos**,  $\Gamma_1$ . Contornos abertos representam limites de conveniência do domínio de modelagem, por exemplo a entrada de uma baía ou estuário, e não um contorno físico.

Os **contornos de terra**,  $\Gamma_2$ , representam margens e seções de rios ou canais que estejam incluídos no domínio de modelagem. Imposição de valores de vazões ou velocidades são geralmente prescritas ao longo de  $\Gamma_2$ . A Figura 53 ilustra os dois tipos de contorno.

No caso de modelos de transporte de sedimentos, ou processos sedimentológicos, ao longo de todos os contornos são prescritos condicionantes de vazão sólida, ou fluxo de sedimentos (veja seção 5.5.5).

Além dos contornos horizontais ilustrados na Figura 53, quando o escoamento 3D estiver sendo resolvido, devem ser consideradas também condições de contorno na superfície livre e no fundo. A condição de contorno no fundo é a imposição de velocidade nula. No limite superior da coluna de água, i.e. na superfície livre, a condição usual é a prescrição da tensão do vento.

Para corpos de água rasos, como na Figura 53 e na BTS, para se evitar efeitos de camada limite<sup>13</sup>, a condição de contorno típica em fronteiras de terra é a especificação da componente da velocidade ( $U_N$ ) ou de fluxo ( $Q_N$ ) normal, i.e. transversal, ao contorno. E a condição típica em contornos abertos é a prescrição da elevação da superfície livre ao longo do contorno aberto em qualquer instante. Porém, dependendo da situação de escoamento vigente, são necessárias condições adicionais para definir um problema bem posto, Dauber e Graffe (1967).

A seguir, a Tabela 9 resume o número de condições de contorno necessárias para se definir adequadamente um problema hidrodinâmico, segundo Verboom et al (1982).

---

<sup>13</sup> Os efeitos de camada limite ocorreriam se a condição de velocidade nula fosse especificada em contornos terrestres. Neste caso, uma discretização refinada próximo ao contorno terrestre seria necessária para capturar o perfil horizontal de velocidade.

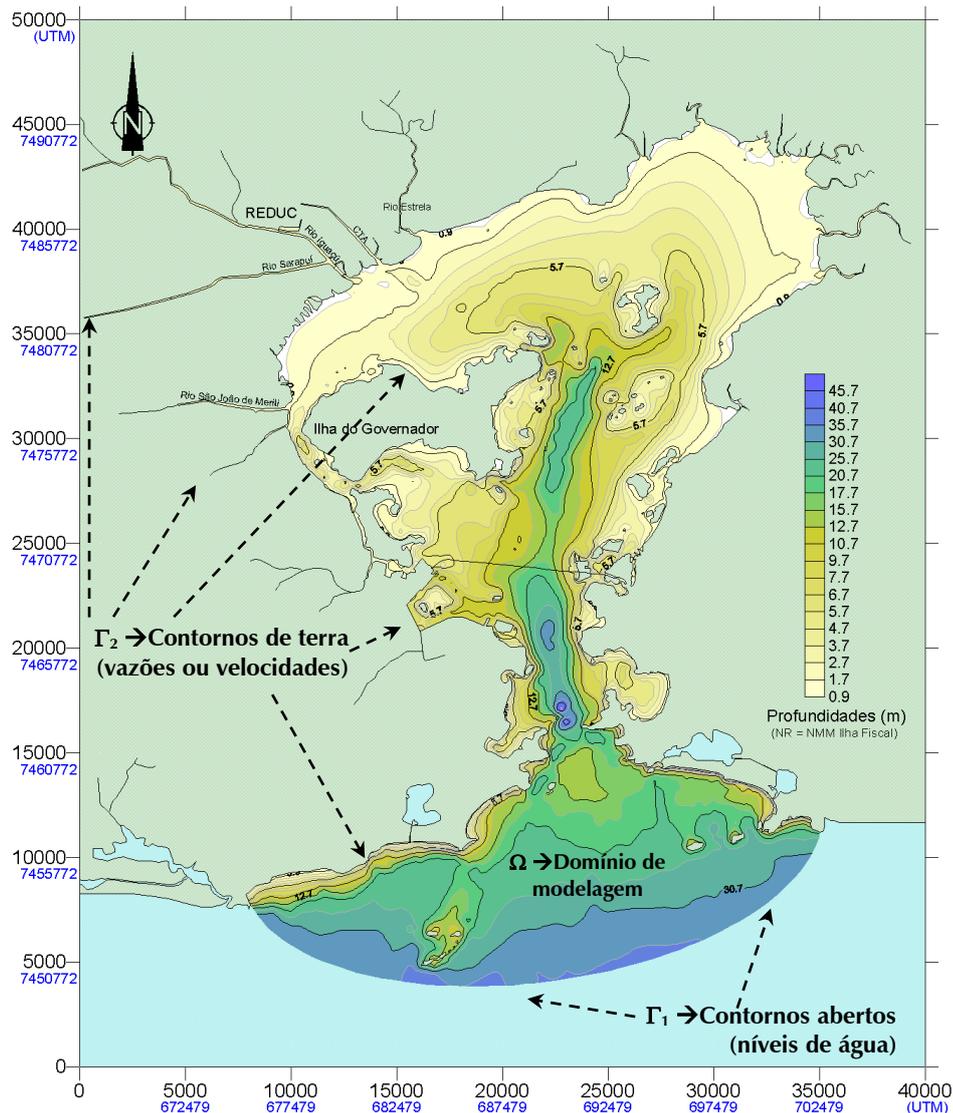


Figura 53. Exemplo de um domínio de modelagem ( $\Omega$ ) para a Baía de Guanabara. Nos contornos de terra,  $\Gamma_2$ , representando margens e seções de rios impõe-se condições de vazões ou velocidades. Os contornos abertos,  $\Gamma_1$ , não representam limites físicos, mas limites de água no domínio de modelagem, ao longo dos quais se impõe condições de níveis de água.

Tabela 9. Número de condições de contorno necessárias para se definir adequadamente um problema hidrodinâmico.

Situação da Velocidade Normal à Fronteira ( $U_N$ )	Escoamentos Subcríticos	Escoamentos Supercríticos
	$U_N \leq \sqrt{gH}$	$U_N > \sqrt{gH}$
Afluxo ( $U_N < 0$ )	2	3
Efluxo ( $U_N > 0$ )	1	0
Sem escoamento ( $U_N = 0$ )	1	1

Na classe de problemas encontrados em aplicações ambientais típicas, contornos com afluxos sob condições de escoamento supercrítico são raros. No caso da BTS não há tais casos. Quando

situações de afluxos subcríticos ocorrem, em contornos de terra ou abertos, é necessária a prescrição de duas condições. Nesse caso, a condição adicional usual é a prescrição de velocidade tangencial nula no ponto de afluxo. Em situações de afluxo em escoamentos supercríticos, são necessárias três condições, e além do estabelecimento da velocidade tangencial nula, deve-se especificar o nível de água.

A razão pela qual são necessárias mais condições em situações de afluxo, como se vê na Tabela 9, está no fato do modelo desconhecer a direção do escoamento que entra no domínio, quando apenas a componente normal é fornecida. Em situações de efluxo, a direção é obviamente conhecida, pois o escoamento sai do domínio com a direção que tem.

As condições iniciais e de contorno foram as mesmas para os modelos hidro-sedimentológicos das situações atual e projetada. Para os modelos hidrodinâmicos, a Figura 54 e a Figura 55 apresentam respectivamente as condições iniciais de elevação de NA e de velocidades de correntes.

Para os modelos de transporte de sedimentos, as condições iniciais de distribuição granulométrica de fundo estão apresentadas nos mapas da Figura 40. Como condição inicial de espessura erodível,  $E$ , adotou-se  $E = 5$  m em praticamente todo o domínio, exceto nos poucos locais para os quais há indicação do fundo ser rochoso ou duro, onde adotou-se  $E = 0$ m.

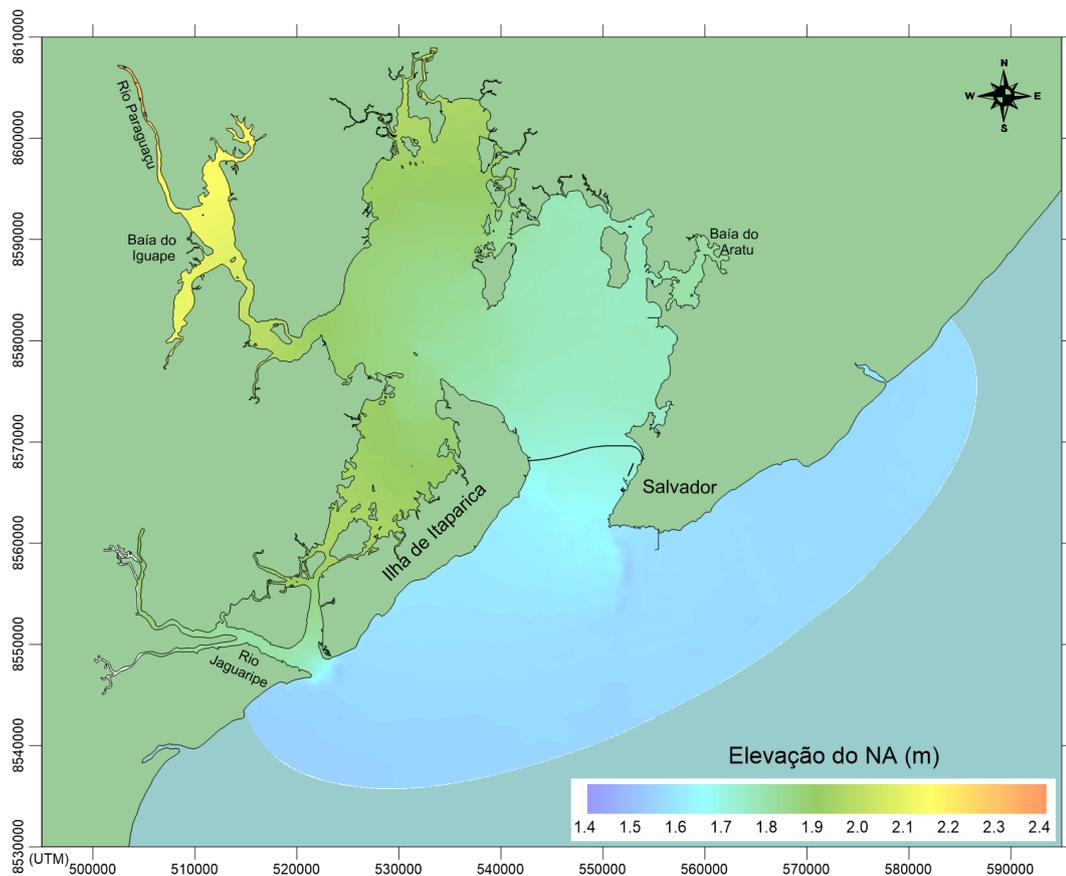


Figura 54. Condições iniciais de elevação de nível de água, NA, nas modelagens hidro-sedimentológicas.

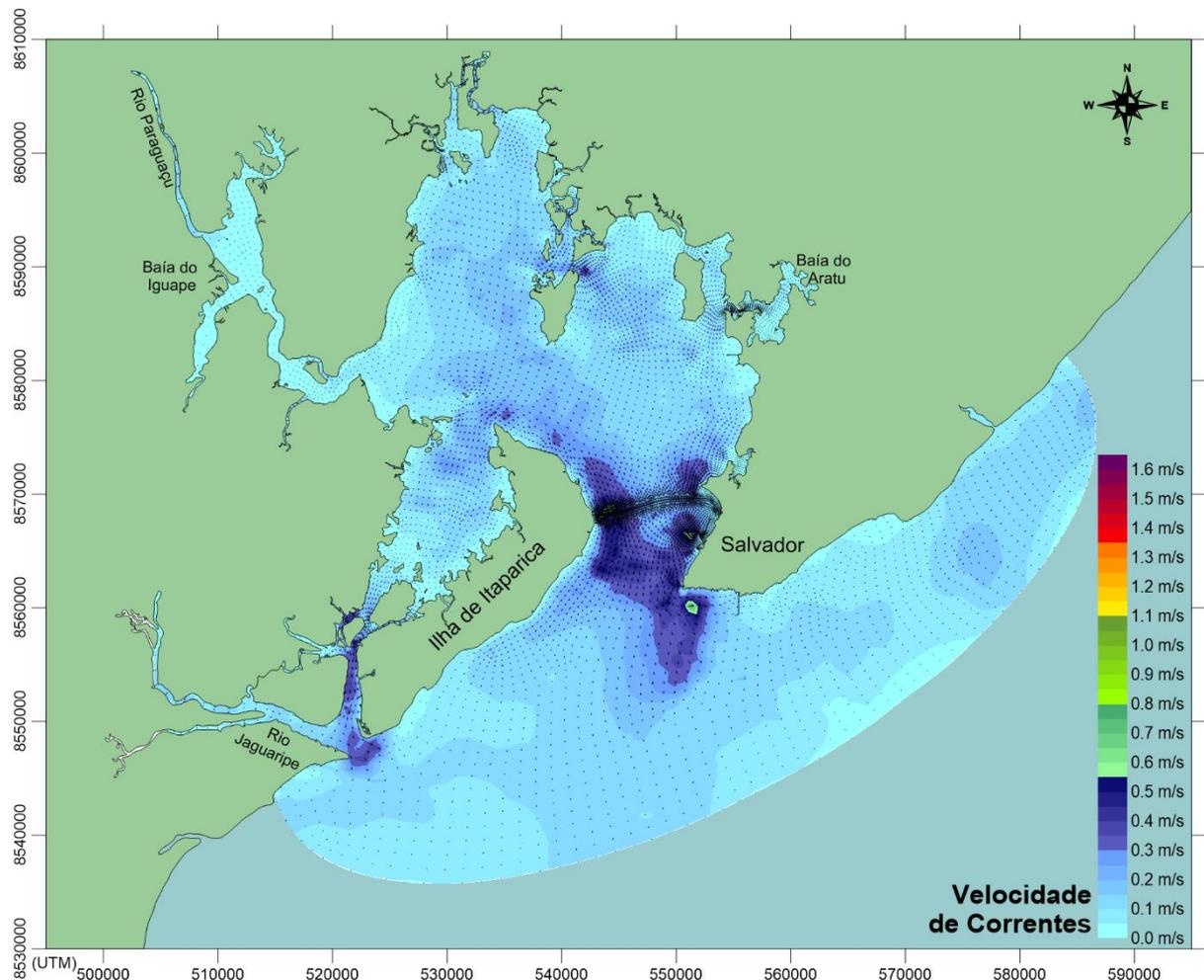


Figura 55. Condições iniciais de velocidades promediadas na vertical nas modelagens hidro-sedimentológicas.

#### Condições de contorno de terra adotadas:

- Para os modelos hidrodinâmicos, impôs-se fluxo normal nulo nas margens e vazões fluviais nas seções de rios conforme indicadas na Figura 41. Os afluxos de rios em seções transversais estuarinas, todas exceto a de jusante de montante do rio Paraguaçu, adotaram a condição tipo 9 que simula as vazões de enchente e vazante de maré somadas às vazões fluviais. Para detalhes veja seção 3.7. *Imposição das condições iniciais e de contorno* e subseção 3.7.6. *Tipos de condições para nós de contorno terrestre* na Referência Técnica do SisBaHiA® ([www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br)).
- Para os modelos de transporte de sedimentos, impôs-se vazão sólida de equilíbrio em todos os contornos de terra. Tal condição impõe que o transporte de sedimentos normal às seções de contorno é igual à capacidade de transporte da componente normal do fluxo hidrodinâmico. Para detalhes veja seção 4.1.6. *Sobre as condições de contorno no modelo de transporte de sedimentos* na Referência Técnica do SisBaHiA®.

#### Condições de contorno aberta adotadas:

- Para os modelos hidrodinâmicos, foram prescritos níveis de água ao longo dos pontos de contorno. Os níveis foram ajustados a partir dos registros de maré no Porto de Sal-

vador. Os valores transferidos do Porto para as fronteiras abertas tiveram um adiantamento de fase de 1200s e um fator de escala de 0.875 para amplitudes. Ao longo da fronteira aberta, os pontos tinham defasagem progressiva de Oeste para Leste, estando adiantados em aproximadamente 4 minutos na extremidade Oeste em relação à Leste. Detalhes estão descritos na seção 3.7 *Imposição das condições iniciais e de contorno* na Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup> ([www.sisbahia.coppe.ufrj.br](http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br)).

- Para os modelos de transporte de sedimentos, impôs-se vazão sólida de equilíbrio em todos os contornos abertos. Tal condição impõe que o transporte de sedimentos normal às seções de contorno é igual à capacidade de transporte da componente normal do fluxo hidrodinâmico. Para detalhes veja seção 4.1.6. *Sobre as condições de contorno no modelo de transporte de sedimentos* na Referência Técnica do SisBaHiA<sup>®</sup>.

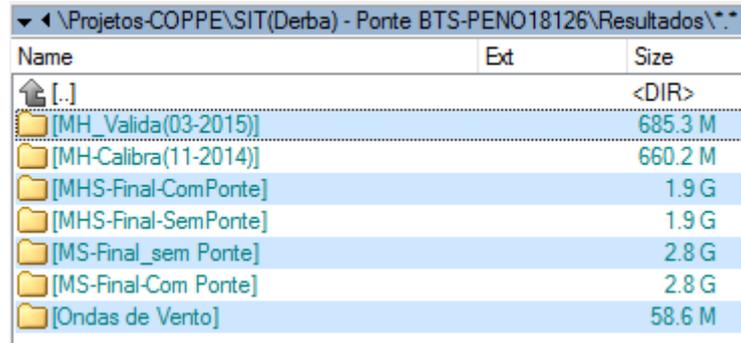
## 6 Análise de resultados obtidos

Este relatório final consolidou os resultados apresentados no R2 – *Relatório de Análises Preliminares com Modelagem Computacional*, confirmando que a circulação hidrodinâmica e o transporte de sedimentos na BTS são pouco afetados pela construção da ponte, exceto em suas cercanias. Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos de modelos calibrados e validados (vide R9 – *Relatório sobre Calibração de Modelos* e R11 – *Relatório de Validação de Modelos*), com dados atuais de medição, conforme apresentados nos relatórios R4 – *Caracterização Sedimentológica I*, R6 – *Relatório de Medições Maregráficas Equinócio Março de 2015*, R8 – *Relatório de Caracterização Sedimentológica II*, R10 – *Relatório de Medições Maregráficas Inverno de 2015*, R12 – *Relatório de Extremos de Ondas* e R13 – *Relatório de Medições de Ventos, Correntes e Ondas*.

Seguindo o padrão de análises do R2, esta seção apresenta os resultados obtidos com as modelagens hidro-sedimentológicas na ordem a seguir. Entretanto, ressalta-se que o ítem 1 representa as análises feitas para o R2. Isto porque, como os resultados dos modelos obtidos na fase preliminar e final foram muito similares, não se considerou necessário refazer tais análises. Destaca-se que o R2, embora feito em fase preliminar, utilizou dados de projetos pretéritos para a região, os quais foram também calibrados e validados, sendo assim considerados como uma base de dados confiável e realista para a área de interesse.

1. Caracterização da circulação hidrodinâmica com a ponte com foco na região da ponte.
2. Análises comparativas com e sem a ponte de padrões de circulação e de persistência de tensões no fundo com magnitude suficiente para mobilizar diferentes classes de sedimentos.
3. Análises comparativas de processos sedimentológicos com e sem a ponte, indicando tendências de assoreamento e erosão.
4. Análises sobre alturas de ondas que poderão atingir as estruturas da ponte

Nota: Todos os mapas e gráficos apresentados nesta seção retratam instantes ou condições selecionadas para ilustrar as análises. Destaca-se que há milhares de resultados ao longo dos períodos simulados, para os quais se pode produzir mapas e gráficos. Todos os resultados estão à disposição, e pode-se produzir outros mapas e gráficos conforme solicitação. Para dar uma ideia da quantidade de resultados, a imagem abaixo lista os diretórios de resultados dos diversos modelos com respectivos tamanhos, totalizando 10.8 Gigabytes.



Name	Ext	Size
[.]		<DIR>
[MH_Valida(03-2015)]		685.3 M
[MH-Calibra(11-2014)]		660.2 M
[MHS-Final-ComPonte]		1.9 G
[MHS-Final-SemPonte]		1.9 G
[MS-Final_sem Ponte]		2.8 G
[MS-Final-Com Ponte]		2.8 G
[Ondas de Vento]		58.6 M

## 6.1 Caracterização da circulação hidrodinâmica com a ponte

As análises apresentadas nesta seção atenderam à solicitação feita em agosto de 2014 pelo Eng. Durtal Feitosa da empresa Enescil. Seguem mapas e gráficos detalhando campos de correntes típicos de marés de quadratura e de sizígia. As datas de referência são do início do mês de setembro de 2014. Tais resultados são uma rerepresentação do que está no *R2 – Relatório de Análises Preliminares com Modelagem Computacional*. Conforme apresenta-se nos demais subitens do capítulo 6, os resultados obtidos neste **R14** foram muito similares aos apresentados no *R2*, de modo que não se considerou necessário refazer as análises desta seção para o **R14**.

A Figura 56 mostra os níveis de maré no período e indica com marcas azuis os instantes para os quais se mostra mapas de magnitudes de correntes e zoom do campo de correntes ao longo da ponte. Nas imagens de zoom, estão indicadas as estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3, para as quais se mostra os perfis verticais de velocidade nos mesmos instantes dos mapas.

Nos gráficos de perfis verticais, são apresentadas as componentes Leste-Oeste (U) e Norte-Sul (V) das correntes. Os sentidos Leste e Norte são positivos e Oeste e Sul negativos. Na legenda dos gráficos aparece a altura da coluna de água ( $H$ ) para cada estação no instante considerado.

As imagens e gráficos a seguir são em alta resolução e permitem zoom com qualidade adequada. Imagens em maior detalhe ou em outros instantes estão disponíveis por solicitação.

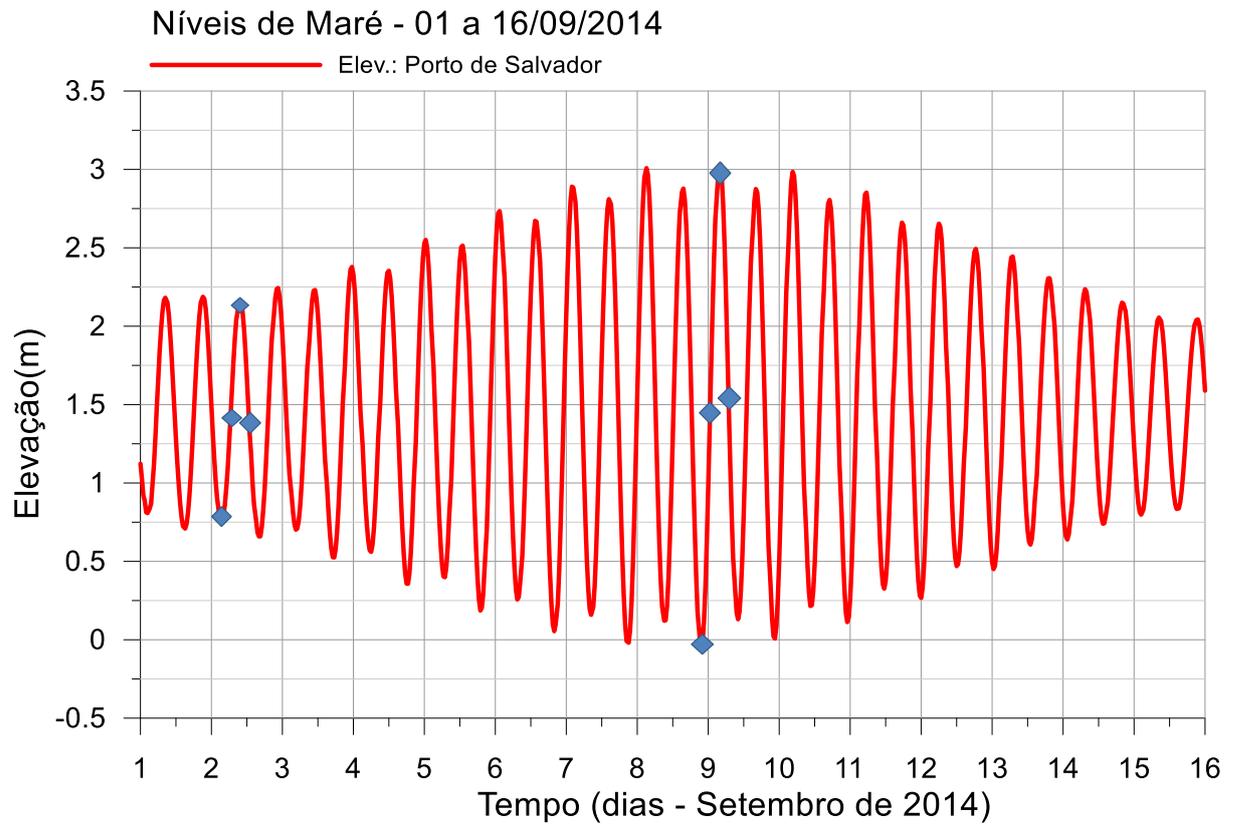


Figura 56. Níveis de maré no Porto de Salvador de 01 a 16 de Setembro de 2014. As marcas azuis no ciclo de quadratura do dia 02/09, e no ciclo de sizígia do dia 09/09, indicam instantes de baixamar, meia maré enchente, preamar e meia maré vazante. Os mapas de correntes a seguir representam tais instantes.

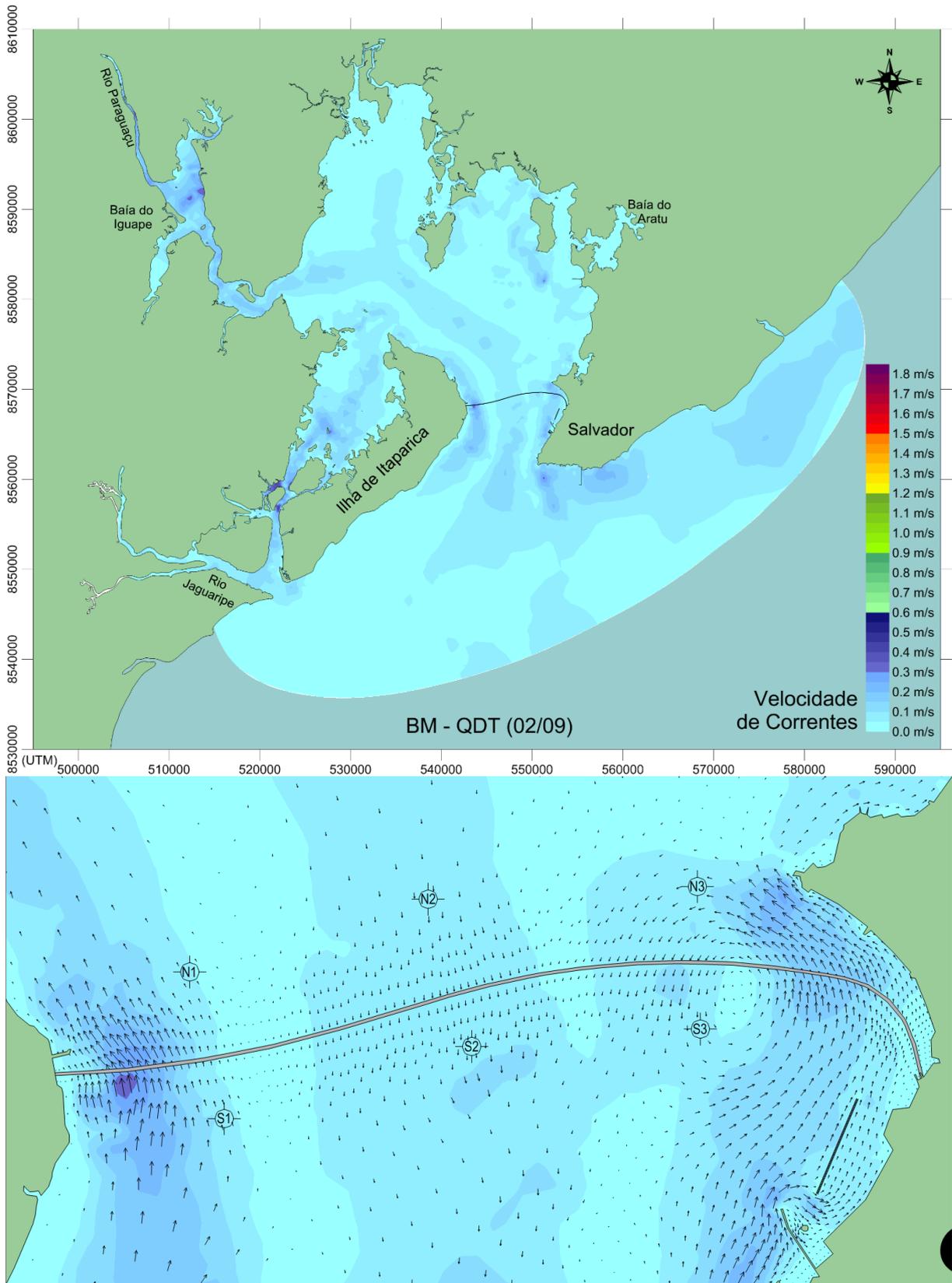


Figura 57. Correntes promediadas na coluna de água em baixamar de quadratura no dia 02/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte. O gráfico seguinte mostra perfis verticais de velocidades nas estações indicadas no zoom.

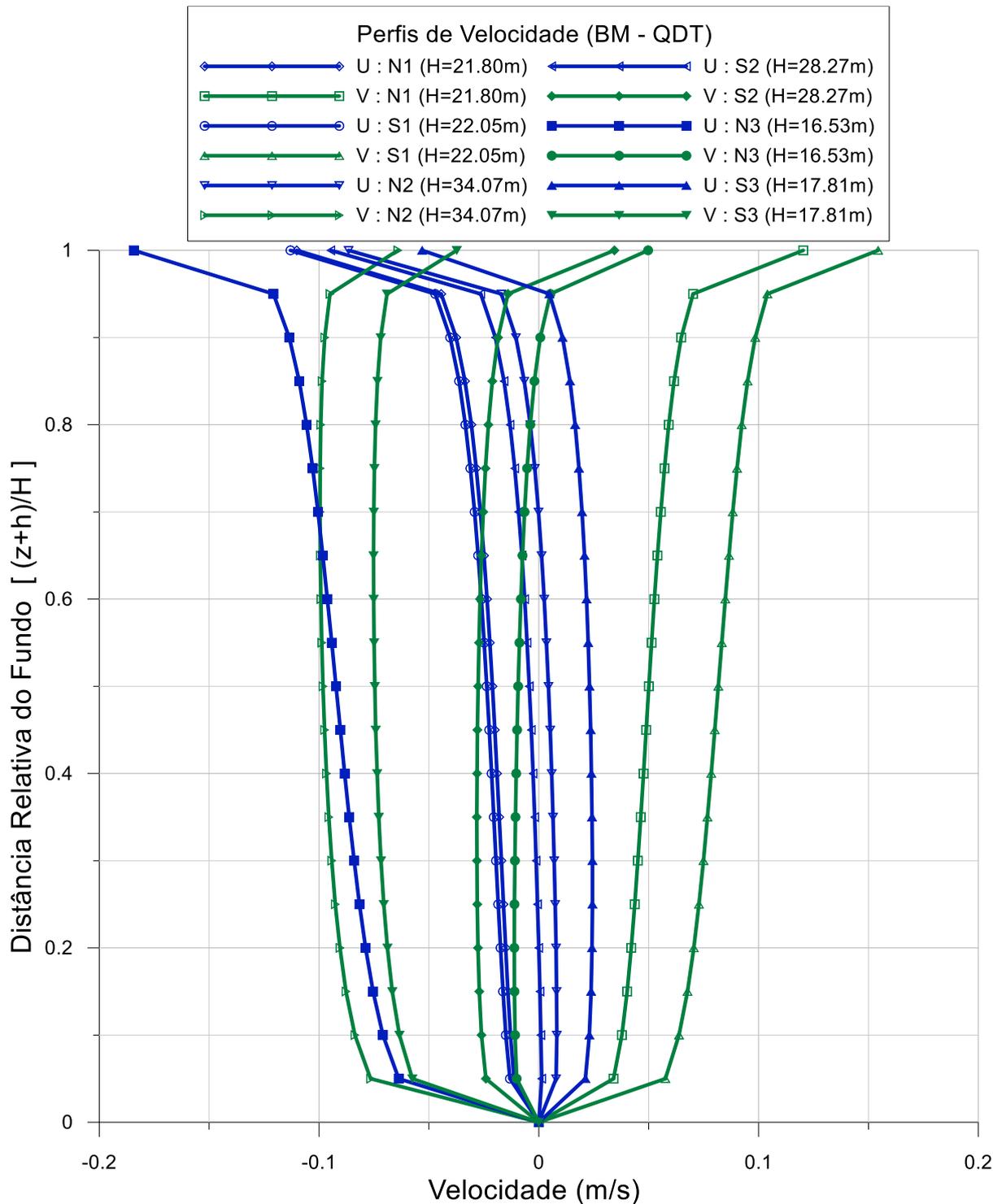


Figura 58. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de correntes em baixamar de quadratura. U = componente L-O e V = componente N-S.

No topo da coluna de água nota-se o efeito do arraste do vento na superfície livre. Pela forma dos perfis, verifica-se que as correntes médias na vertical mostradas nos mapas são bem representativas.

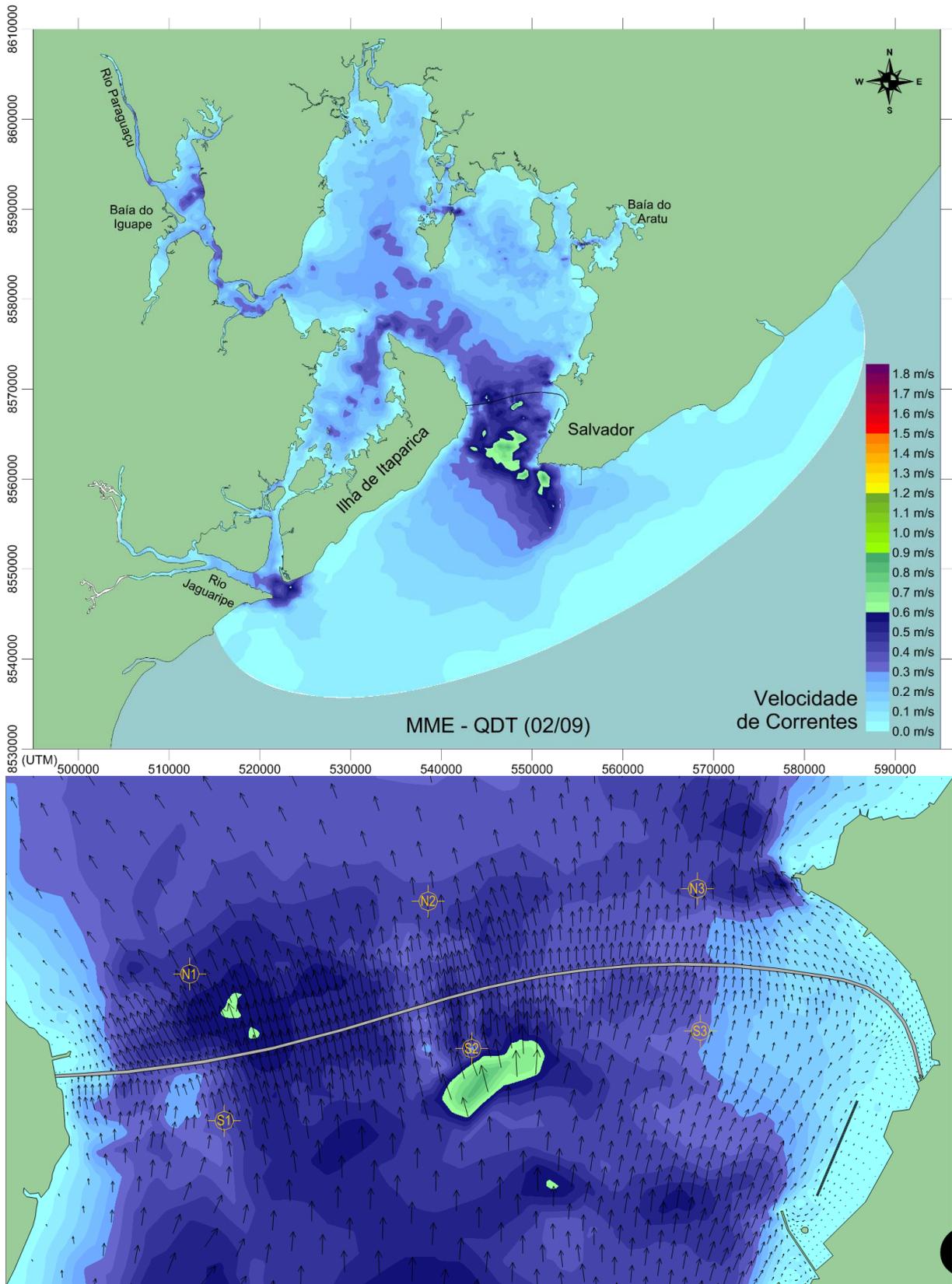


Figura 59. Correntes promediadas na coluna de água em meia maré enchente de quadratura no dia 02/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte. O gráfico seguinte mostra perfis verticais de velocidades nas estações indicadas no zoom.

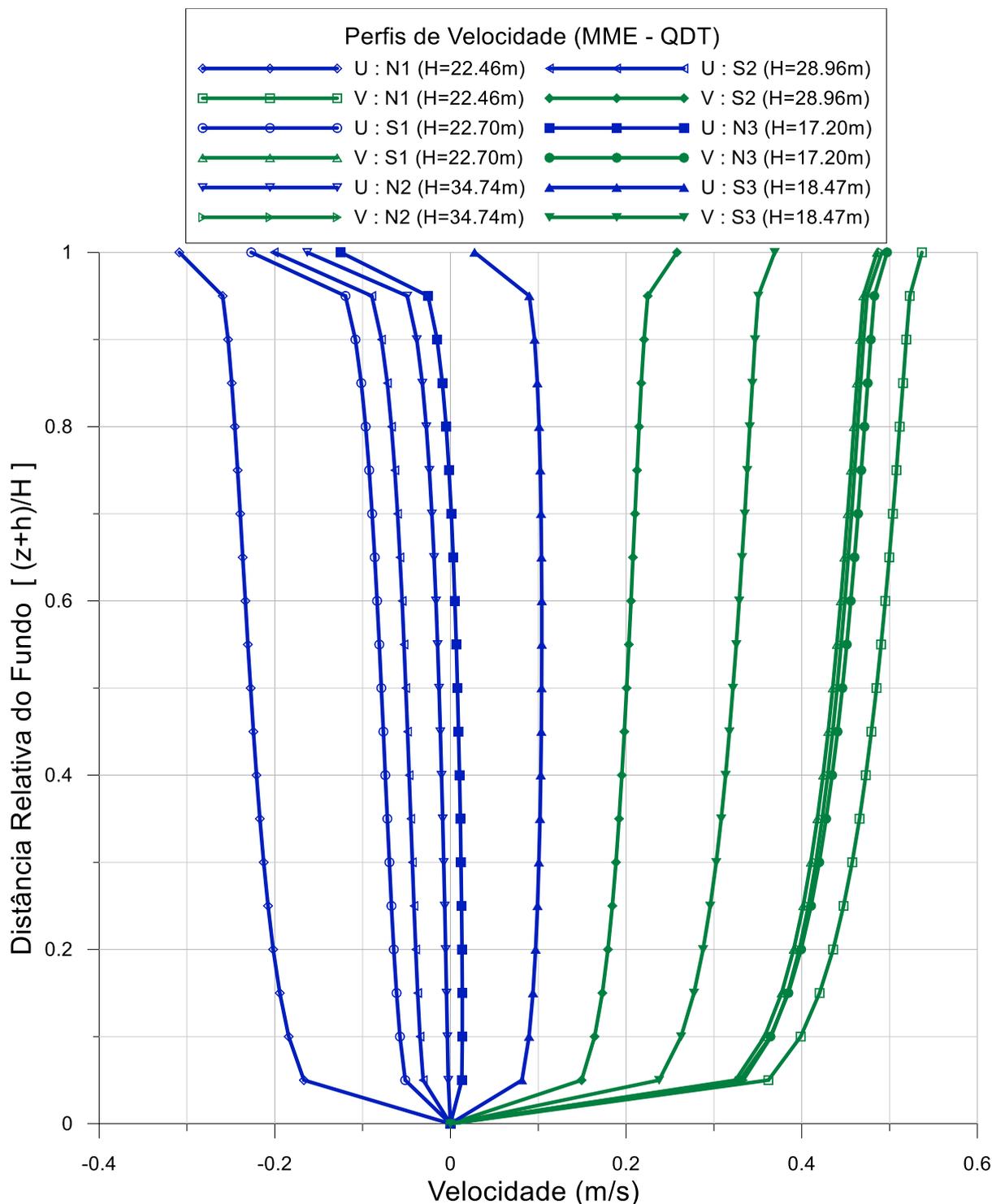


Figura 60. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de correntes em meia maré enchente de quadratura. U = componente L-O e V = componente N-S.

No topo da coluna de água nota-se o efeito do arraste do vento na superfície livre. Pela forma dos perfis, verifica-se que as correntes médias na vertical mostradas nos mapas são bem representativas.

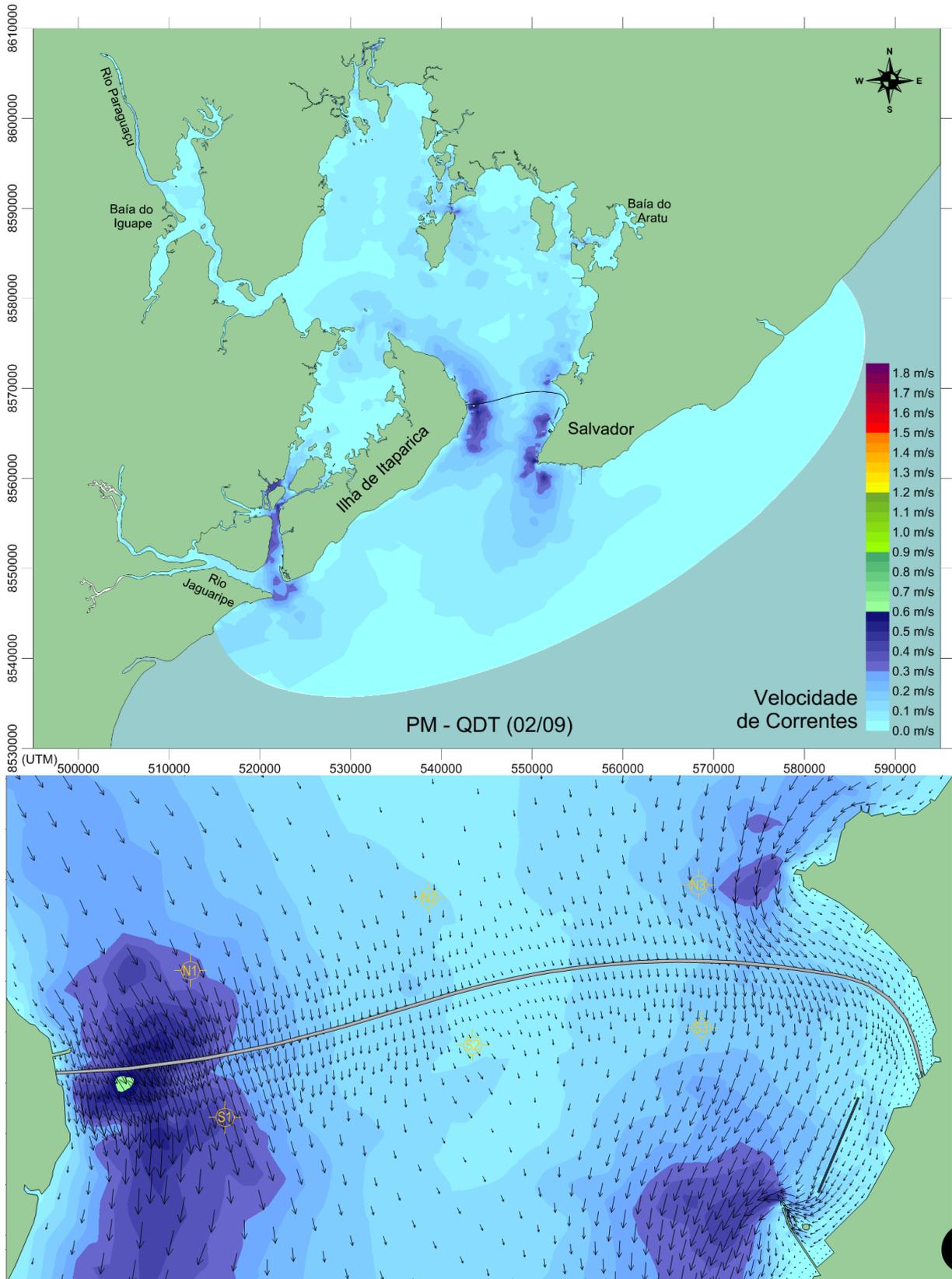


Figura 61. Correntes promediadas na coluna de água em preamar de quadratura no dia 02/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte. O gráfico seguinte mostra perfis verticais de velocidades nas estações indicadas no zoom.

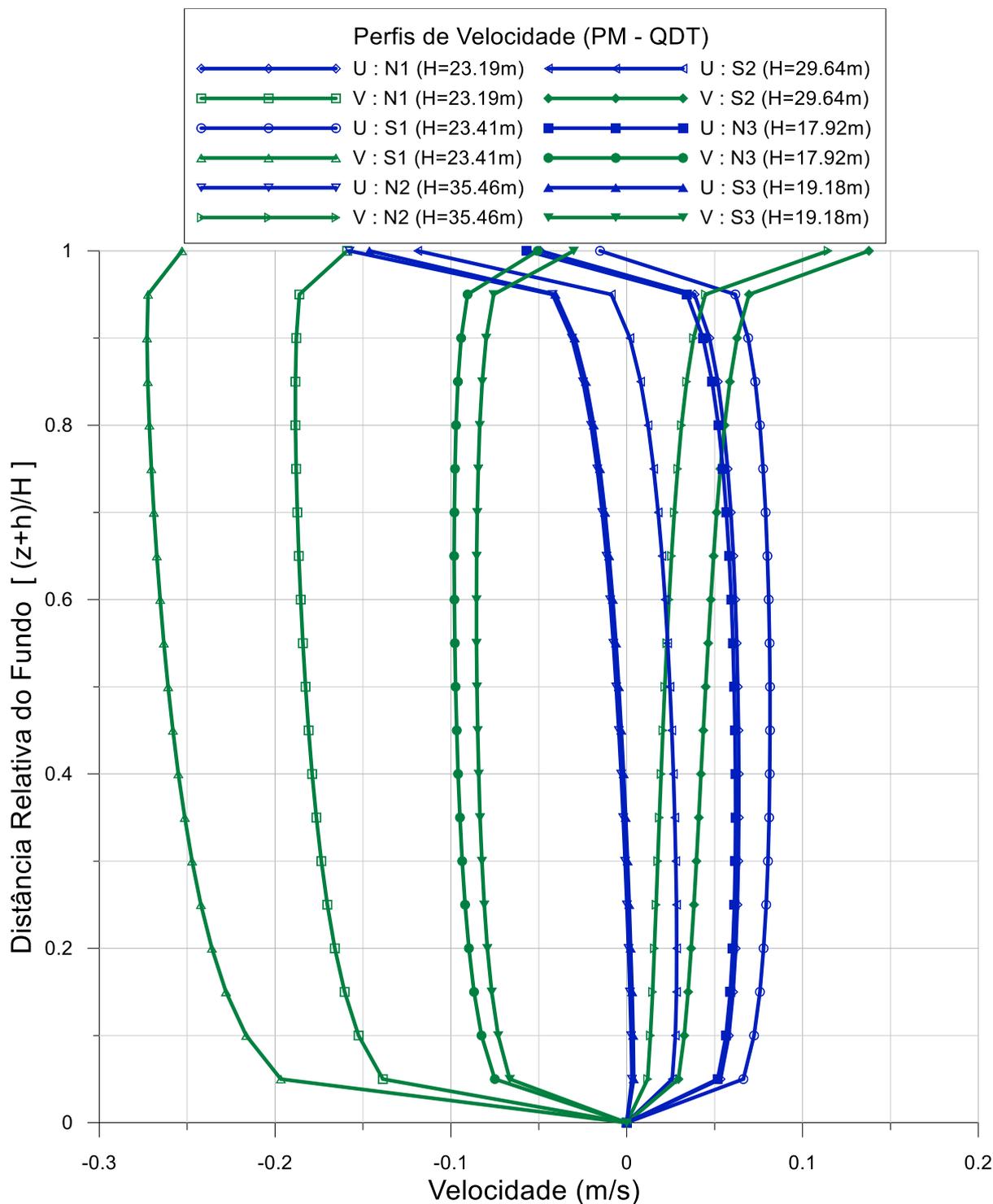


Figura 62. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de corrente em preamar de quadratura. U = componente L-O e V = componente N-S.

No topo da coluna de água nota-se o efeito do arraste do vento na superfície livre. Pela forma dos perfis, verifica-se que as correntes médias na vertical mostradas nos mapas são bem representativas.

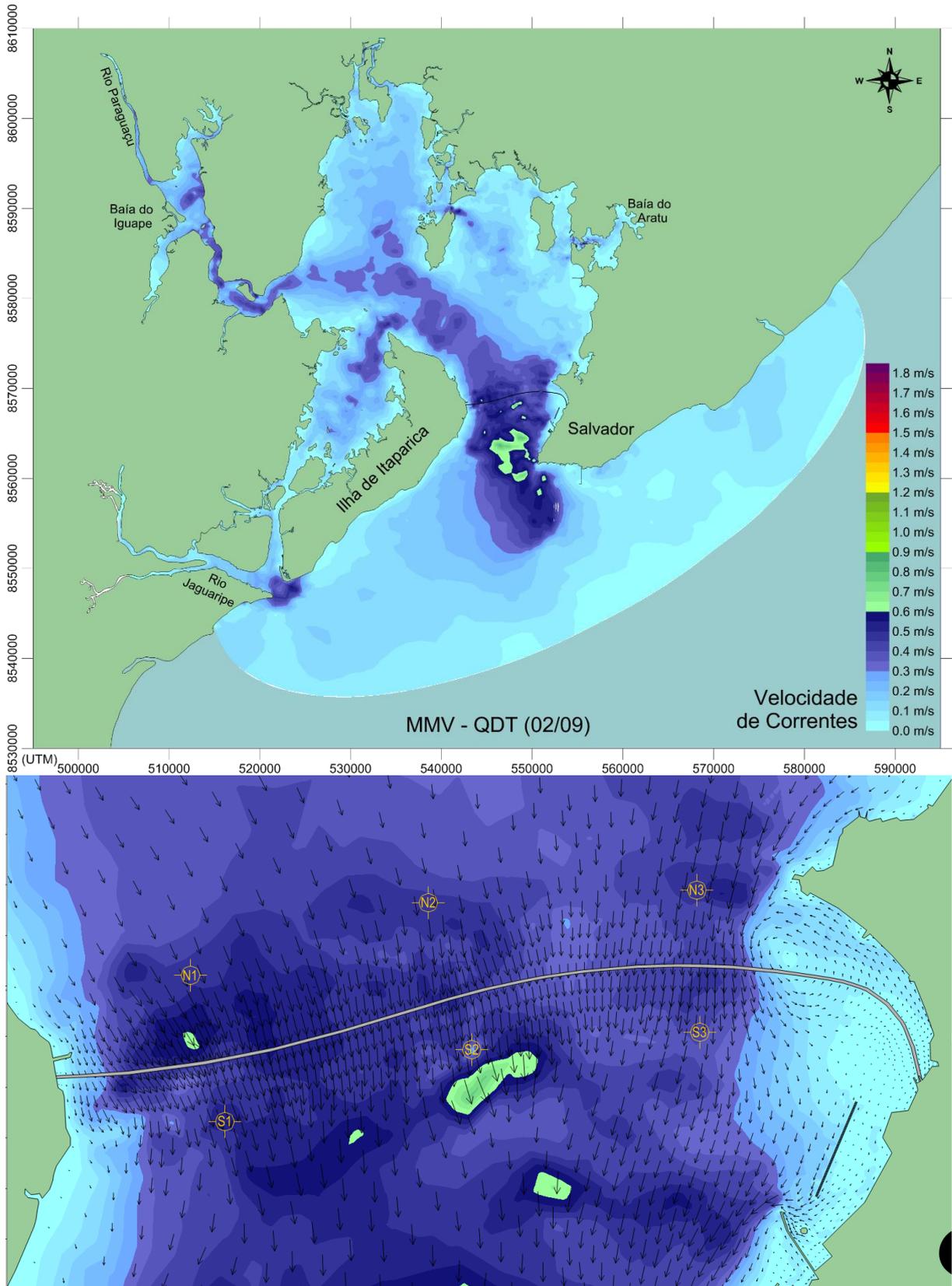


Figura 63. Correntes promediadas na coluna de água em meia maré vazante de quadratura no dia 02/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte. O gráfico seguinte mostra perfis verticais de velocidades nas estações indicadas no zoom.

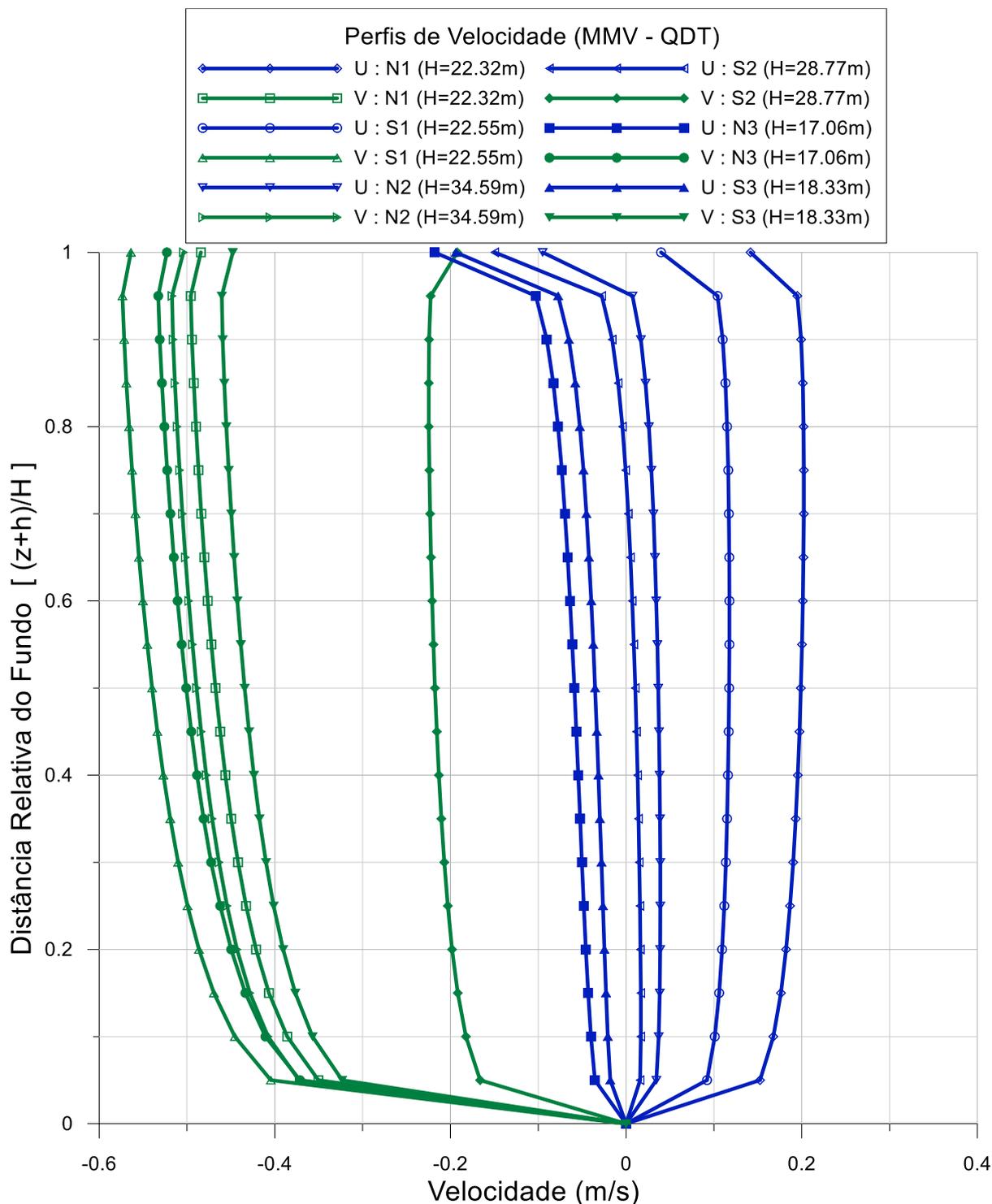


Figura 64. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de corrente em meia maré vazante de quadratura. U = componente L-O e V = componente N-S.

No topo da coluna de água nota-se o efeito do arraste do vento na superfície livre. Pela forma dos perfis, verifica-se que as correntes médias na vertical mostradas nos mapas são bem representativas.

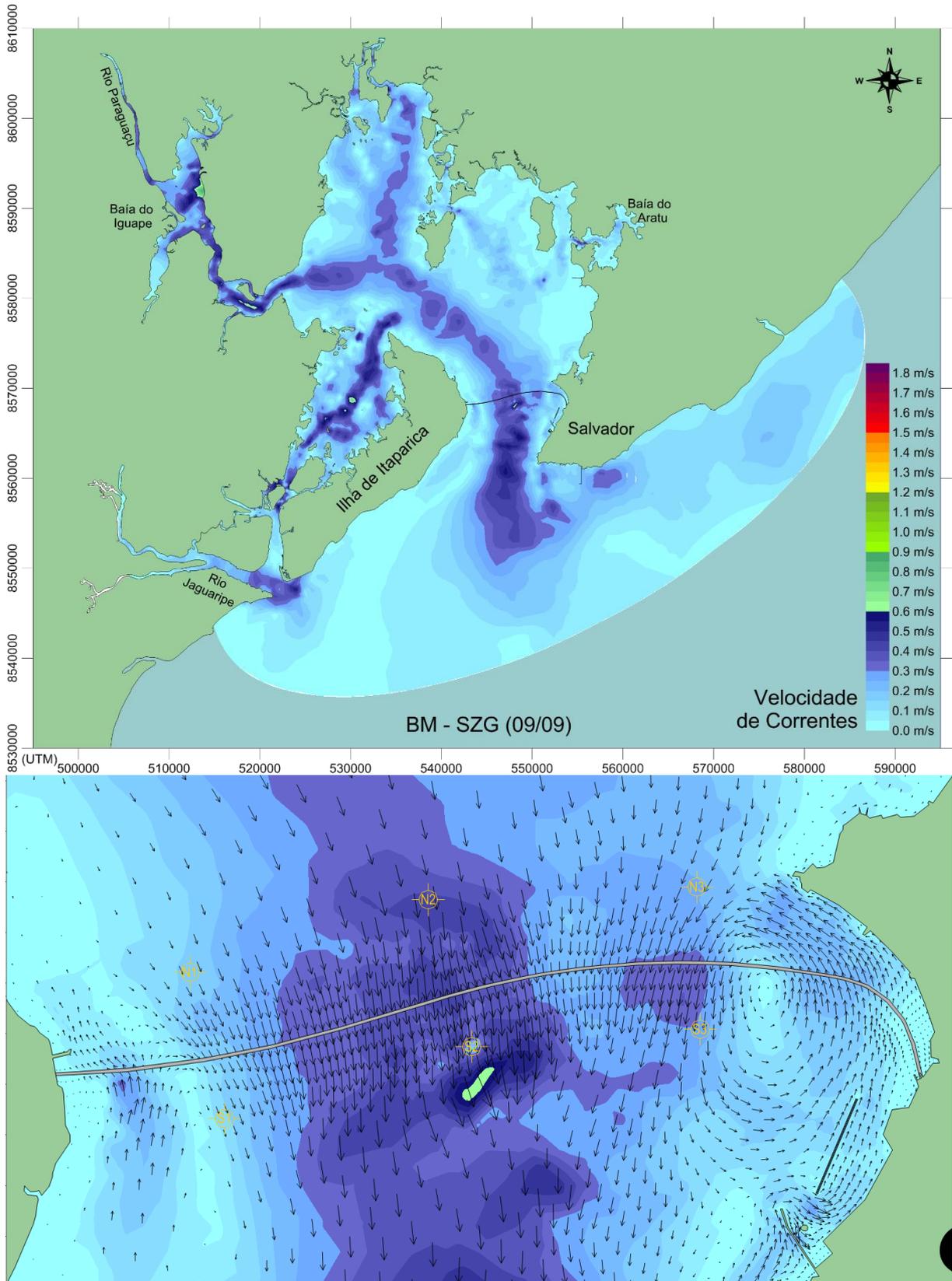


Figura 65. Correntes promediadas na coluna de água em baixamar de sizígia no dia 09/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte.

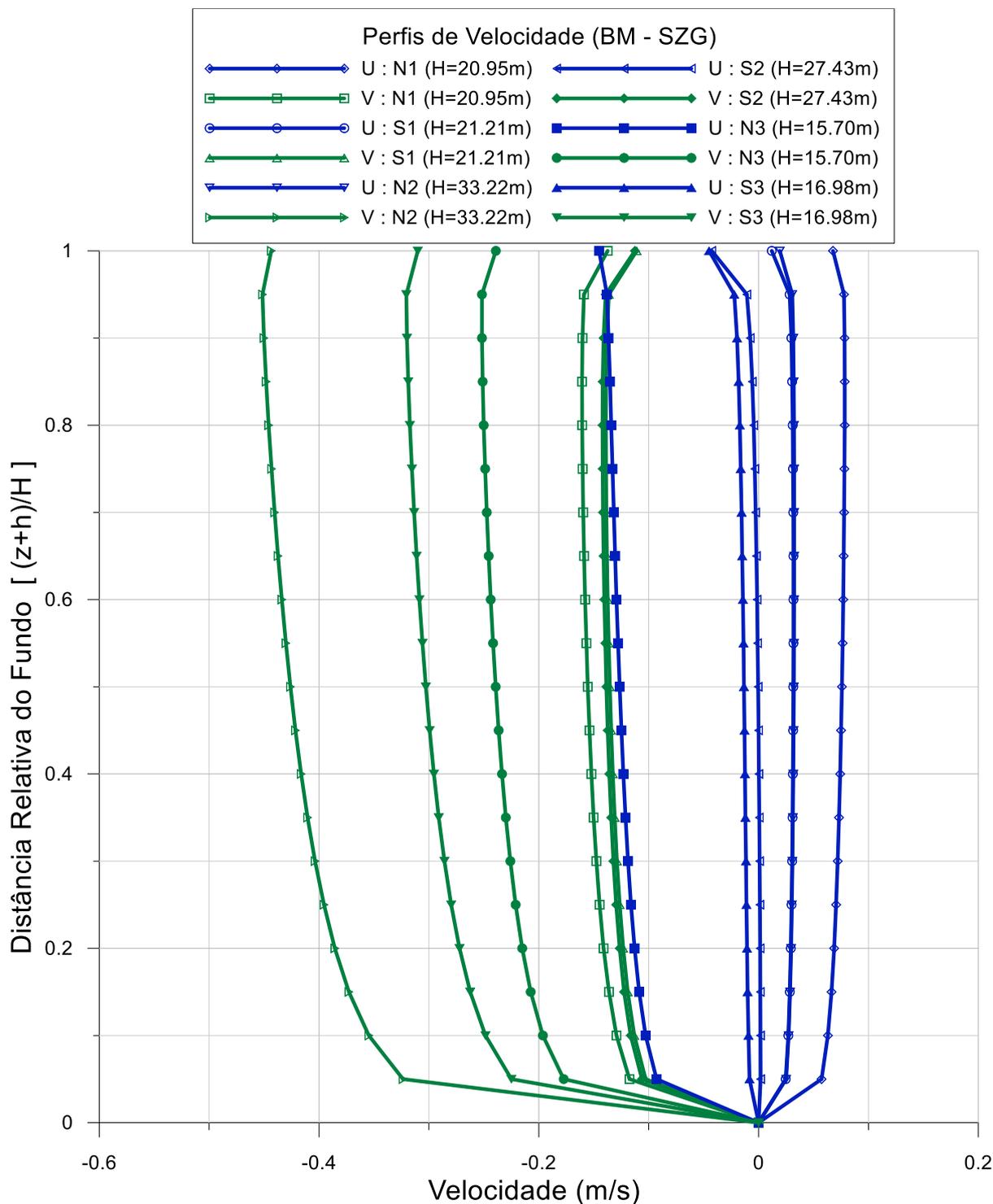


Figura 66. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de corrente em baixamar de sizígia. U = componente L-O e V = componente N-S.

No topo da coluna de água nota-se o efeito do arraste do vento na superfície livre. Pela forma dos perfis, verifica-se que as correntes médias na vertical mostradas nos mapas são bem representativas.

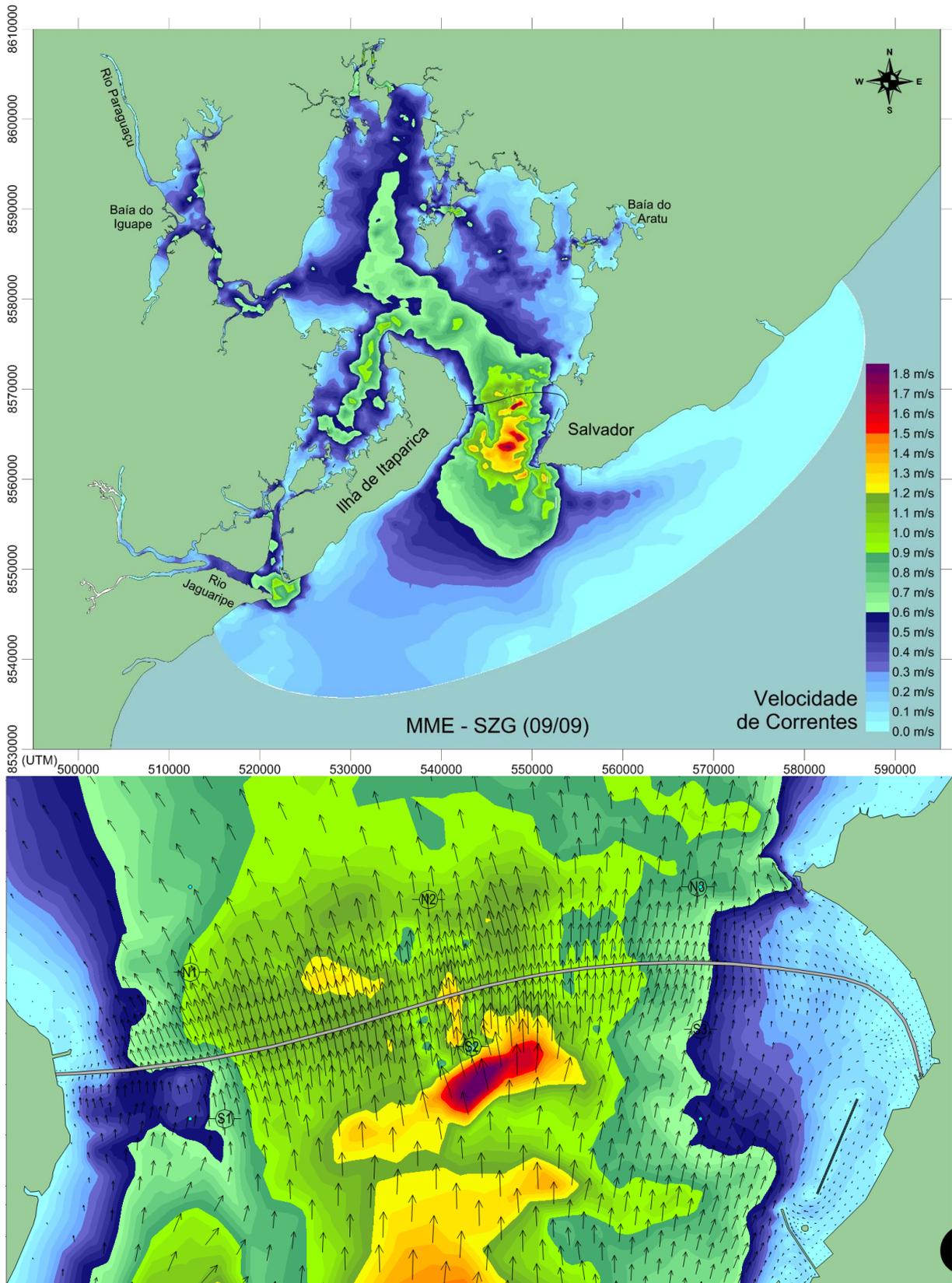


Figura 67. Correntes promediadas na coluna de água em meia maré enchente de sizígia no dia 09/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte.

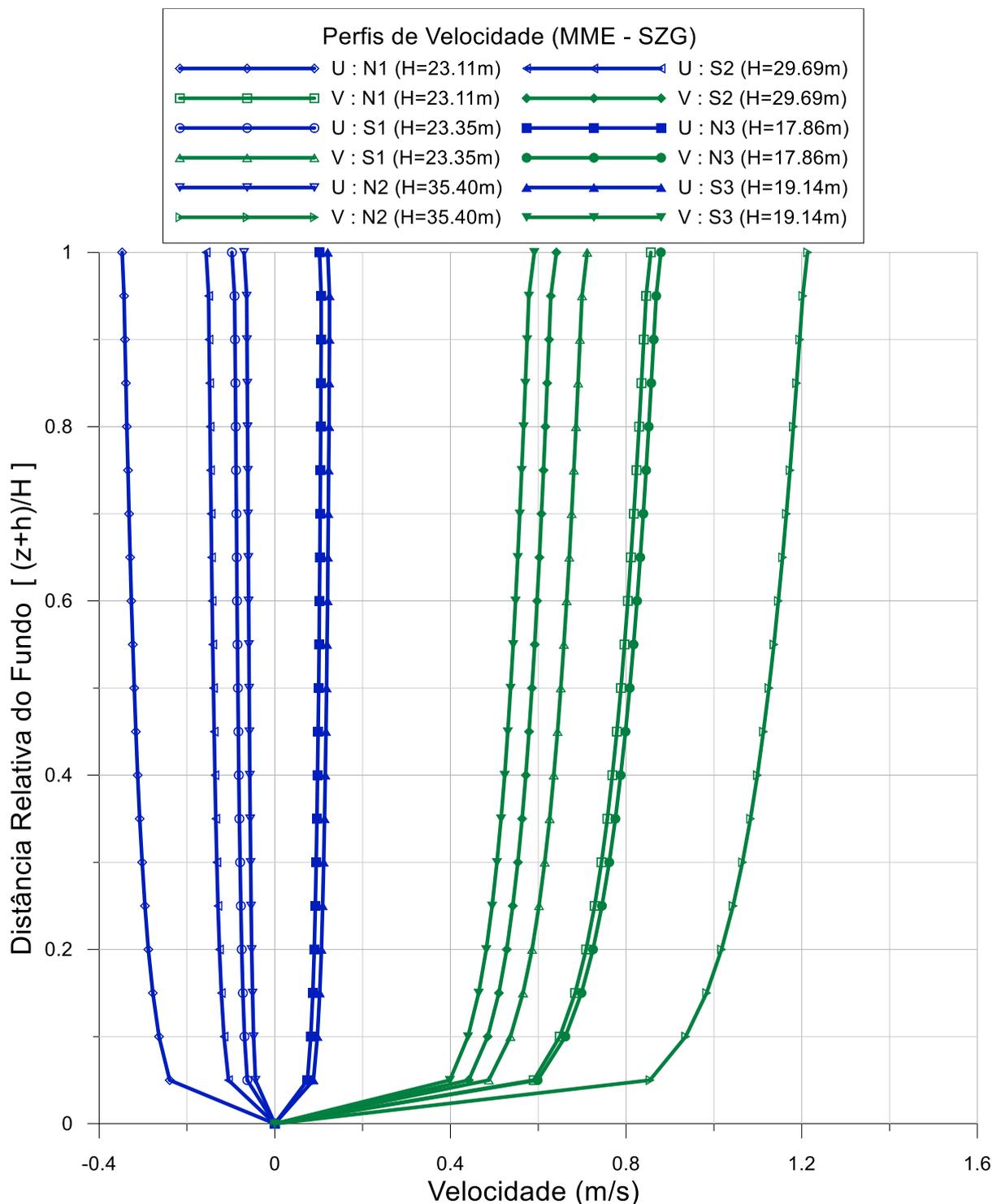


Figura 68. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de corrente em meia maré enchente de sizígia. U = componente L-O e V = componente N-S.

No topo da coluna de água, o efeito do arraste do vento na superfície livre neste tempo é irrelevante. Pela forma dos perfis, verifica-se que as correntes médias na vertical mostradas nos mapas são bem representativas.

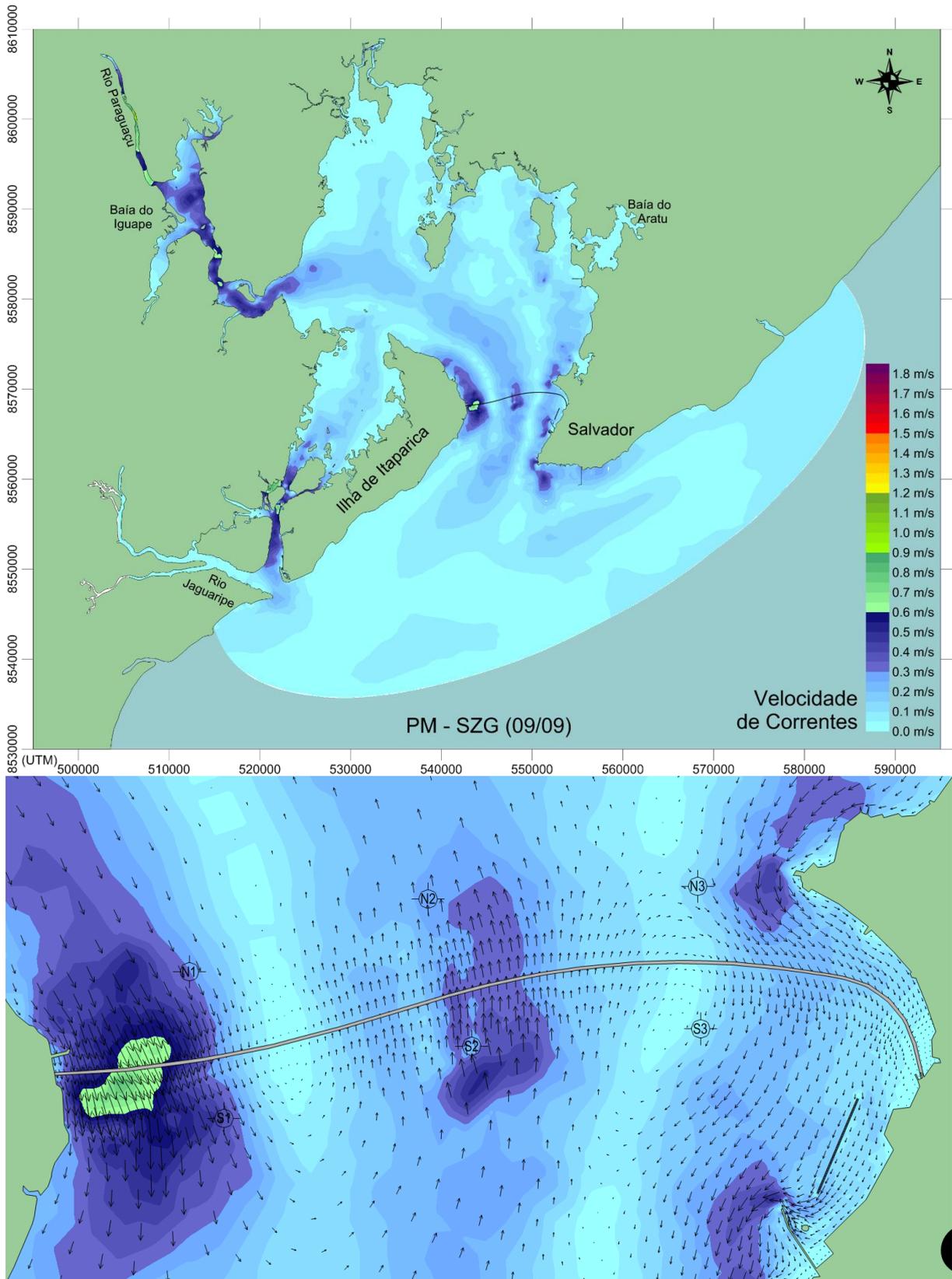


Figura 69. Correntes promediadas na coluna de água em preamar de sizígia no dia 09/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte.

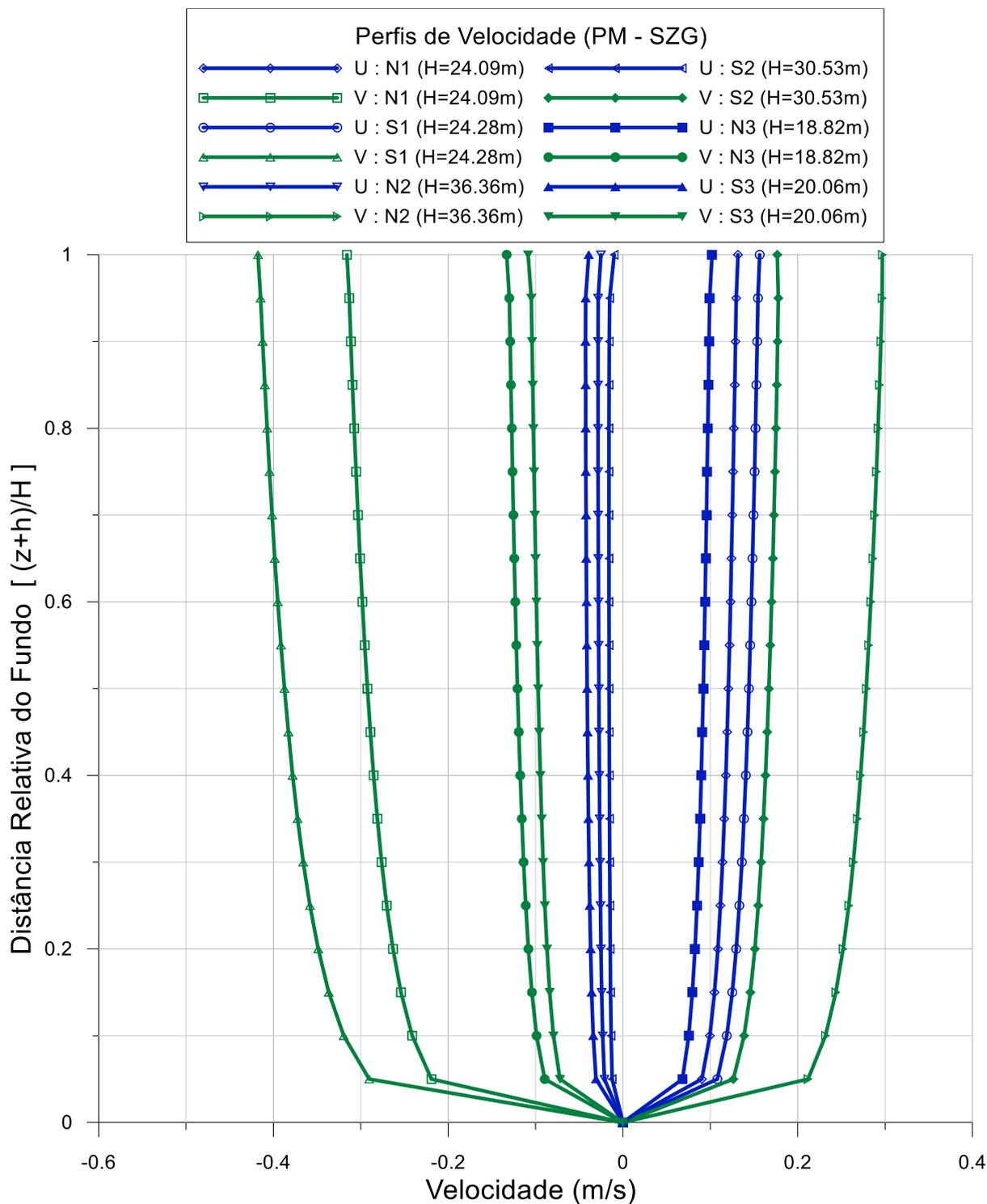


Figura 70. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de corrente em preamar de sizígia. U = componente L-O e V = componente N-S.

No topo da coluna de água, o efeito do arraste do vento na superfície livre neste tempo é irrelevante. Pela forma dos perfis, verifica-se que as correntes médias na vertical mostradas nos mapas são bem representativas.

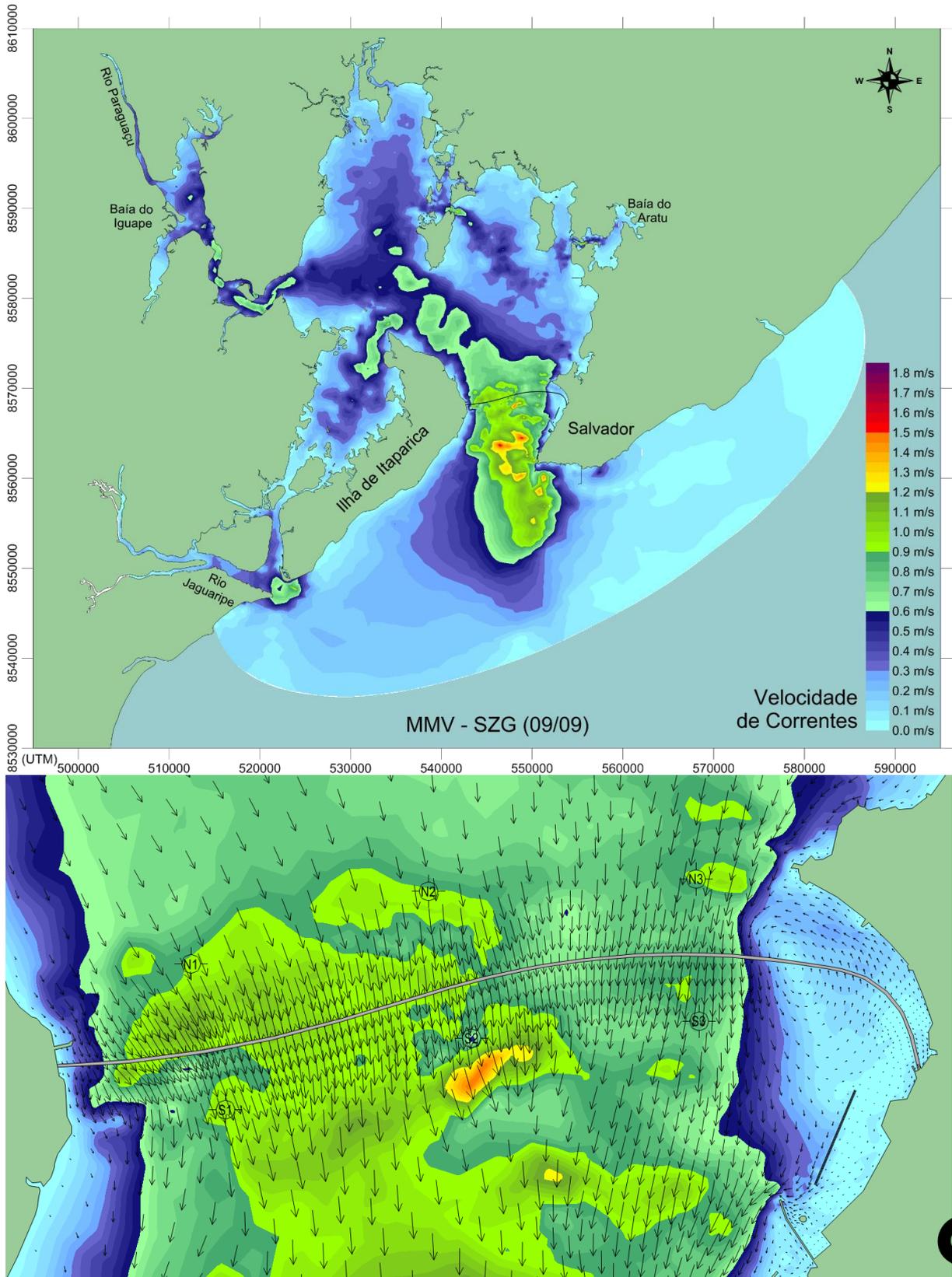


Figura 71. Correntes promediadas na coluna de água em meia maré vazante de sizígia no dia 09/09/2015, com zoom do campo de correntes ao longo da ponte.

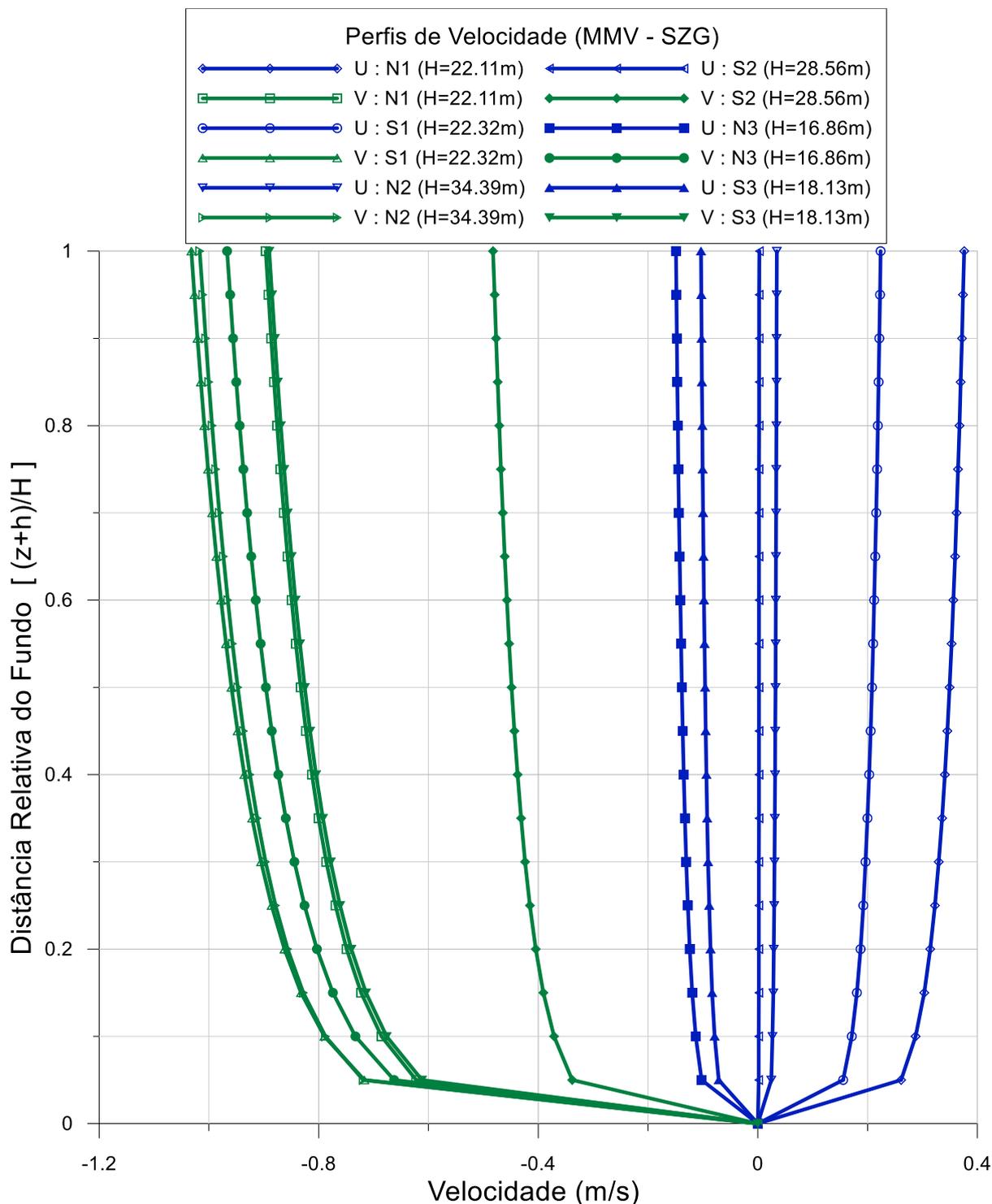


Figura 72. Perfis de velocidade ao longo da coluna de água (H) nas estações S1, N1, S2, N2, S3 e N3 indicadas no zoom do campo de corrente em meia maré vazante de sizígia. U = componente L-O e V = componente N-S.

No topo da coluna de água, o efeito do arraste do vento na superfície livre neste tempo é irrelevante. Pela forma dos perfis, verifica-se que as correntes médias na vertical mostradas nos mapas são bem representativas.

## 6.2 Análises da circulação hidrodinâmica com e sem a ponte

Nesta seção se compara padrões de circulação na situação atual, sem a ponte, e na situação projetada com a ponte. Os resultados apresentados foram obtidos de modelos calibrados e validados (vide *R9 – Relatório sobre Calibração de Modelos* e *R11- Relatório de Validação de Modelos*), com dados atuais de medição, conforme apresentados nos relatórios *R4 – Caracterização Sedimentológica I*, *R6 – Relatório de Medições Maregráficas Equinócio Março de 2015*, *R8 – Relatório de Caracterização Sedimentológica II*, *R10 – Relatório de Medições Maregráficas Inverno de 2015*, *R12 – Relatório de Extremos de Ondas* e *R13 – Relatório de Medições de Ventos, Correntes e Ondas*.

Apresenta-se pares de figuras comparando campo de correntes com e sem a ponte. Cada par de figuras é composto por mapas gerais da BTS com isolinhas de magnitude de correntes antes e depois da ponte, a cada mapa geral está associado uma figura com mapas de zoom detalhando os campos de correntes no entorno do eixo da ponte. São quatro pares de figuras retratando as principais fases de um ciclo de maré de sizígia equinocial em março de 2015 (cf. dia 140 na Figura 42):

- Meia maré enchente (MME) na Figura 73 e Figura 74,
- Preamar (PM) na Figura 75 e Figura 76,
- Meia maré vazante (MMV) nas Figura 77 e Figura 78,
- Baixa-mar (BM) na Figura 79 e Figura 80.

Em seguida aos mapas de correntes, apresenta-se da Figura 81 à Figura 86 elipses de correntes maré comparando as situações antes e depois da ponte, em três estações, N1, N2 e N3, ao norte, e três ao sul S1, S2 e S3. A posição das estações estão destacadas nos mapas de zoom da seção 6.1, e são mais visíveis na Figura 57 e na Figura 69.

Analisando os resultados comparativos descritos acima, verifica-se que:

1. As alterações de magnitudes de campo de correntes da BTS, em geral, são pouco afetados pela ponte, exceto nas cercanias da mesma.
2. Nos mapas de zoom pode-se constatar alterações do padrão de correntes nas cercanias da ponte, sendo mais notáveis nos momentos de baixas velocidades próximo de instantes de preamar e de baixamar. Nos instantes de correntes mais intensas, meia maré vazante e meia maré enchente, as diferenças são menos evidentes.
3. As elipses comparativas nas estações indicadas apresentam modificações pequenas. Destaca-se na legenda de cada figura as principais alterações.
4. Parte dos efeitos verificados deve-se à ligeira alteração na fase da maré ocasionada pela ponte. As principais componentes de maré logo ao norte da ponte, estação N3, ficarão cerca de 4,7 minutos atrasadas em relação à condição atual, como mostra a Tabela 10. Na tabela, verifica-se que as alterações de amplitude são irrelevantes.

Tabela 10. Comparativo de constantes harmônicas de maré na estação N3, nas situações Atual e Projetada com ponte.

Atual				Projetado				Diferenças (Atual - Projetado)		
Constante	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (grau)	Constante	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (grau)	Amp(%Dif)	Fase(%Dif)	Atraso (min)
M2	44714.16	0.8174	111.9650	M2	44714.16	0.8089	113.7710	1.04%	-1.61%	3.74
S2	43200.00	0.3061	129.3280	S2	43200.00	0.3016	131.6840	1.47%	-1.82%	4.71
N2	45570.05	0.1499	105.3490	N2	45570.05	0.1482	107.5750	1.13%	-2.11%	4.70
O1	92949.63	0.0648	124.4350	O1	92949.63	0.0646	125.3910	0.31%	-0.77%	4.11
K1	86164.09	0.0440	206.6530	K1	86164.09	0.0439	207.5970	0.23%	-0.46%	3.77

Os resultados de análises harmônicas foram obtidos através do SisBaHiA<sup>®</sup>, usando os resultados de 1 ano da estação N3 como registro de níveis nas situações atual e projetada.

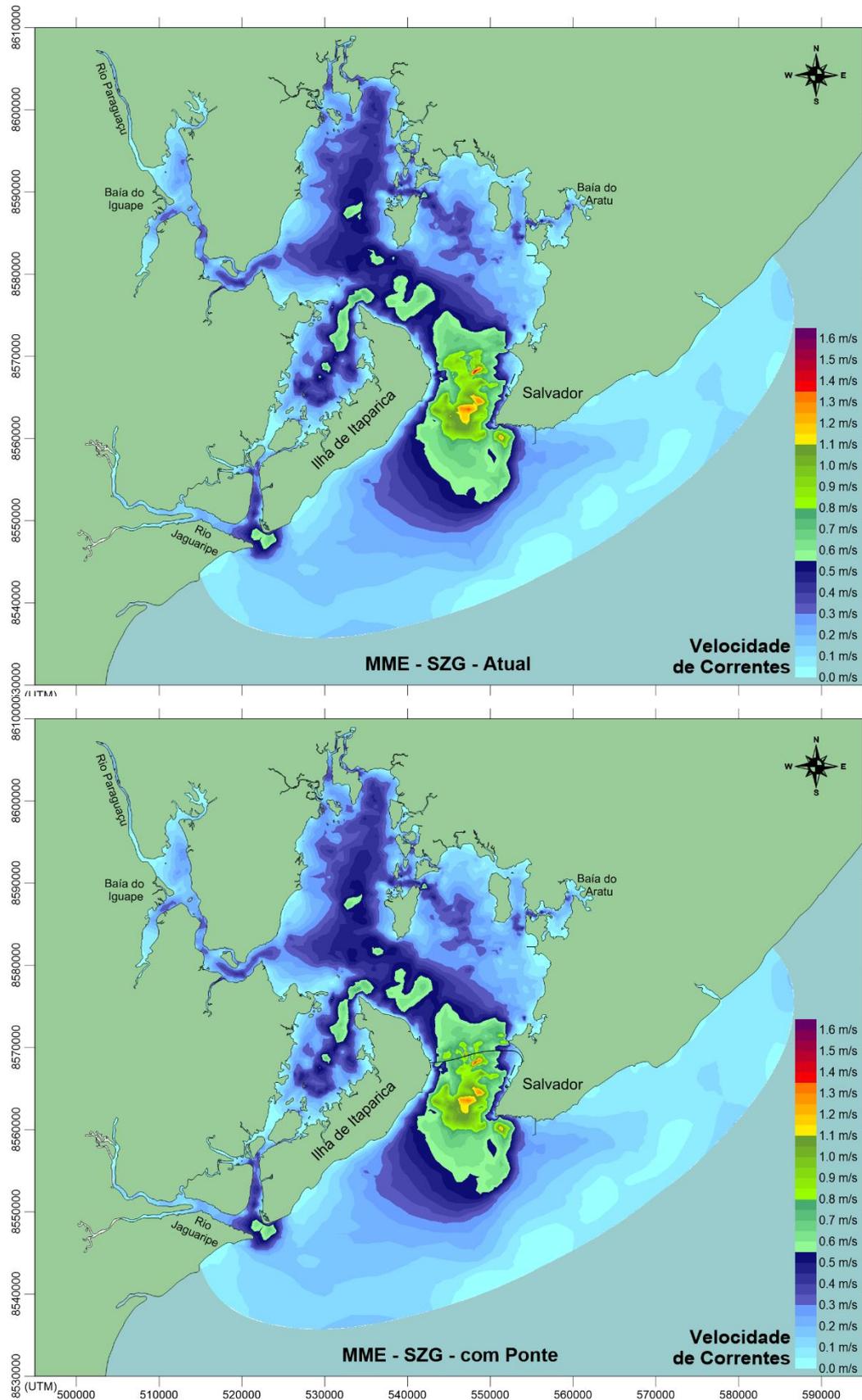


Figura 73. Comparativo de magnitude de correntes em meia maré enchente de sizígia na BTS, antes e depois da ponte. Zoom no entrono do eixo da ponte na Figura 74.

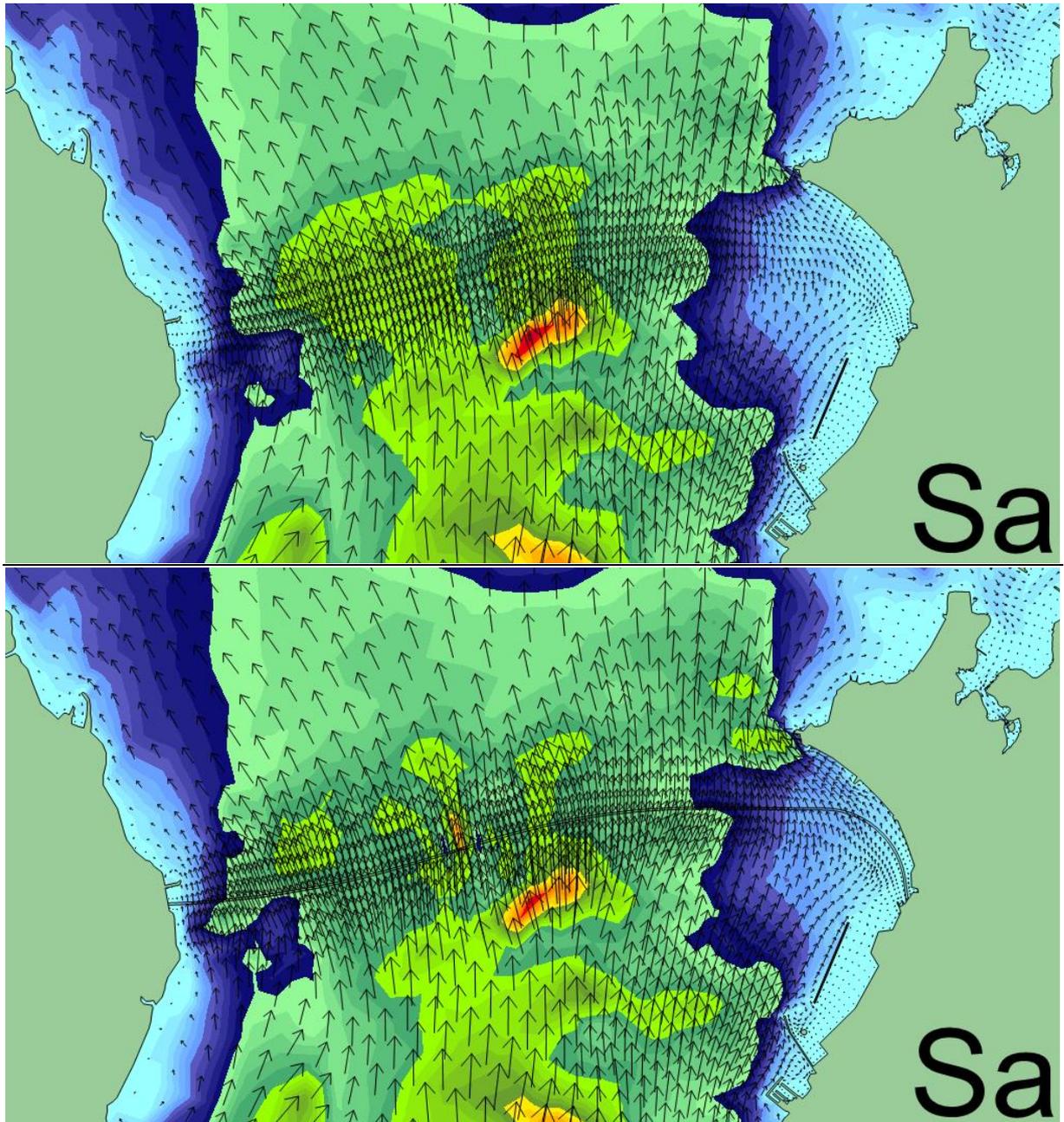


Figura 74. Zoom comparativo de campo de correntes em meia maré enchente de sizígia antes e depois da ponte. Vista comparativa geral da BTS na Figura 73.

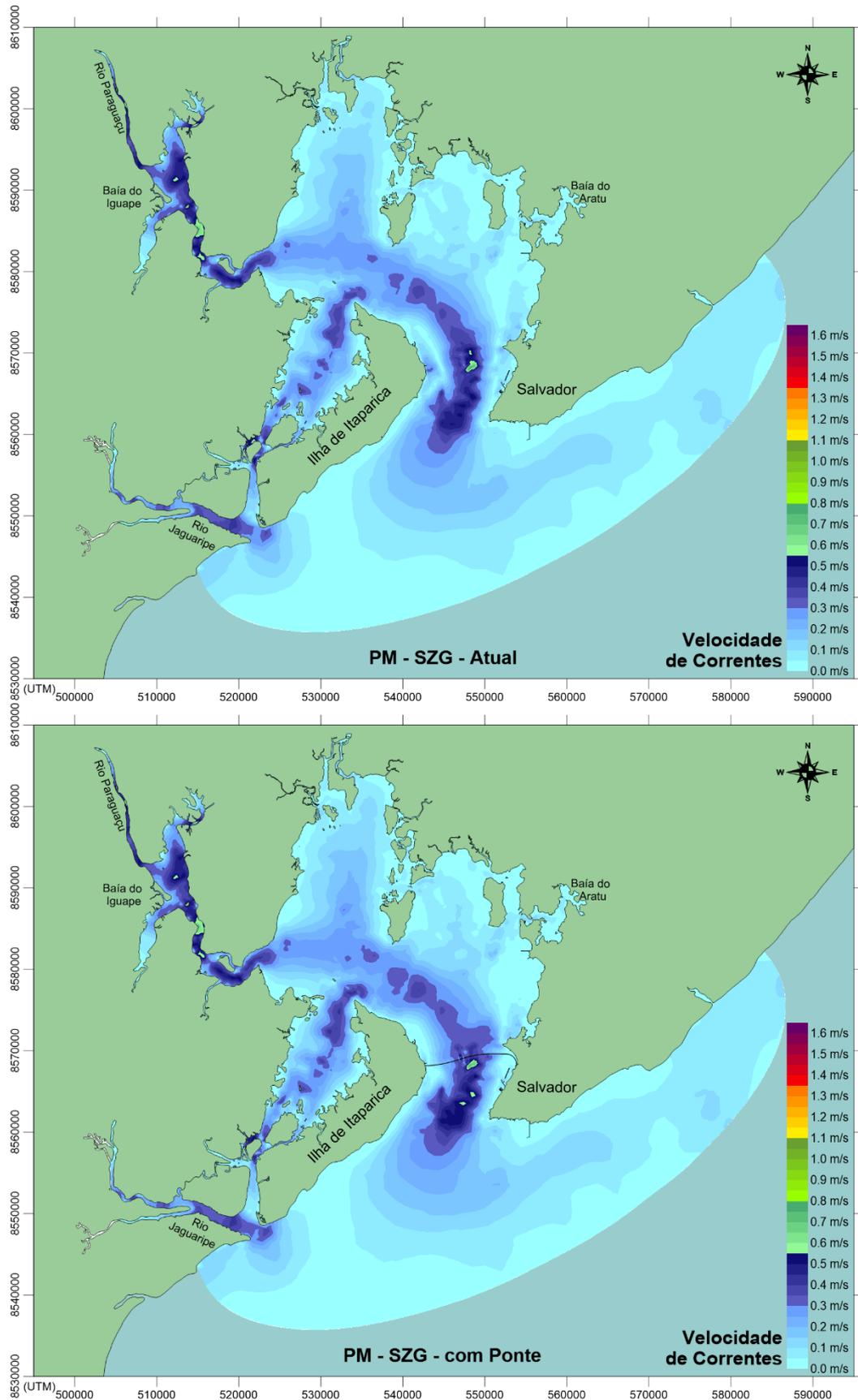


Figura 75. Comparativo de magnitude de correntes em preamar de sizígia na BTS, antes e depois da ponte. Zoom no entorno do eixo da ponte na Figura 76.

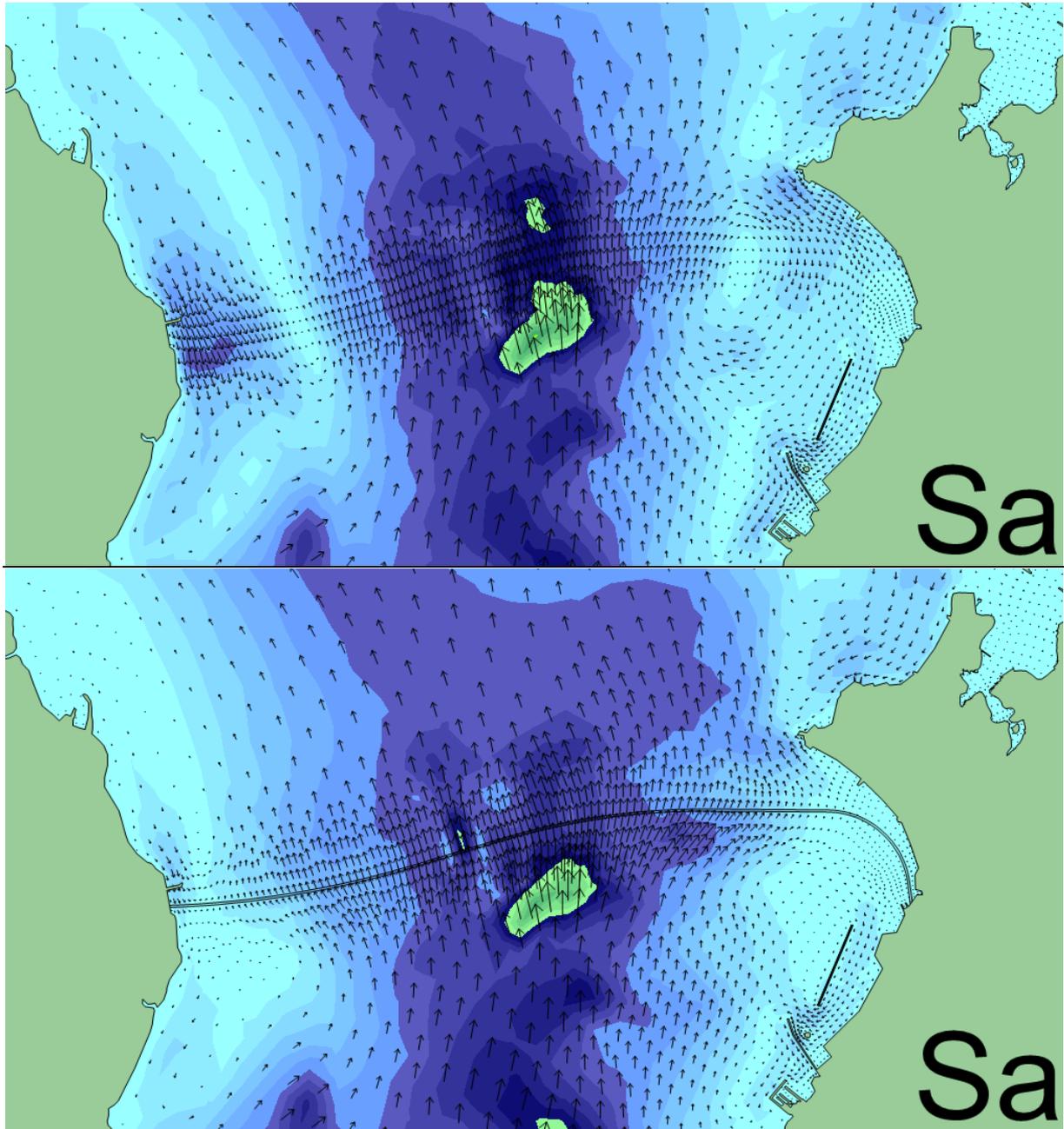


Figura 76. Zoom comparativo de campo de correntes em preamar de sizigia antes e depois da ponte. Vista comparativa geral da BTS na Figura 75. Neste instante de baixas velocidades nota-se claramente alterações nos padrões de circulação, que no entanto não se estendem muito além das cercanias da ponte.

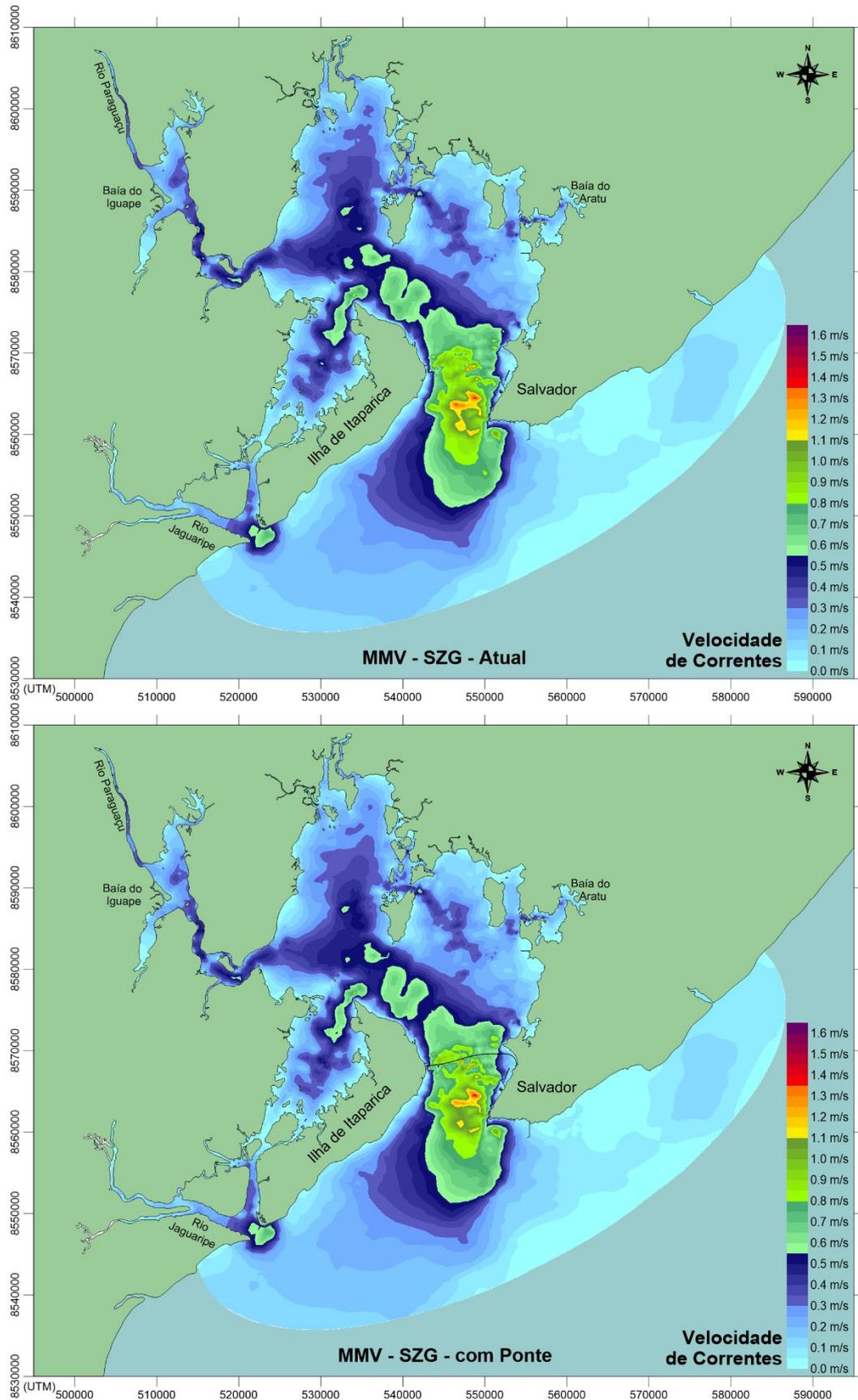


Figura 77. Comparativo de magnitude de correntes em meia maré vazante de sizígia na BTS, antes e depois da ponte. Zoom no entrono do eixo da ponte na Figura 78.

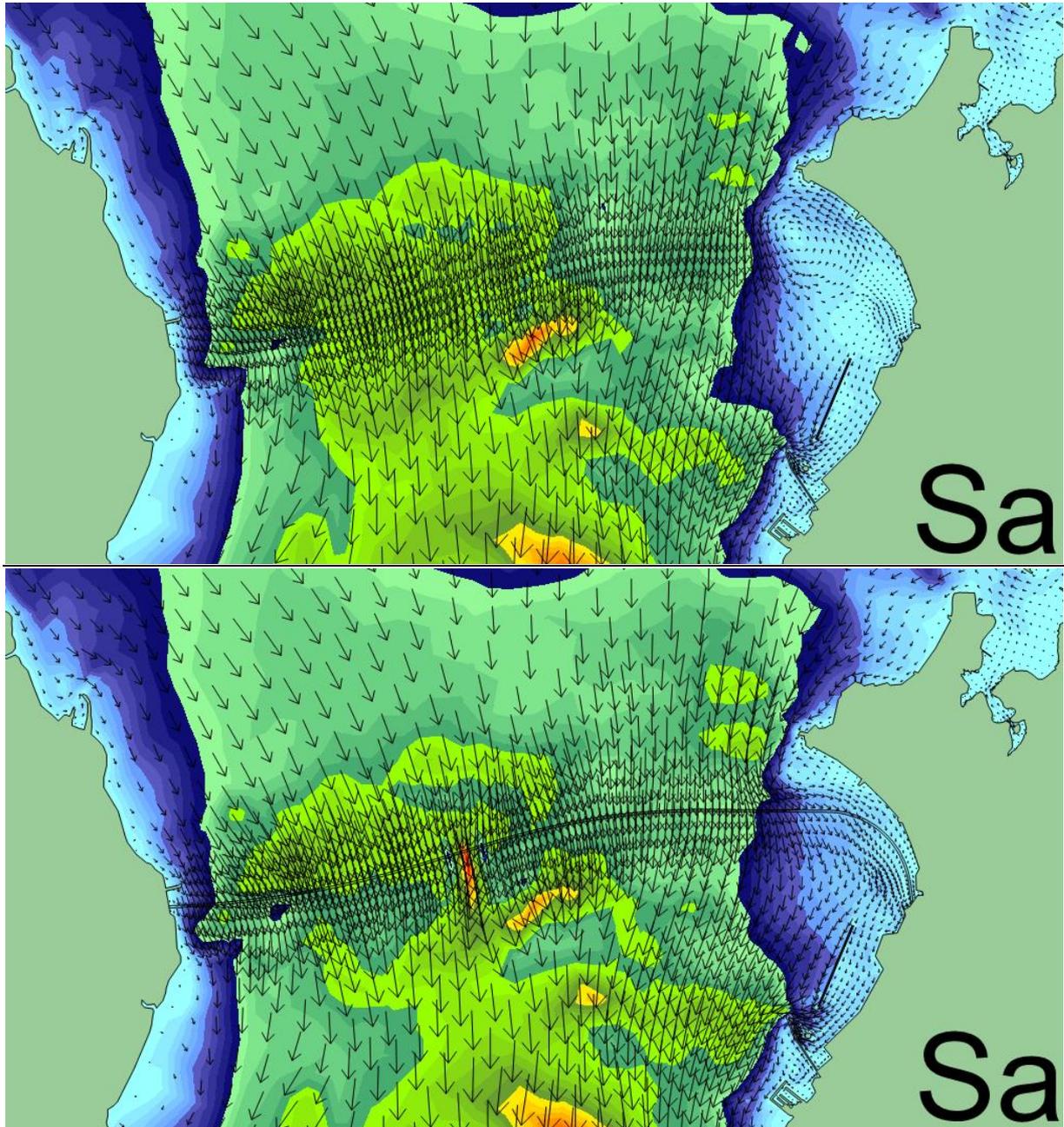


Figura 78. Zoom comparativo de campo de correntes em meia maré vazante de sizígia antes e depois da ponte. Vista comparativa geral da BTS na Figura 77.

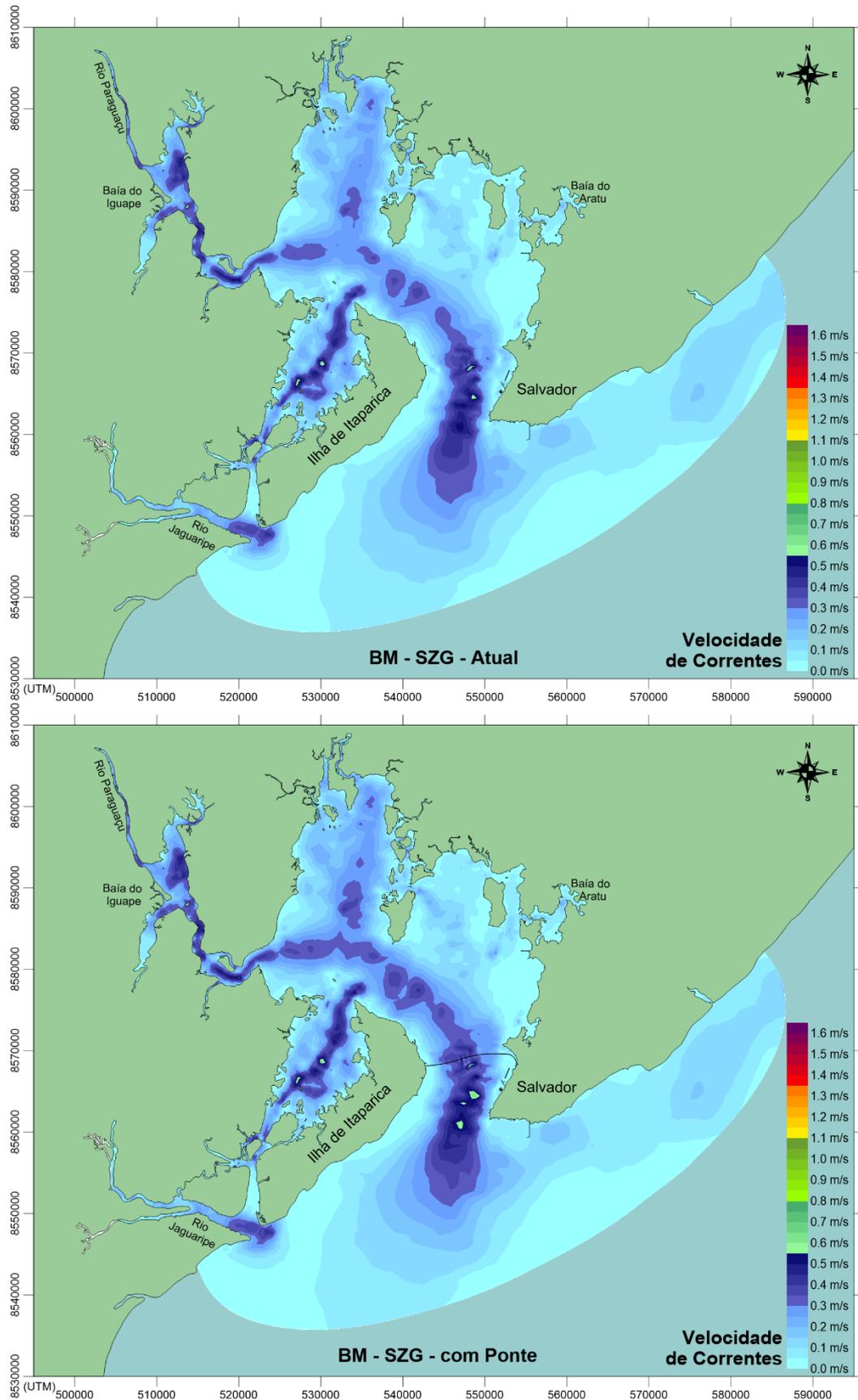


Figura 79. Comparativo de magnitude de correntes em baixa-mar de sizígia na BTS, antes e depois da ponte. Zoom no entorno do eixo da ponte na Figura 80.

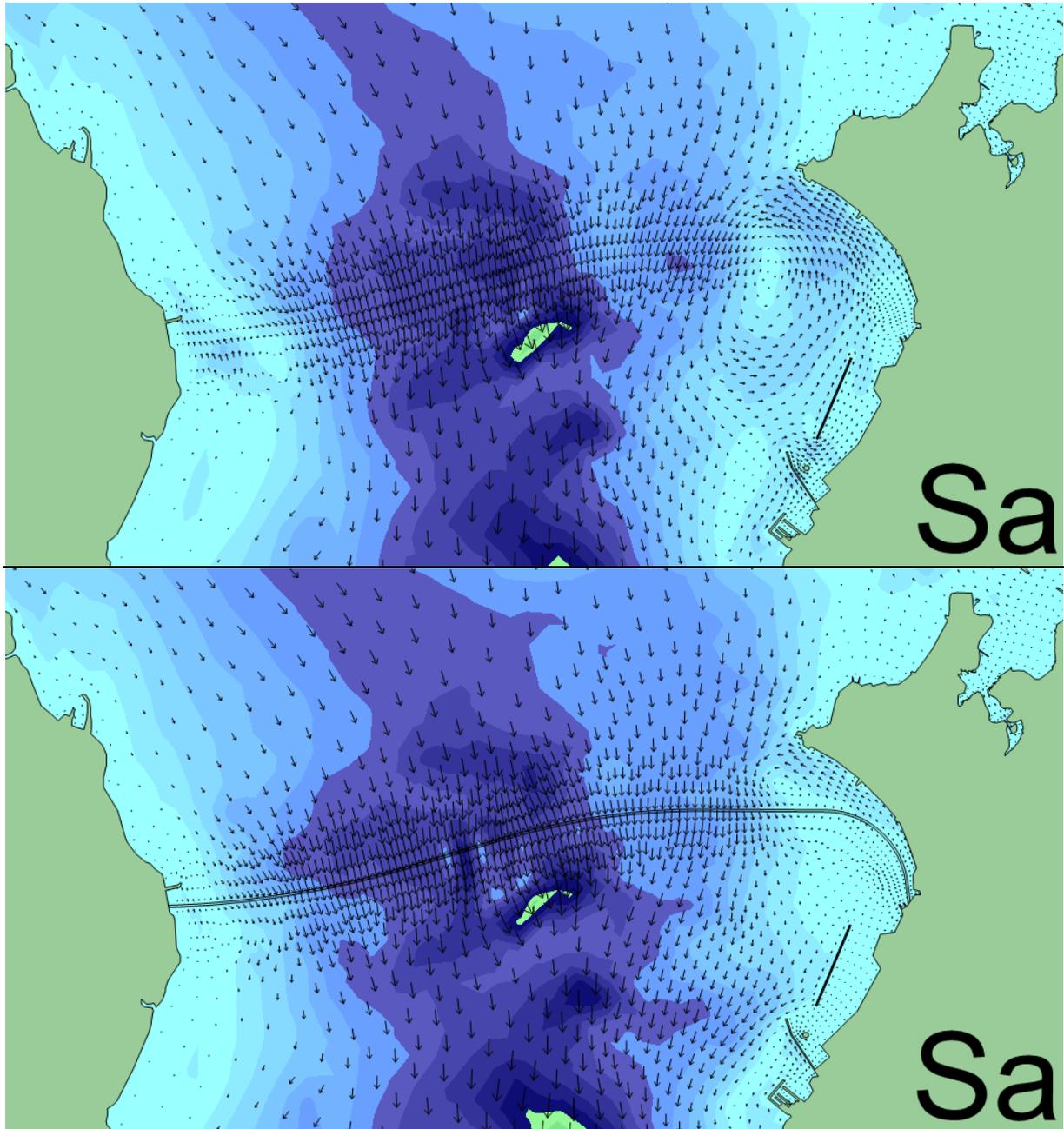


Figura 80. Zoom comparativo de campo de correntes em baixa-mar de sizigia antes e depois da ponte. Vista comparativa geral da BTS na Figura 79.

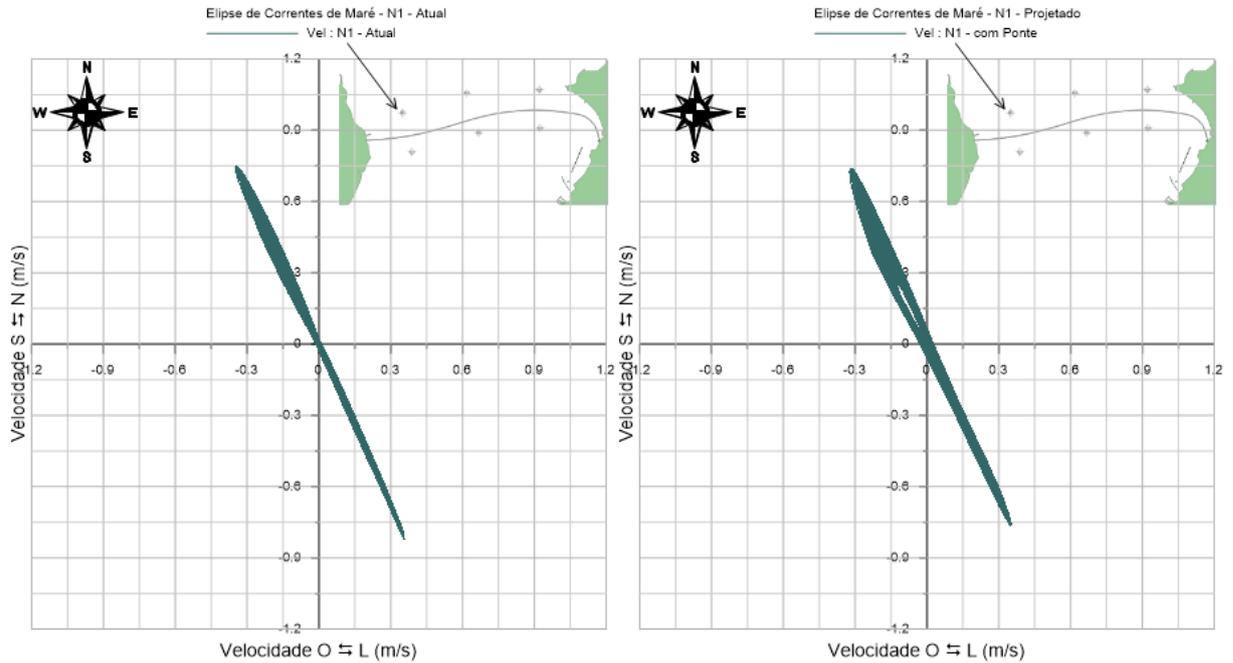


Figura 81. Elipses de correntes de maré na estação N1 antes e depois da ponte. Na estação N1, nota-se leve diminuição na magnitude e leve aumento no espalhamento direcional das correntes após a construção da ponte.

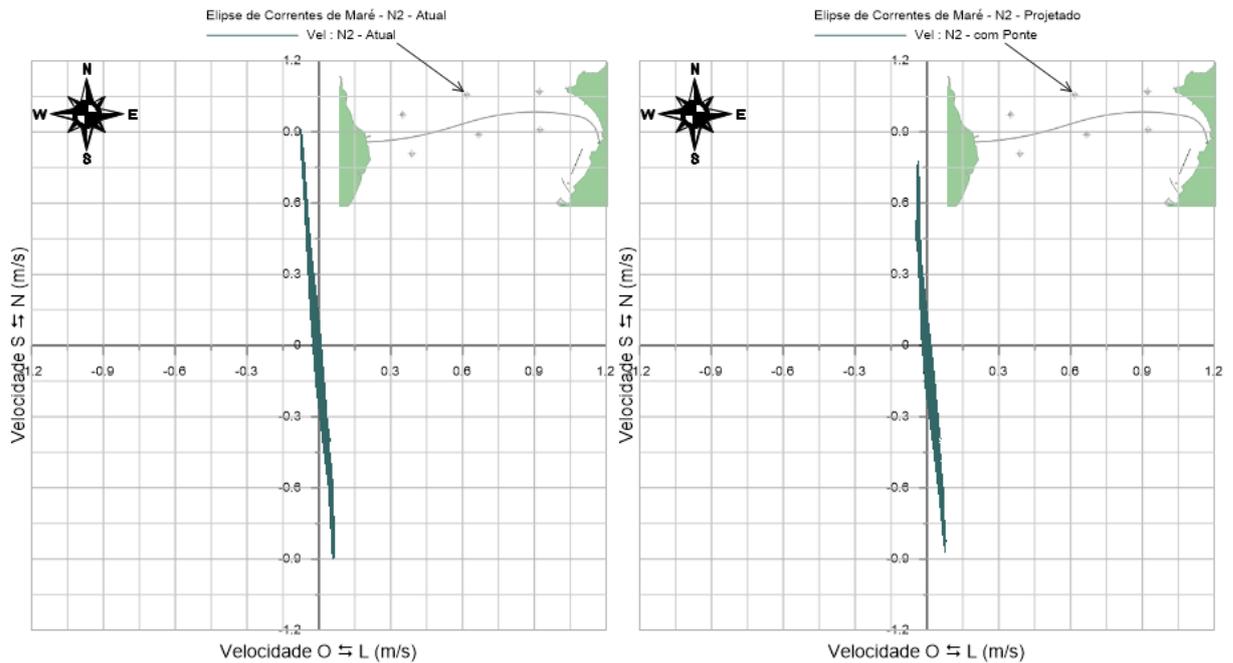


Figura 82. Elipses de correntes de maré na estação N2 antes e depois da ponte. Na estação N2, após a construção da ponte, nota-se leve diminuição na magnitude das correntes de enchente e vazante.

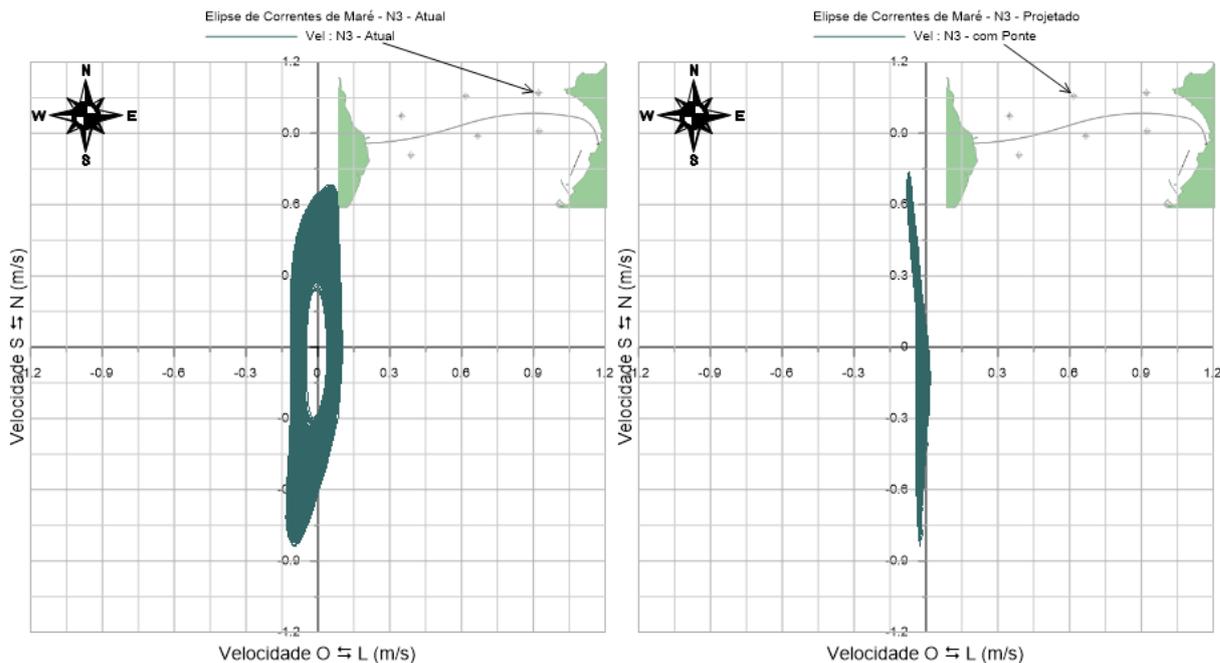


Figura 83. Elipses de correntes de maré na estação N3 antes e depois da ponte. Na estação N3, após a construção da ponte, nota-se leve aumento na magnitude das correntes, que também passam a ficar mais alinhadas com uma direção principal um pouco rotacionada no sentido anti-horário.

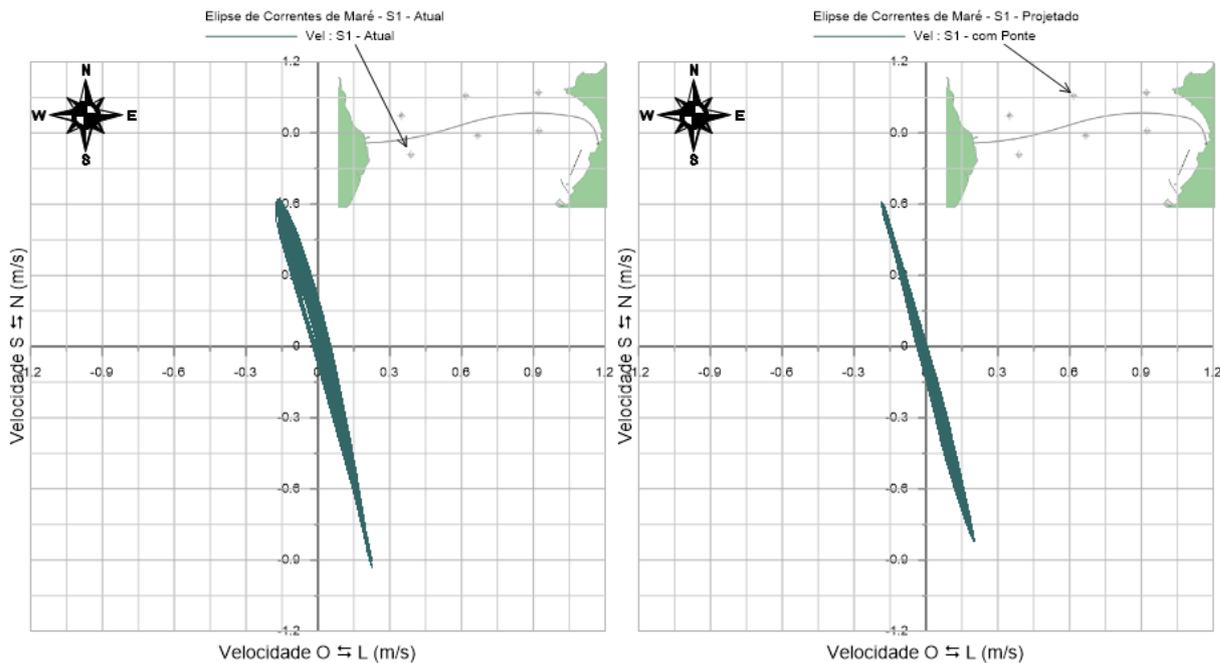


Figura 84. Elipses de correntes de maré na estação S1 antes e depois da ponte. Na estação S1, após a construção da ponte, nota-se leve diminuição na magnitude das correntes de vazante, além disso, o espalhamento direcional das correntes diminui na enchente e aumenta na vazante.

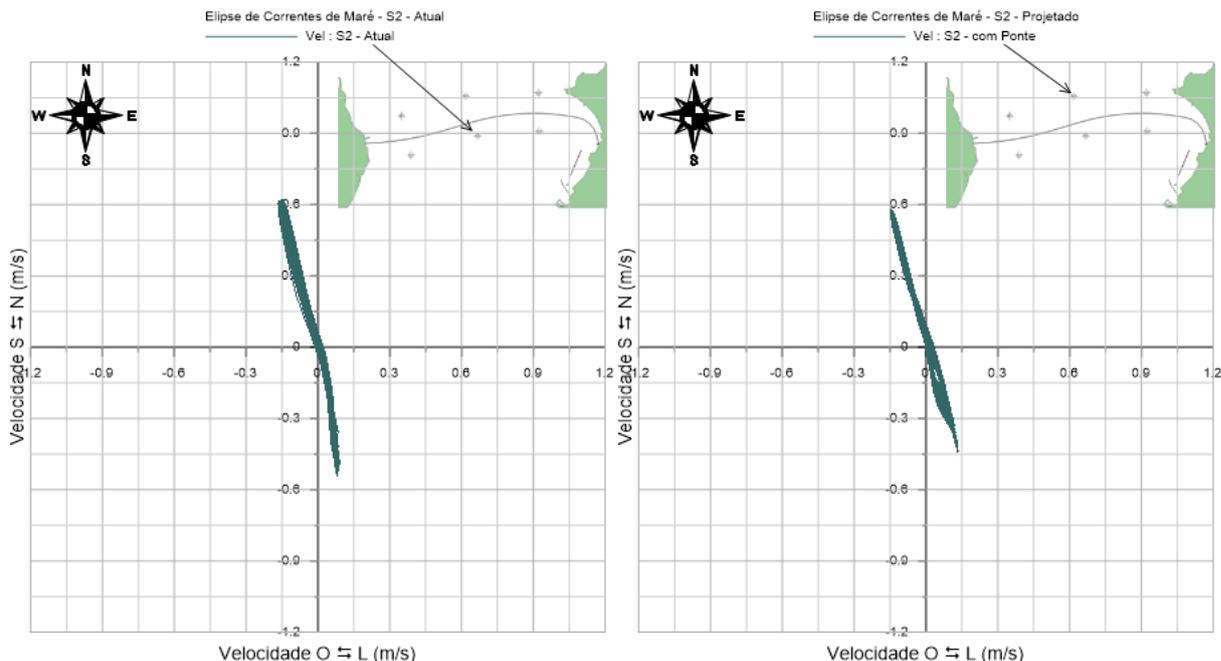


Figura 85. Elipses de correntes de maré na estação S2 antes e depois da ponte. Na estação S2, após a construção da ponte, nota-se leve diminuição na magnitude das correntes de vazante, além disso, o espalhamento direcional das correntes diminui na enchente e aumenta na vazante.

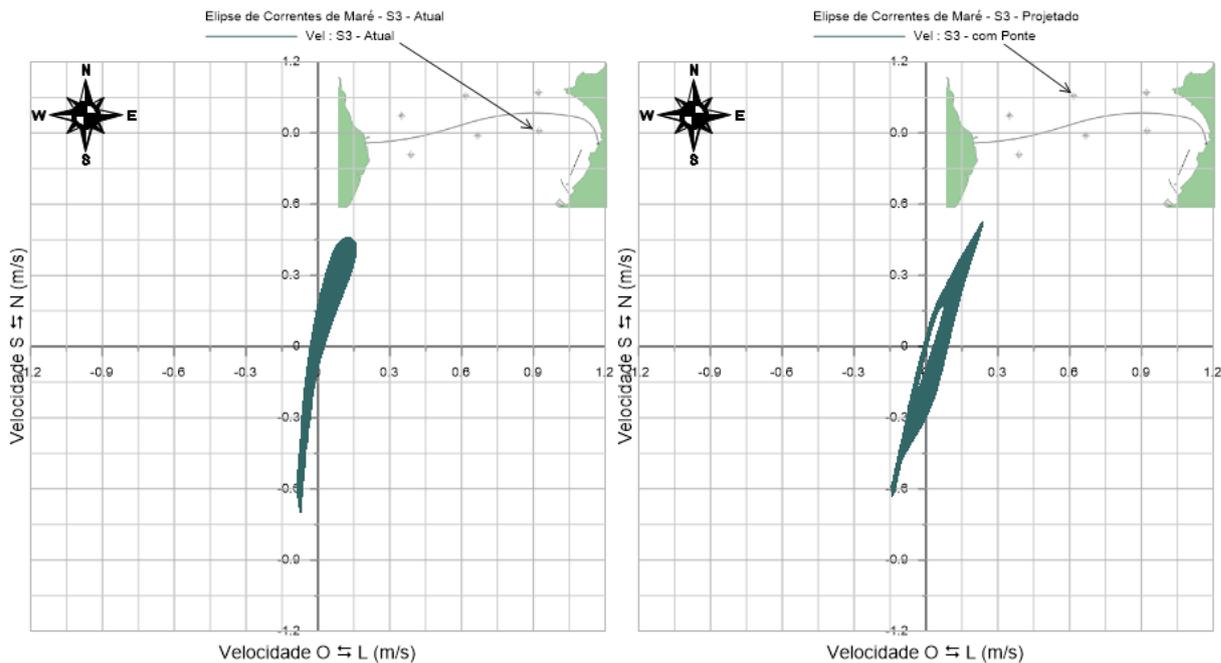


Figura 86. Elipses de correntes de maré na estação S3 antes e depois da ponte. Na estação S3, após a construção da ponte, nota-se leve aumento na magnitude das correntes de enchente e diminuição nas de vazante, além disso, o espalhamento direcional das correntes aumenta ligeiramente na enchente e na vazante.

### 6.3 Análises comparativas de processos sedimentológicos

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos de modelos calibrados e validados (vide *R9 – Relatório sobre Calibração de Modelos* e *R11- Relatório de Validação de Modelos*), com dados atuais de medição, conforme apresentados nos relatórios *R4 – Caracterização Sedimentológica I*, *R6 – Relatório de Medições Maregráficas Equinócio Março de 2015*, *R8 – Relatório de Caracterização Sedimentológica II*, *R10 – Relatório de Medições Maregráficas Inverno de 2015*, *R12 – Relatório de Extremos de Ondas* e *R13 – Relatório de Medições de Ventos, Correntes e Ondas*.

Como visto na seção 6.2, os resultados comparativos de aspectos hidrodinâmicos indicam que os efeitos da ponte na circulação hidrodinâmica mais notáveis restringem-se às cercanias do eixo da ponte. Um modo de se verificar o potencial de alterações na circulação hidrodinâmica afetarem os processos morfológicos da BTS, é analisando-se o percentual de tempo, ao longo de um ano, em que as tensões no fundo exercidas pelas correntes persistem com valores acima do mínimo requerido para mobilizar diferentes classes de sedimentos.

Para este fim, a Figura 87 apresenta mapas comparativos de isolinhas de persistência, ou percentual de tempo ao longo de um ano, em que as correntes na BTS exercem tensões no fundo suficientes para mobilizar sedimentos finos inconsolidados ( $\tau > 0.15 \text{ N/m}^2$ ). A Figura 88 e a Figura 89 apresentam o mesmo conceito para areias médias e areias grossas respectivamente.

Analisando-se tais mapas fica evidente que as interferências da ponte serão sutis. Há diferenças perceptíveis, principalmente nas cercanias do eixo da ponte, porém é necessário examinar as figuras cuidadosamente, para se perceber as pequenas mudanças entre os mapas de isolinhas de antes e depois da ponte construída.

Apesar das diferenças na circulação hidrodinâmica e na persistência de tensões no fundo serem pequenas, os processos sedimentológicos, que se caracterizam por sucessivos ciclos de erosão, transporte e deposição de sedimentos, guardam os efeitos cumulativos de tais diferenças.

Para as situações atual e projetada com a ponte a Figura 90 apresenta mapas de isolinhas de mudanças de batimetria, após 1 ano de simulação hidro-sedimentológica com evolução morfodinâmica do fundo. Analisando os mapas, destaca-se os seguintes pontos:

- Nos mapas, as linhas no entorno dos setores com maiores mudanças representam valores de +0,05m para aumento de batimetria, i.e. erosão em tons azulados, e de -0,05m para diminuição de batimetria, i.e. assoreamento em tons avermelhados. Desta forma, as regiões nas quais houve mudanças maiores do que  $\pm 5\text{cm}$  estão no interior das áreas demarcadas pelas linhas.
- No mapa da situação atual constata-se que as mudanças na batimetria são praticamente inexistentes na maior parte da BTS. Estes resultados indicam que os dados de distribuição sedimentológica utilizados são adequados, uma vez que as alterações verificadas na batimetria da situação atual após um ano de evolução morfodinâmica são pequenas. Caso contrário, se houvessem inadequações nos dados de batimetria, seriam gerados transportes de sedimentos e relocação dos estoques de sedimentos em busca de uma condição de equilíbrio dinâmico.

- Embora bastante similares, os resultados apresentam-se ligeiramente diferentes dos apresentados no R2 – *Relatório de Análises Preliminares com Modelagem Computacional*. Isto ocorreu, pois a distribuição de sedimentos para os modelos do R14 foi aperfeiçoada, conforme descrito nos relatórios R4 – *Caracterização Sedimentológica I* e R8 – *Relatório de Caracterização Sedimentológica II*.
- A comparação dos resultados das situações atual e projetada indica pequenas alterações de manchas de erosão e assoreamento apenas nas cercanias do eixo da ponte. Os maiores valores verificados são inferiores a 1,0m. Consequentemente, pode-se dizer que serão irrelevantes os efeitos da ponte nos processos sedimentológicos que naturalmente vem ocorrendo na BTS. A Figura 91 mostra diferença entre as mudanças morfológicas após um ano sem a ponte e com a ponte, evidenciando que as alterações a serem trazidas pela ponte são de fato muito pequenas.

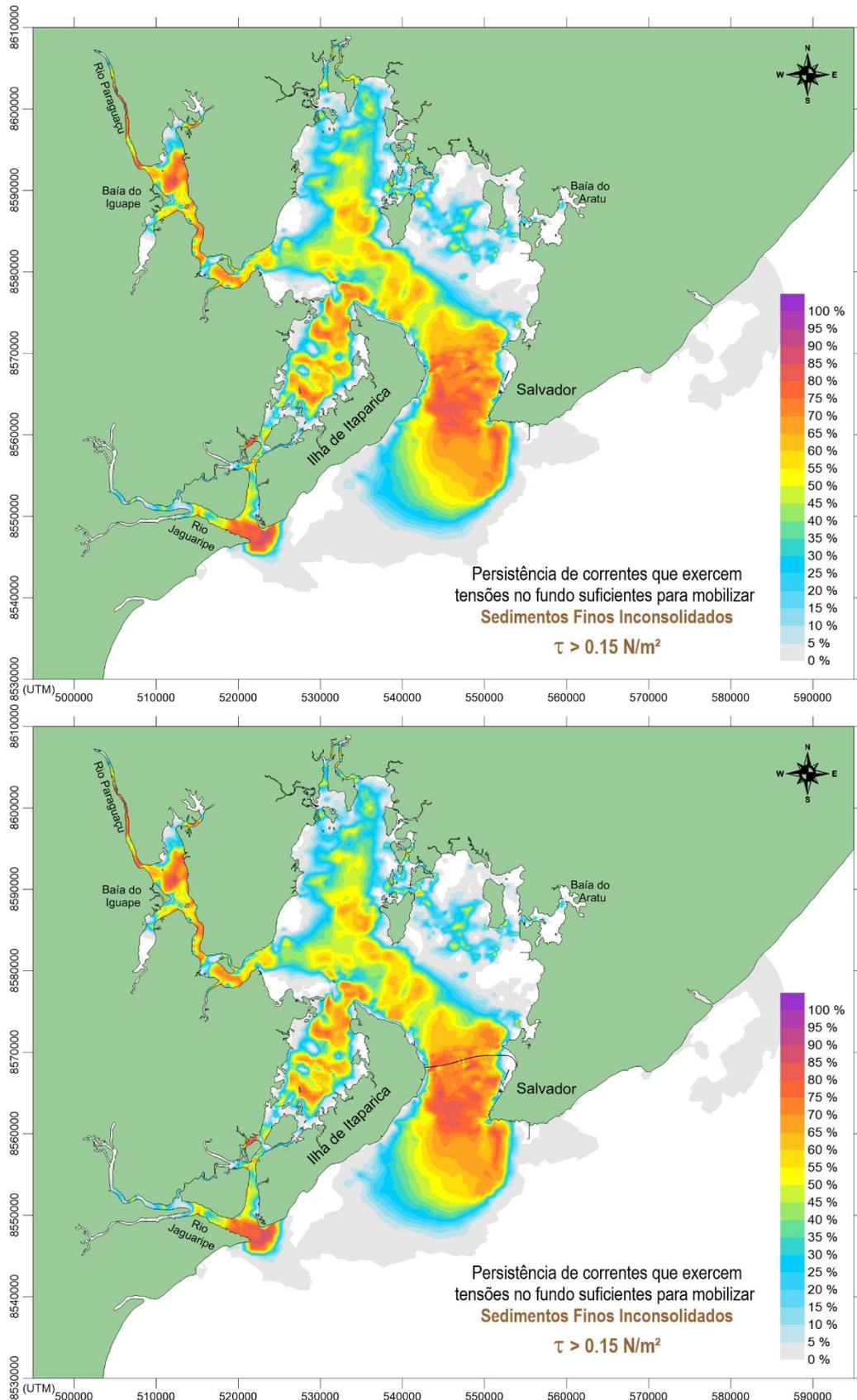


Figura 87. Isolinhas de persistência, ou percentual de tempo ao longo de um ano, em que as correntes na BTS exercem tensões no fundo suficientes para mobilizar sedimentos fins inconsolidados ( $\tau > 0.15 \text{ N/m}^2$ ). Acima está o mapa da situação atual e abaixo após a construção da ponte.

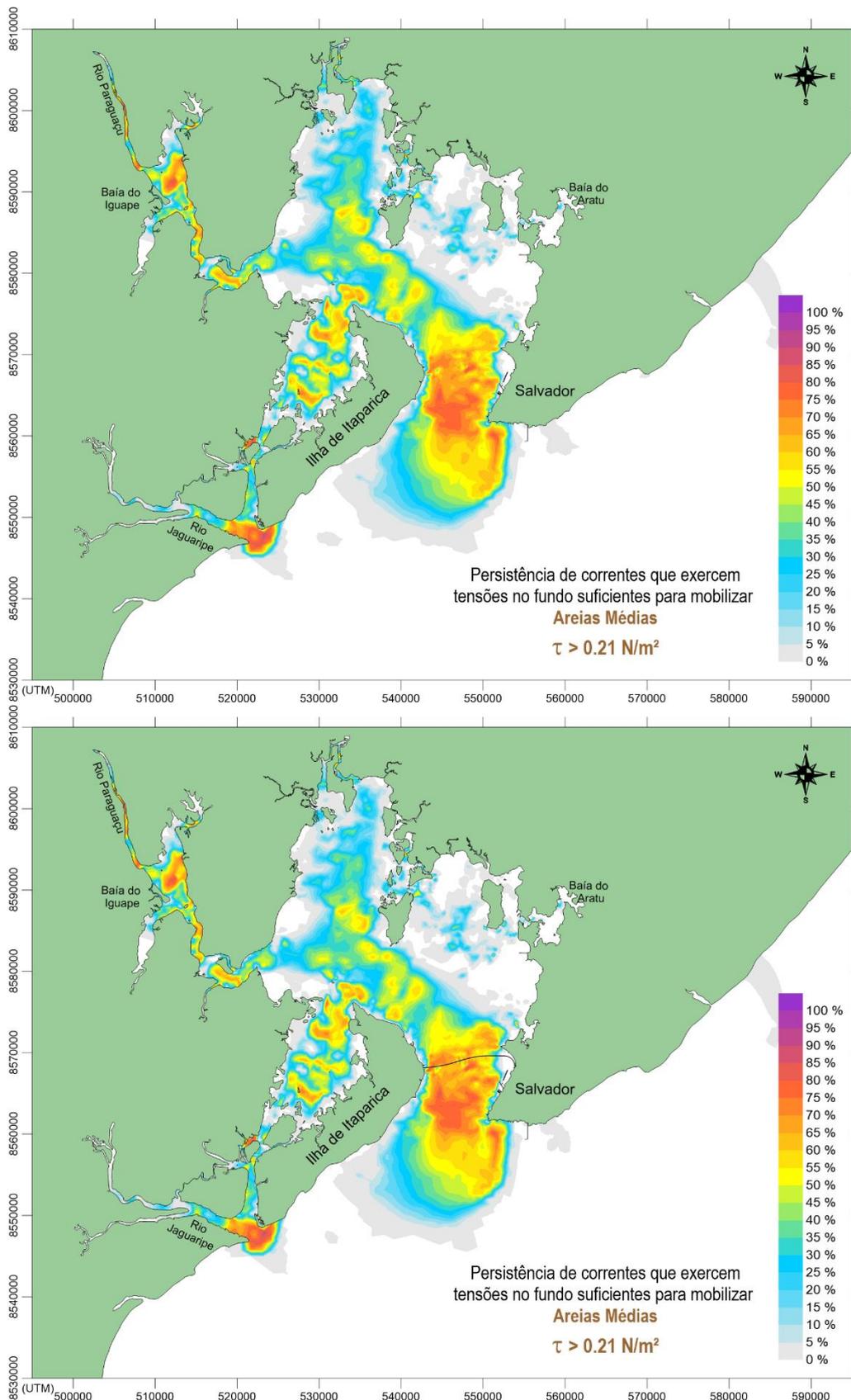


Figura 88. Isolinhas de persistência, ou percentual de tempo ao longo de um ano, em que as correntes na BTS exercem tensões no fundo suficientes para mobilizar areias médias ( $\tau > 0.21 \text{ N/m}^2$ ). Acima mapa da situação atual e abaixo após a construção da ponte.

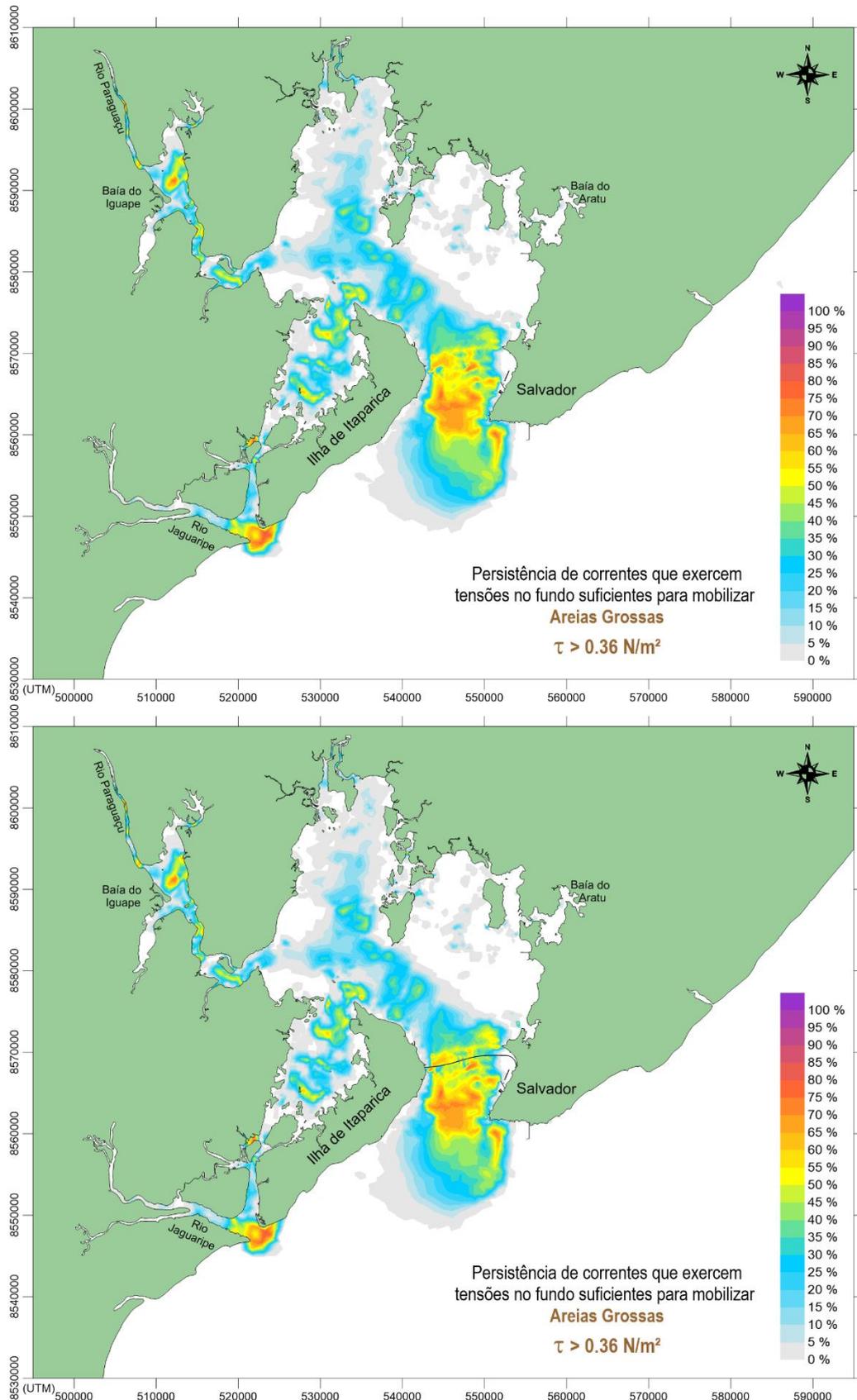


Figura 89. Isolinhas de persistência, ou percentual de tempo ao longo de um ano, em que as correntes na BTS exercem tensões no fundo suficientes para mobilizar areias grossas ( $\tau > 0.36 \text{ N/m}^2$ ). Acima mapa da situação atual e abaixo após a construção da ponte.



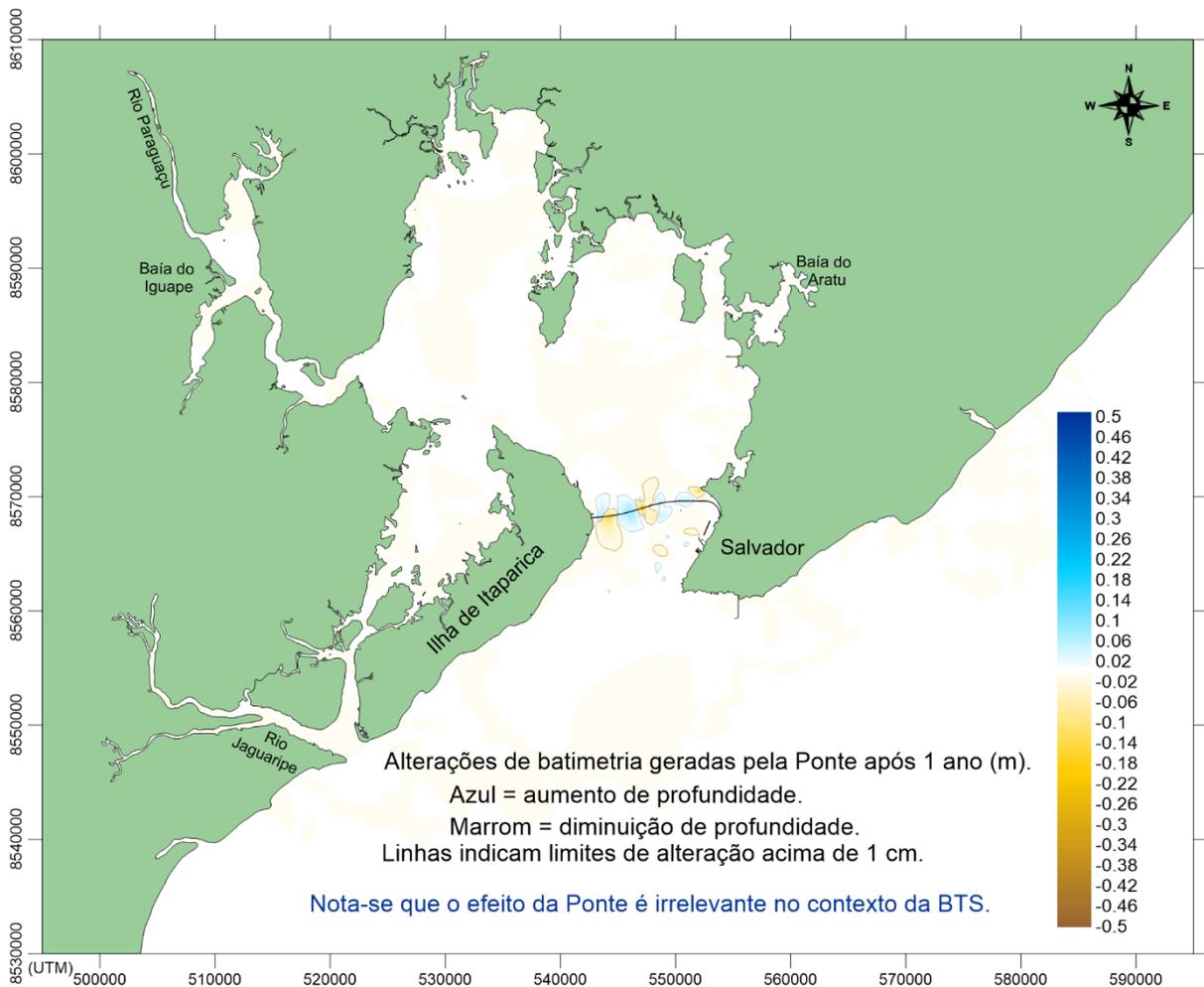


Figura 91. Mapa com isolinhas de diferenças de mudanças de batimetria após um ano de evolução morfológica na situação atual e um ano na situação projetada. Este mapa corresponde à diferença dos resultados do mapa superior da Figura 90 pelos resultados do mapa inferior.

Note que o mapa da Figura 91 é o que melhor retrata os potenciais efeitos da ponte nos processos sedimentológicos, uma vez que mostra explicitamente as diferenças entre a evolução morfológica ao longo de um ano sem a ponte e com a ponte.

## 6.4 Sobre alturas de ondas que poderão atingir as estruturas da ponte

Na seção 5.7.6 apresentou-se a caracterização do clima de ondas para um ponto na entrada da BTS, com 32 m de profundidade. Maiores detalhes encontram-se no R12 – *Relatório de Extremos de Ondas*.

A caracterização do clima de ondas foi realizada com base em 30 anos (1980 a 2010) de reconstituição da agitação marítima, utilizando-se o modelo WW3. A Tabela 11 sumariza os dados apresentados e destaca as direções de incidência de ondas que podem se propagar pela entrada da BTS e atingir a região da Ponte.

Tabela 11: Sumário de estatísticas de onda em águas profundas defronte à BTS de 1980 a 2010, cf. seção 5.7.6. Dados obtidos através do modelo WW3. Destaca-se as ondas com direções incidentes que podem atingir a região do eixo da Ponte.

Direção	Azimute	% Direção	Períodos de Pico Espectral (s)				Alturas Significativas de Onda (m)			
			Média	Percentil 90%	Percentil 99%	Máximo	Média	Percentil 90%	Percentil 99%	Máximo
E	90.0°	61.3%	8.1	9.2	10.2	12.3	1.2	1.6	2.1	2.9
SE	135.0°	31.6%	9.7	12.7	16.5	19.6	1.3	1.9	2.6	3.8
S	180.0°	7.0%	12.6	14.8	17.0	19.7	1.2	1.7	2.5	3.7

Com relação à tabela acima, os sub índices 90% e 99% correspondem a frequências acumuladas de ocorrência. Por exemplo,  $H_{S90\%}$  indica o valor abaixo do qual estão 90% das alturas significativas registradas.

O R2 – *Relatório de Análises Preliminares com Modelagem Computacional* também apresentou uma caracterização do clima para um ponto na entrada da BTS, com dados de reanálise ao longo de 60 anos (1948 a 2008), cujas estatísticas foram fornecidas pelo SMC-Brasil, disponibilizado pelo Ministério do Meio Ambiente. A Tabela 12 sumariza os dados apresentados e destaca as direções de incidência de ondas que podem se propagar pela entrada da BTS e atingir a região da Ponte.

Tabela 12. Sumário de estatísticas de onda em águas profundas defronte à BTS de 1948 a 2008, cf. seção 5.7.6. Destaca-se as ondas com direções incidentes que podem atingir a região do eixo da Ponte.

Direção	Azimute	% Direção	Períodos de Pico Espectral (s)				Alturas Significativas de Onda (m)			
			$T_{P50\%}$	$T_{P90\%}$	$T_{P99\%}$	$T_{P12h}$	$H_{S50\%}$	$H_{S90\%}$	$H_{S99\%}$	$H_{S12h}$
E	90.0°	4.6%	8.0	9.5	10.4	11.1	1.5	1.9	2.4	2.7
ESE	112.5°	58.1%	7.5	9.3	10.6	11.6	1.5	2.1	2.7	3.2
SE	135.0°	35.7%	7.0	9.3	11.9	13.3	1.6	2.2	2.8	3.2
SSE	157.5°	1.6%	8.7	12.3	14.0	14.6	1.7	2.3	2.9	3.3
S	180.0°	0.0%	5.2	7.6	10.8	10.8	1.0	1.8	1.8	1.8

Com relação à tabela acima, os sub índices 50%, 90%, 99% correspondem a frequências acumuladas de ocorrência. Por exemplo,  $H_{S90\%}$  indica o valor abaixo do qual estão 90% das alturas significativas registradas. O sub índice 12h indica o valor máximo de média móvel com período de 12h ao longo de todo o registro da série temporal de dados. Por exemplo,  $H_{S12h}$  indica o máximo valor de altura significativa promediada por períodos de 12h em todo o registro. No

caso deste registro de 60 anos, o período de 12h corresponde a 0,0023%, assim 99,77% das ondas registradas teriam altura significativa inferior a  $H_{s12}$ .

Em função do clima de ondas da região de estudo, foram simulados modelos de propagação de ondas para a BTS. Como pode haver significativa alteração de altura de onda em um dado local no interior da BTS, para pequenas alterações na direção de incidência e no período da onda, apresenta-se análise com leque de direções variando a cada  $5^\circ$  com azimutes entre  $135^\circ$  (SE) e  $180^\circ$  (S), inclusive, e gradação de períodos de 1 segundo na faixa de 7s a 15s. No total, os mapas a seguir totalizam 90 casos (10 direções  $\times$  9 períodos). Ao se analisar os 90 mapas de isolinhas de Fator de Amplificação de Altura de Onda, ( $H/H_o$ ), expostos a seguir, pode-se usar a Tabela 11 para inferir a altura de onda significativa com uma dada estatística.

Ressalta-se que estes 90 mapas já foram apresentados no R2. Conforme pode-se verificar comparando-se o R2 (Seção 5.7.6) e o R12, ou ainda a Tabela 12 e a Tabela 11, o clima de ondas caracterizado com o modelo WW3 e o com dados fornecidos pelo SMC-Brasil foi muito similar. Sendo assim, os modelos de propagação de ondas feitos na etapa preliminar abrangem o leque de direções de pico e períodos de pico representativos da região.

Embora não seja linear, existe uma boa correlação entre períodos de pico espectral e alturas significativas. Consequentemente, ondas com menor período, geralmente tem alturas menores. No caso da BTS, este fato é especialmente relevante por conta do banco de Santo Antônio, que fica na parte Leste da entrada da BTS, como indica a Figura 37. Devido a este banco, as ondas de maior período acabam sendo mais desviadas da região do eixo da Ponte. Por conseguinte, são as ondas com períodos menores, de 7 a 10s, as que atingem a região da ponte com as maiores alturas relativas  $H/H_o$ .

Pela Figura 52, estima-se que ondas com  $T_p$  na faixa de 7s a 10s teriam  $H_s < 3.0$ m. Assim, para se estimar a altura local  $H$  em função da altura ao largo, vale dizer  $H_o < 3.0$ m. Pela mesma figura, ondas com períodos mais longos, e.g. 15s, poderiam ter  $H_s$  ou  $H_o$  de até 2.5m. porém, como se mostra a seguir, as ondas mais longas apresentam valores muito baixos para o Fator de Amplificação de Altura de Onda, ( $H/H_o$ ) ao longo do eixo da Ponte.

Nos mapas a seguir, por conta do banco de Santo Antônio, verifica-se que os maiores valores de  $H/H_o$  ocorrem para as ondas com  $T_p = 7$ s, conforme se vê na Figura 92. Por esta razão destacou-se nesta mesma figura os mapas de todas as direções incidentes entre  $135^\circ$  e  $180^\circ$ . As demais, da Figura 93 à Figura 102, tem lógica inversa, pois cada figura mantêm a direção de incidência e apresenta mapas para a faixa de períodos de 8s a 15s.

Analisando os mapas, constata-se que o maior valor de  $H/H_o$  é próximo de 0.7, ou seja, nos locais indicados nos mapas as alturas de onda no local atingido no eixo da ponte poderiam ter alturas de até 70% das alturas das ondas em águas profundas. Indica-se na legenda de cada figura a seguir os piores casos.

A Figura 103 mostra os valores de altura de onda para a maior onda encontrada na série temporal gerada pelo modelo WW3. Tal onda em água profunda tem  $H_s = 3.79$  m,  $T_p = 9.8$  s e  $D_p = 156^\circ$ . Para este caso, a altura da onda que chega na ponte é de 1.6 m.

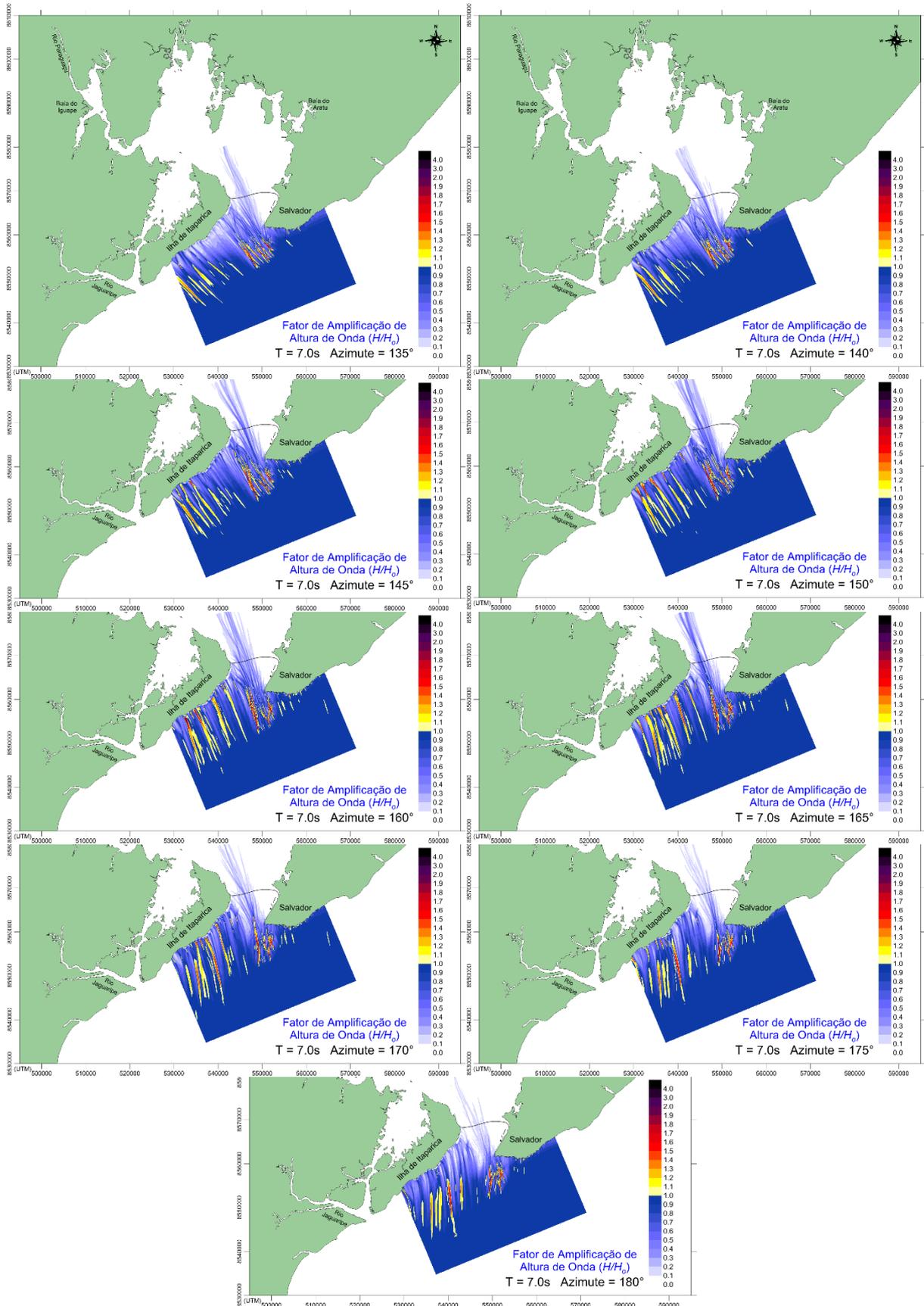


Figura 92. Propagação de ondas de 7 segundos vindas do largo com azimutes entre 135° e 180°. Pior caso para ondas vindas de azimute 165° com  $H/H_0$  de até 0.71  $\rightarrow H_{Smax} \approx 1.6m$ .

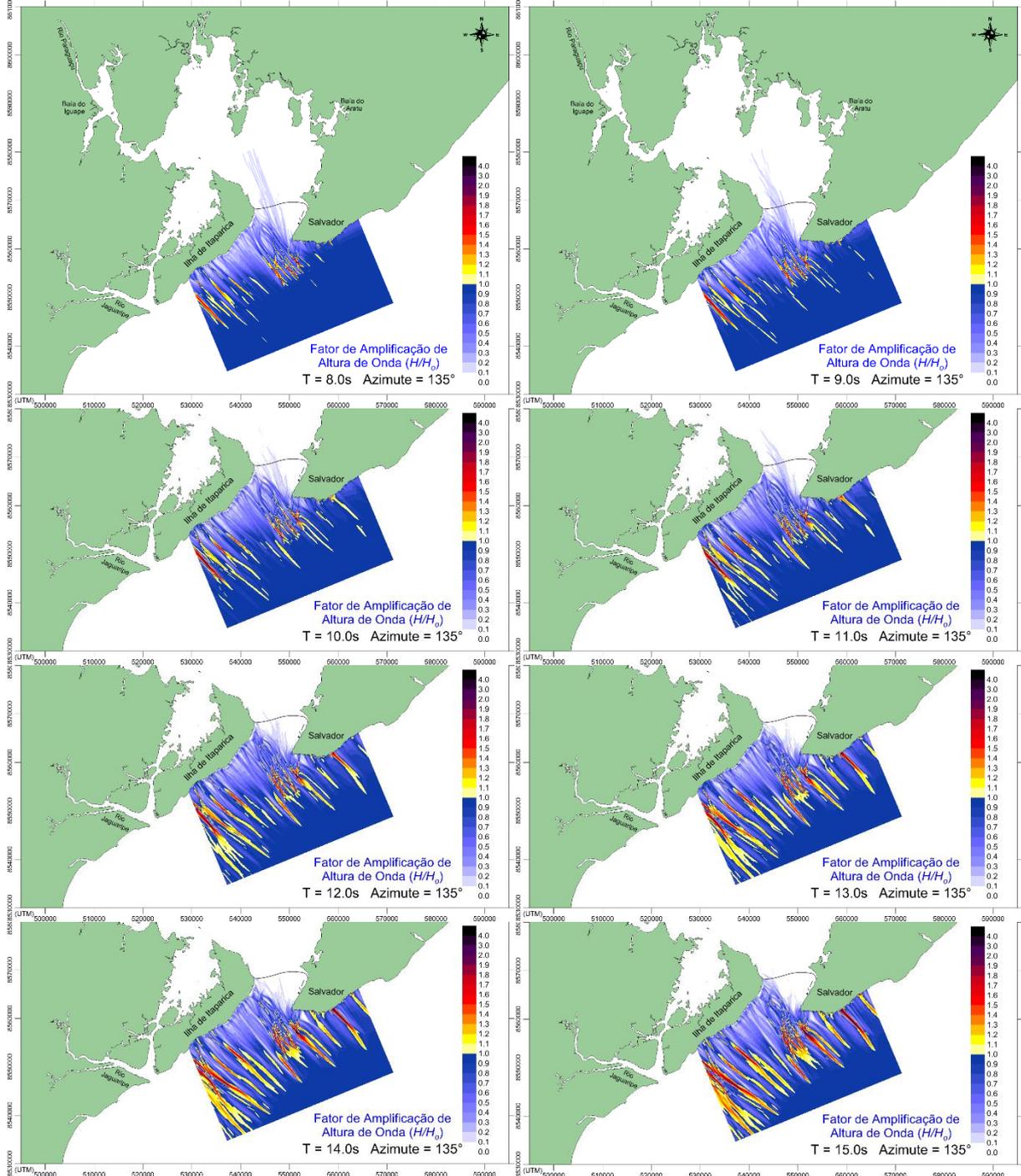


Figura 93. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de 135°. As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 8$  e 9 segundos, com  $H/H_{0max} = 0.26 \rightarrow H_{smax} \approx 0.6m$ .

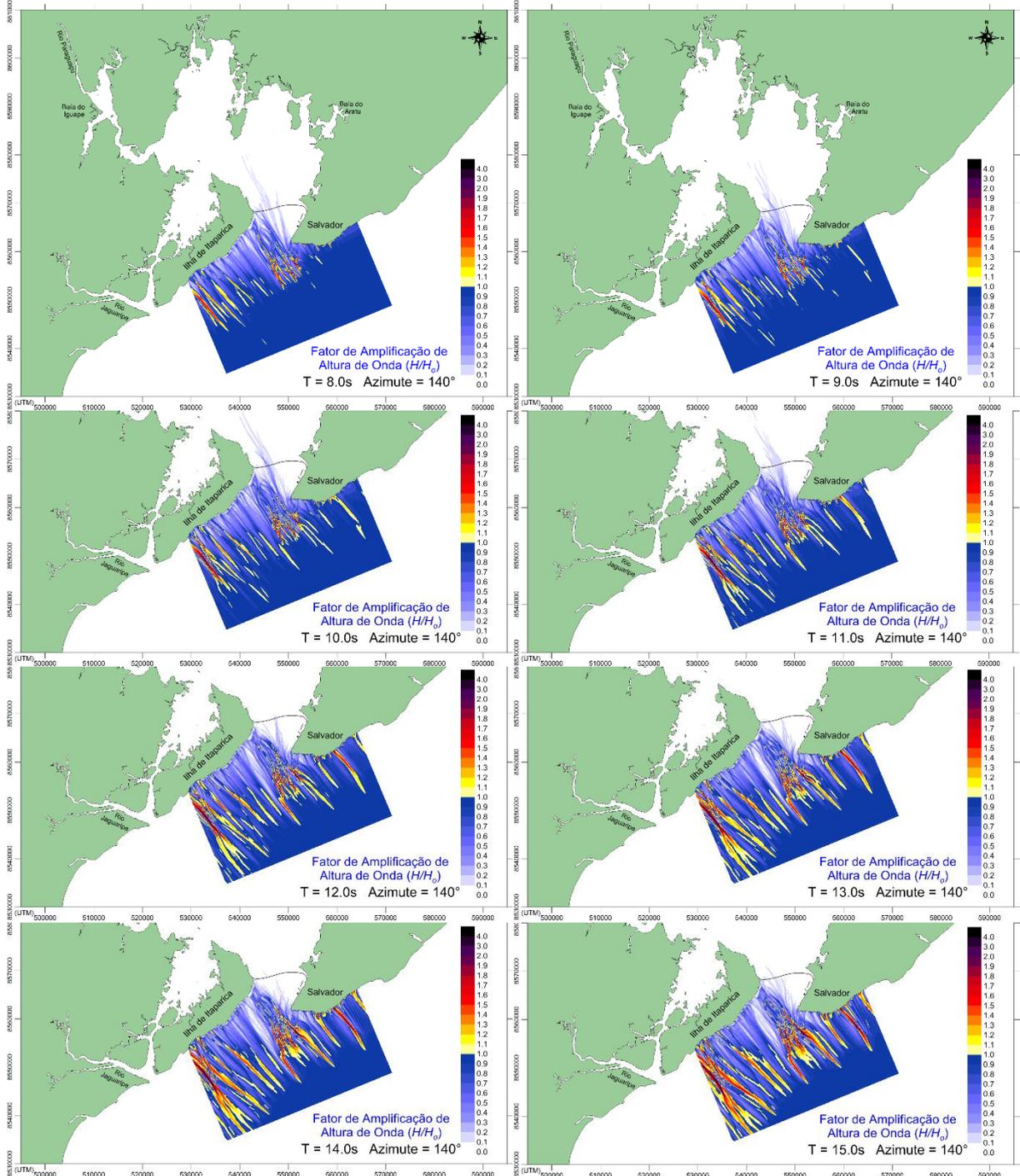


Figura 94. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $140^\circ$ . As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 10$  segundos, com  $H/H_{max} = 0.33 \rightarrow H_{Smax} \approx 0.7m$ .

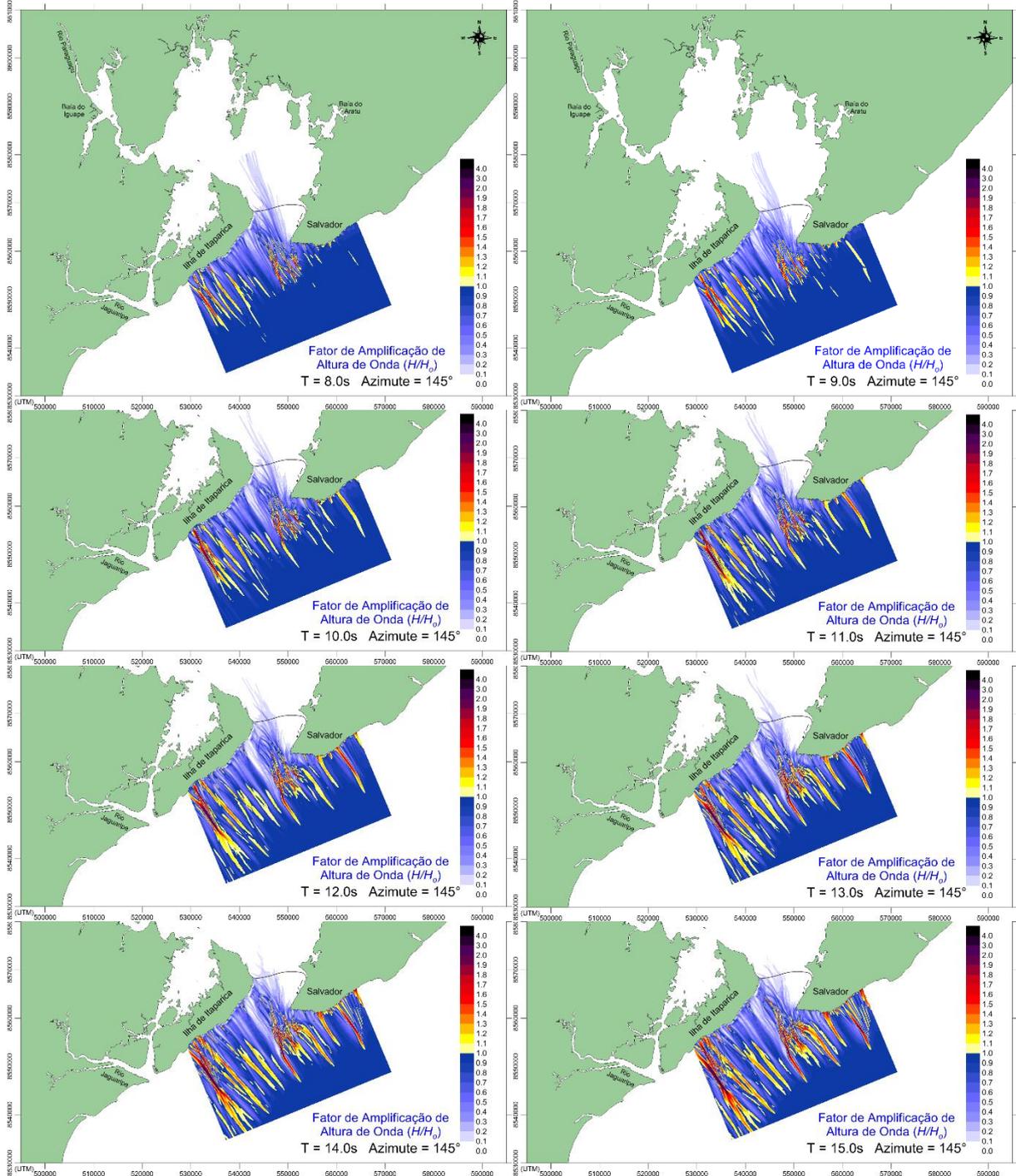


Figura 95. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de 145°. As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período T = 12 segundos, com  $H/H_{max} = 0.33 \rightarrow H_{Smax} \approx 1.0m$ .

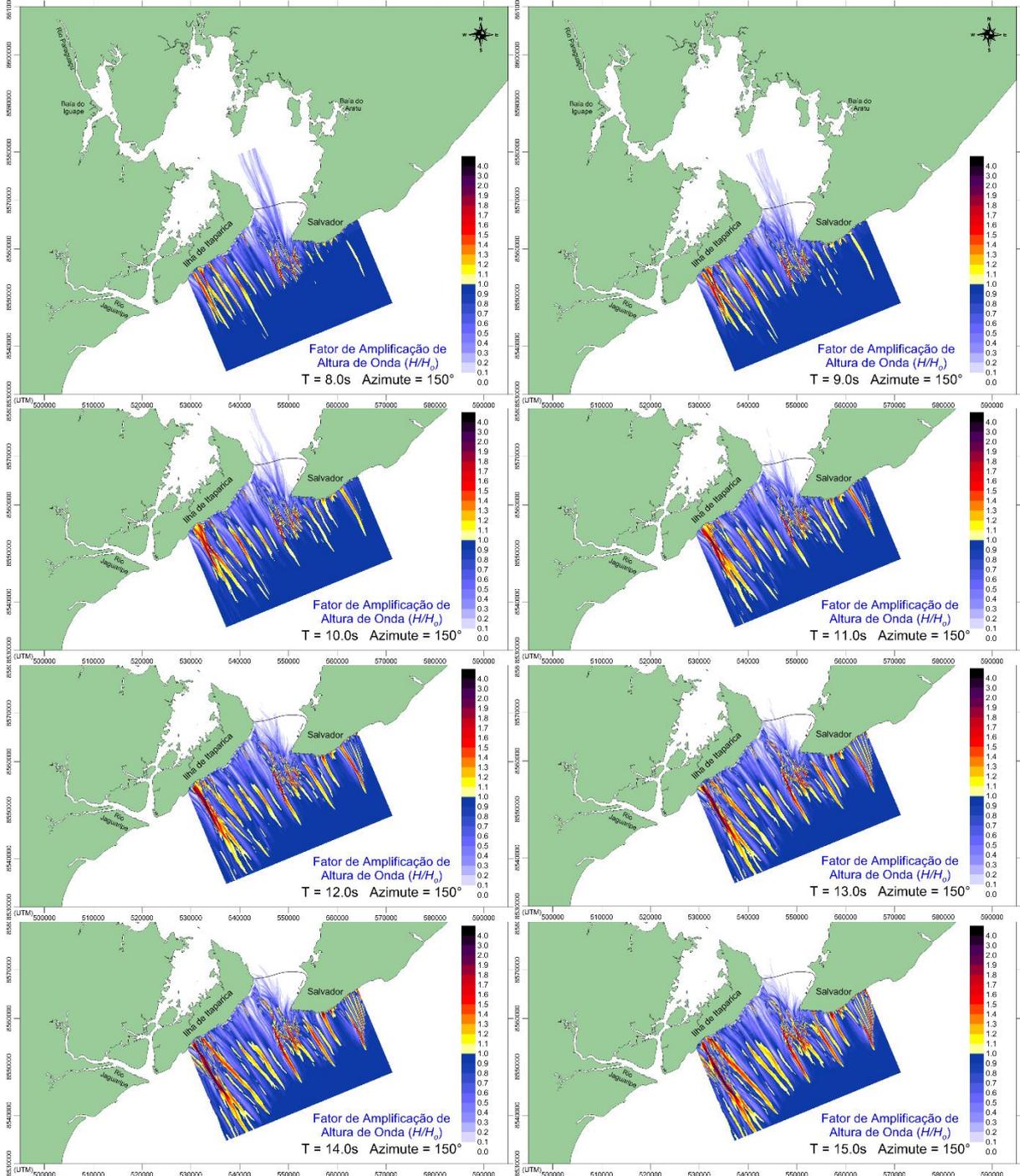


Figura 96. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de 150°. As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período T = 8 segundos, com  $H/H_{0max} = 0.46 \rightarrow H_{Smax} \approx 1.0m$ .

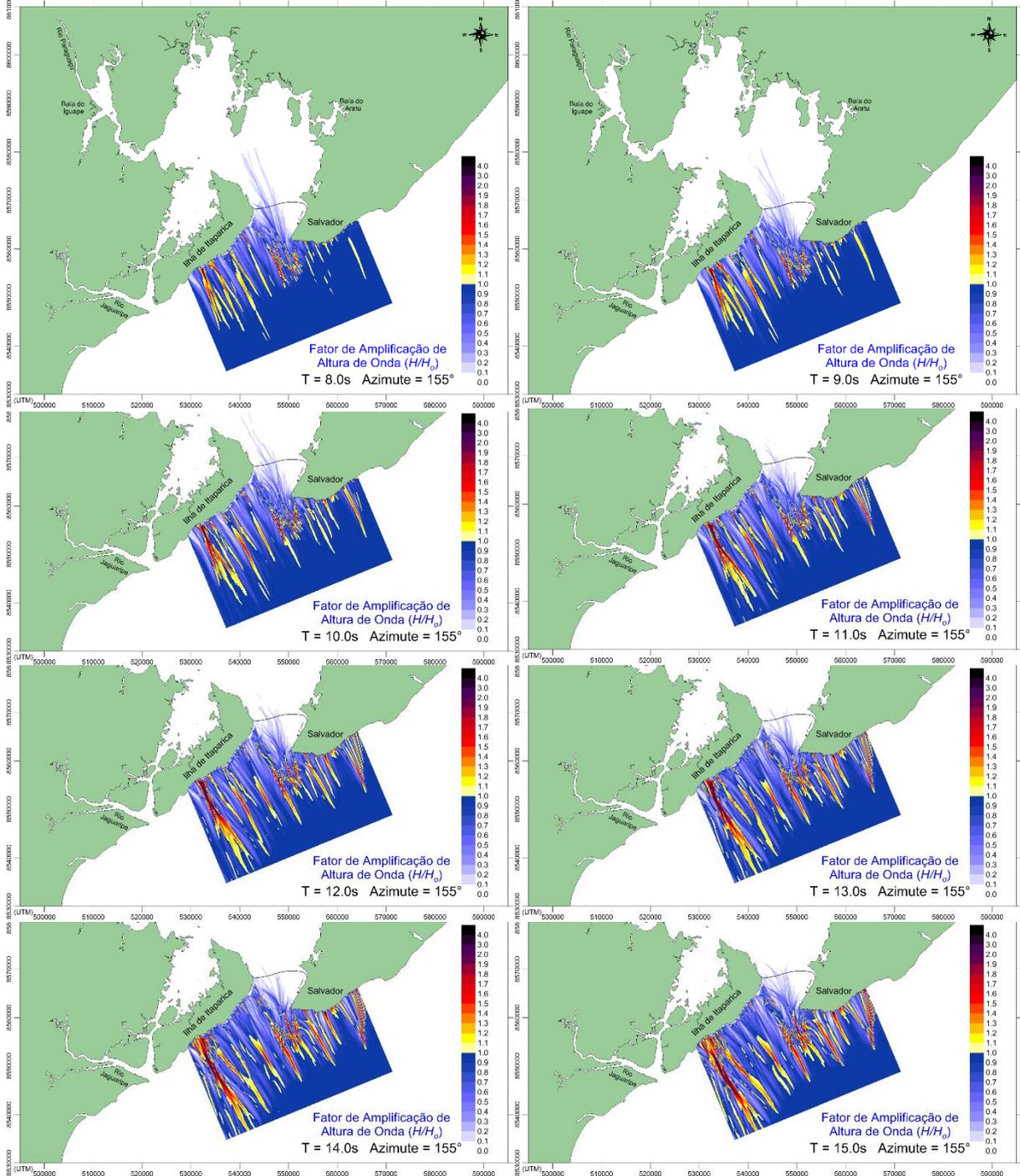


Figura 97. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $155^\circ$ . As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 8$  segundos, com  $H/H_{0max} = 0.41 \rightarrow H_{Smax} \approx 0.9m$ .

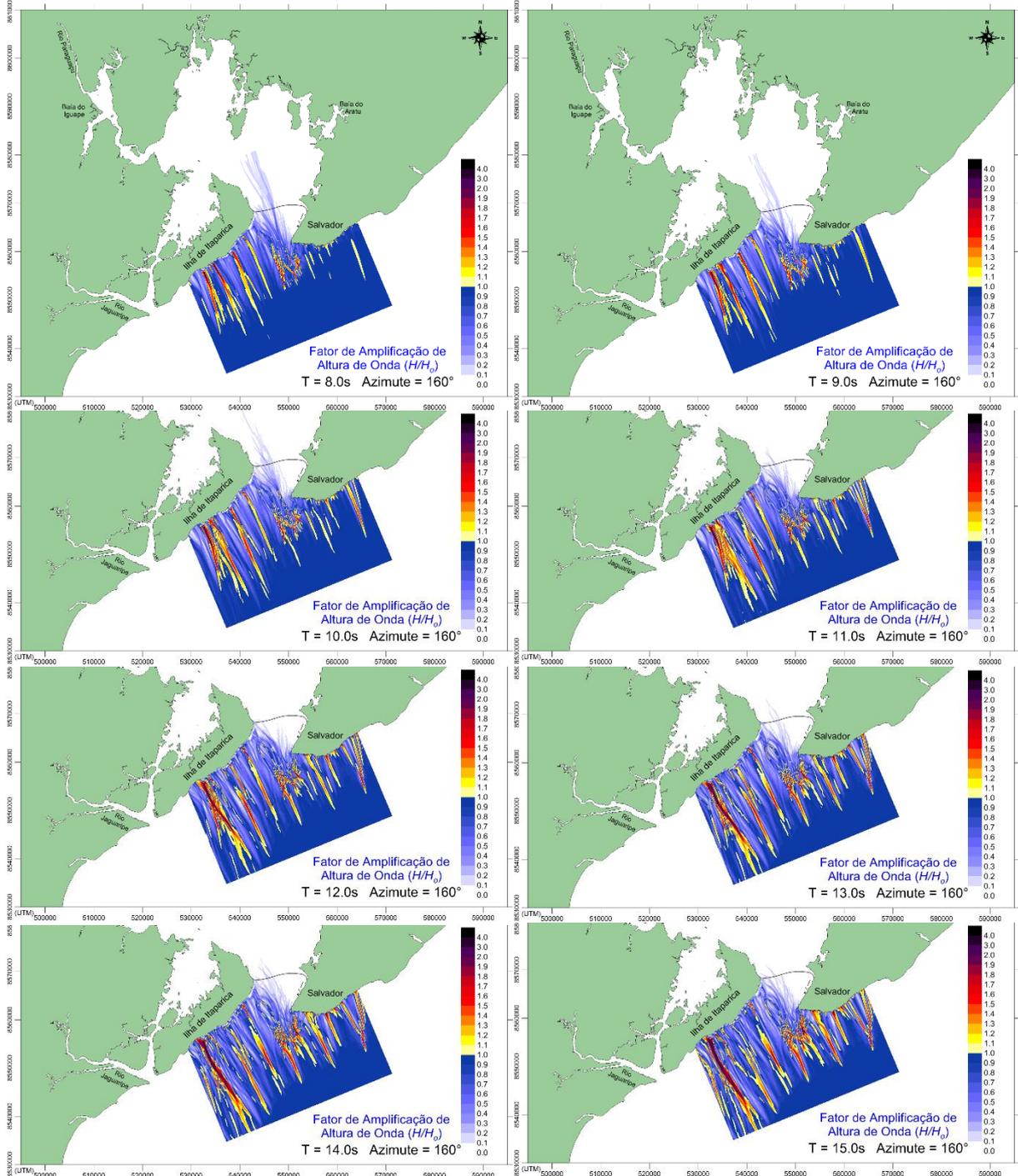


Figura 98. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $160^\circ$ . Neste caso, as ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 8$  e  $9$  segundos, com  $H_{Smax} < 0.6m$ .

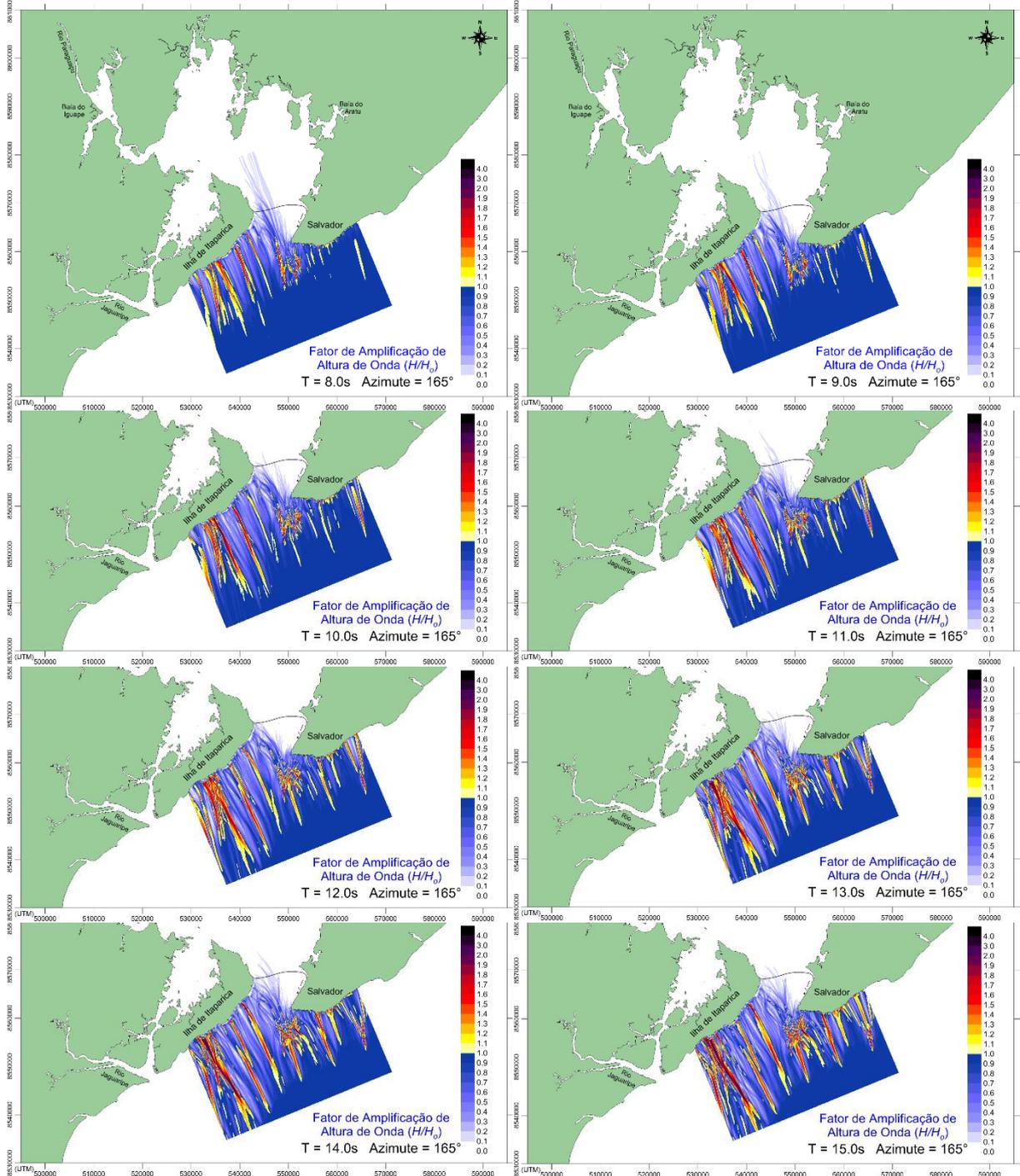


Figura 99. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de 165°. As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 8$  segundos, com  $H/H_{0max} = 0.60 \rightarrow H_{Smax} \approx 1.3m$ .

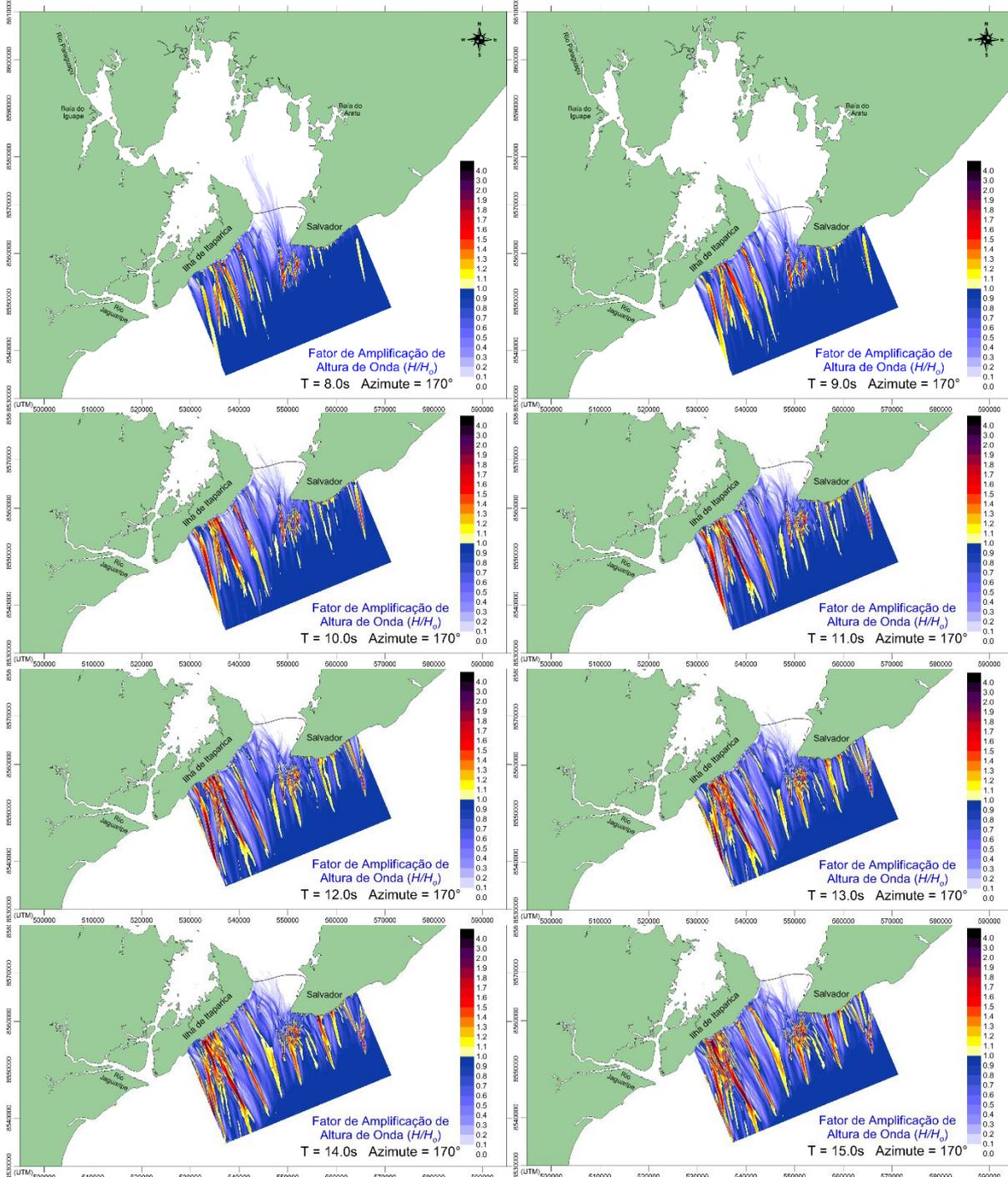


Figura 100. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de 170°. As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período T = 9 segundos, com  $H/H_{0max} = 0.35 \rightarrow H_{Smax} \approx 0.8m$ .

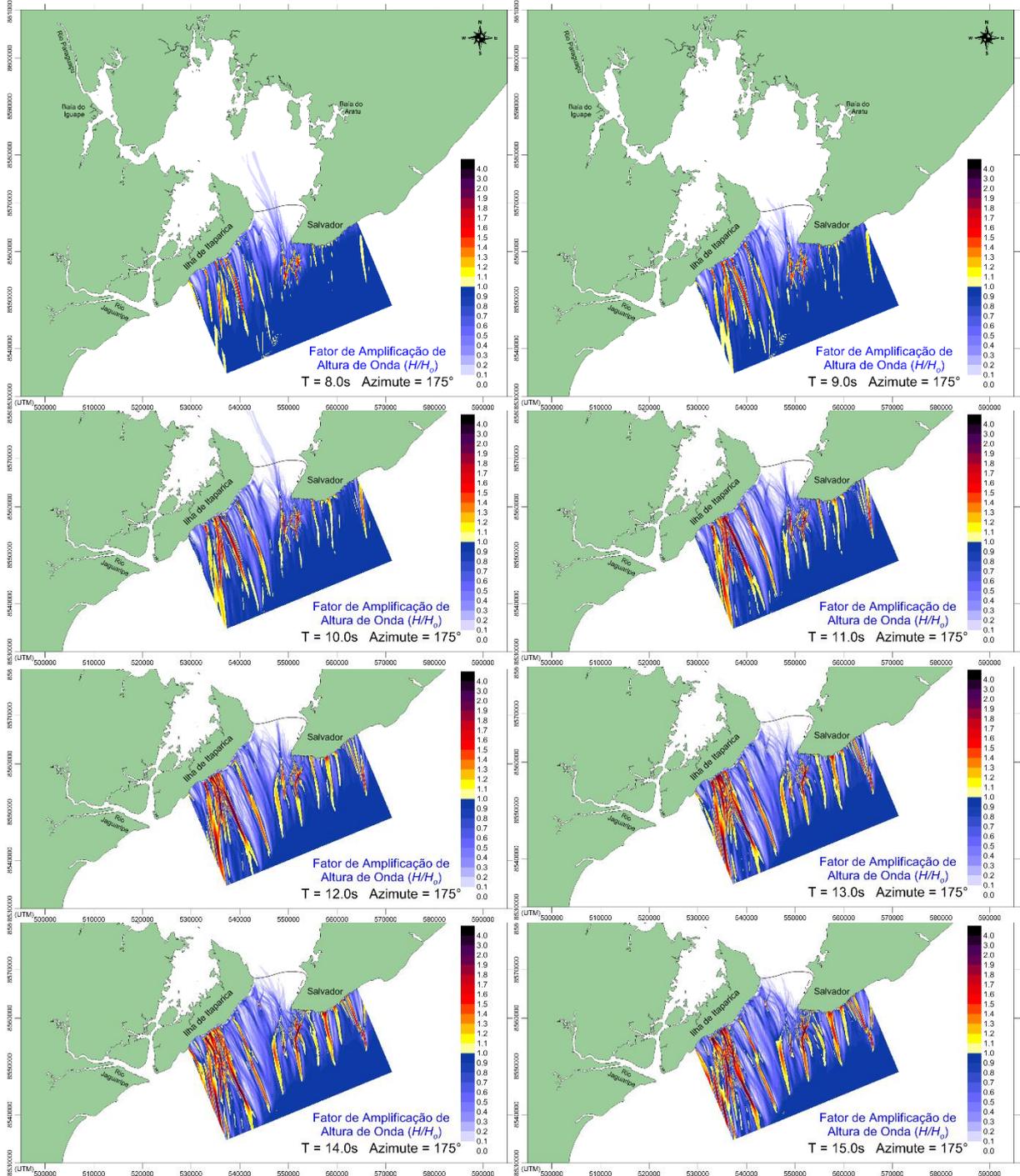


Figura 101. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $175^\circ$ . As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 10$  segundos, com  $H/H_{max} = 0.28 \rightarrow H_{Smax} \approx 0.6m$ .

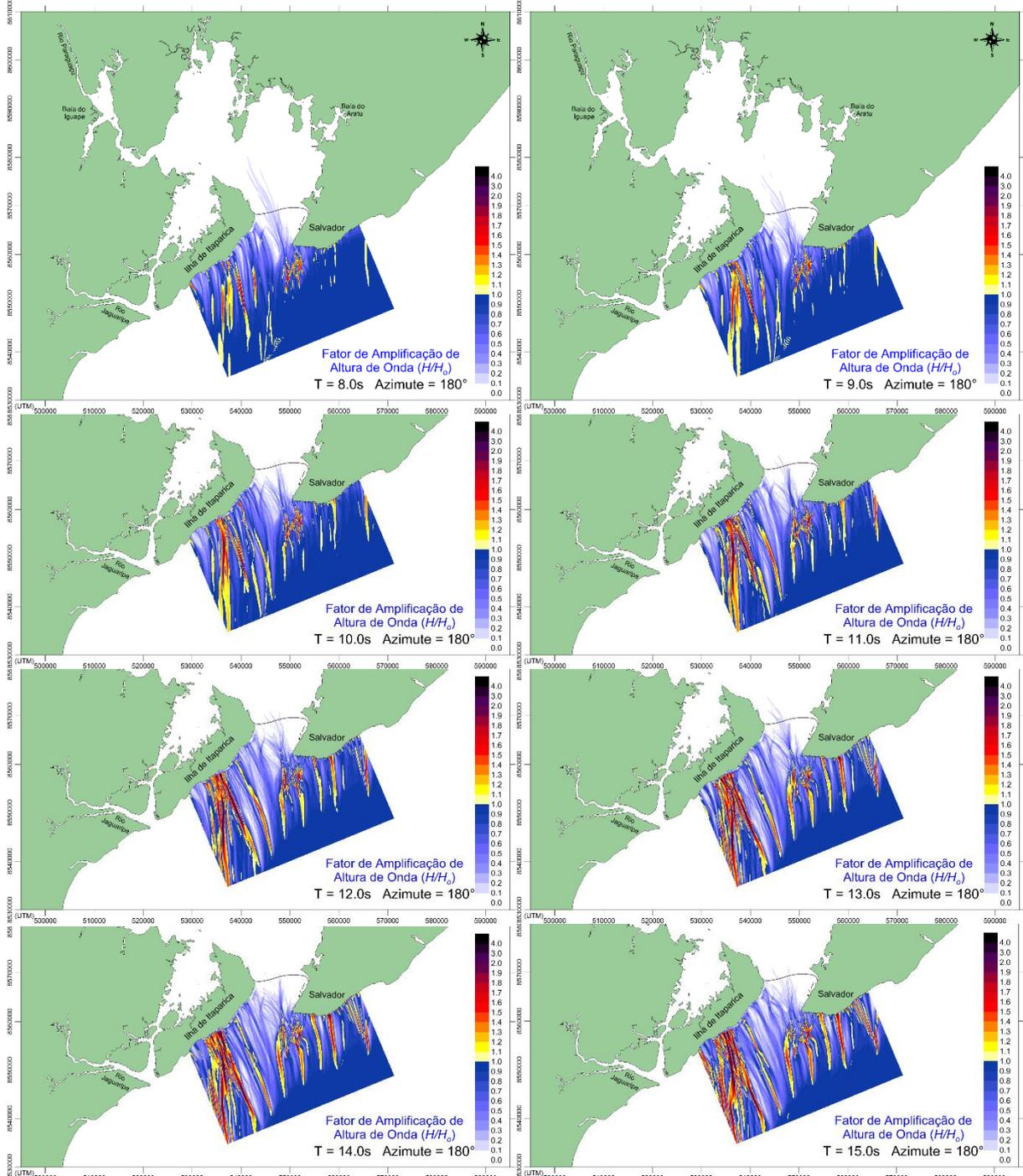


Figura 102. Propagação de ondas com períodos de 8 a 15 segundos vindas do largo com azimute de  $180^\circ$ . As ondas que atingiriam a Ponte com maior altura teriam período  $T = 13$  segundos, com  $H/H_{0max} = 0.20 \rightarrow H_{Smax} \approx 0.7m$ .

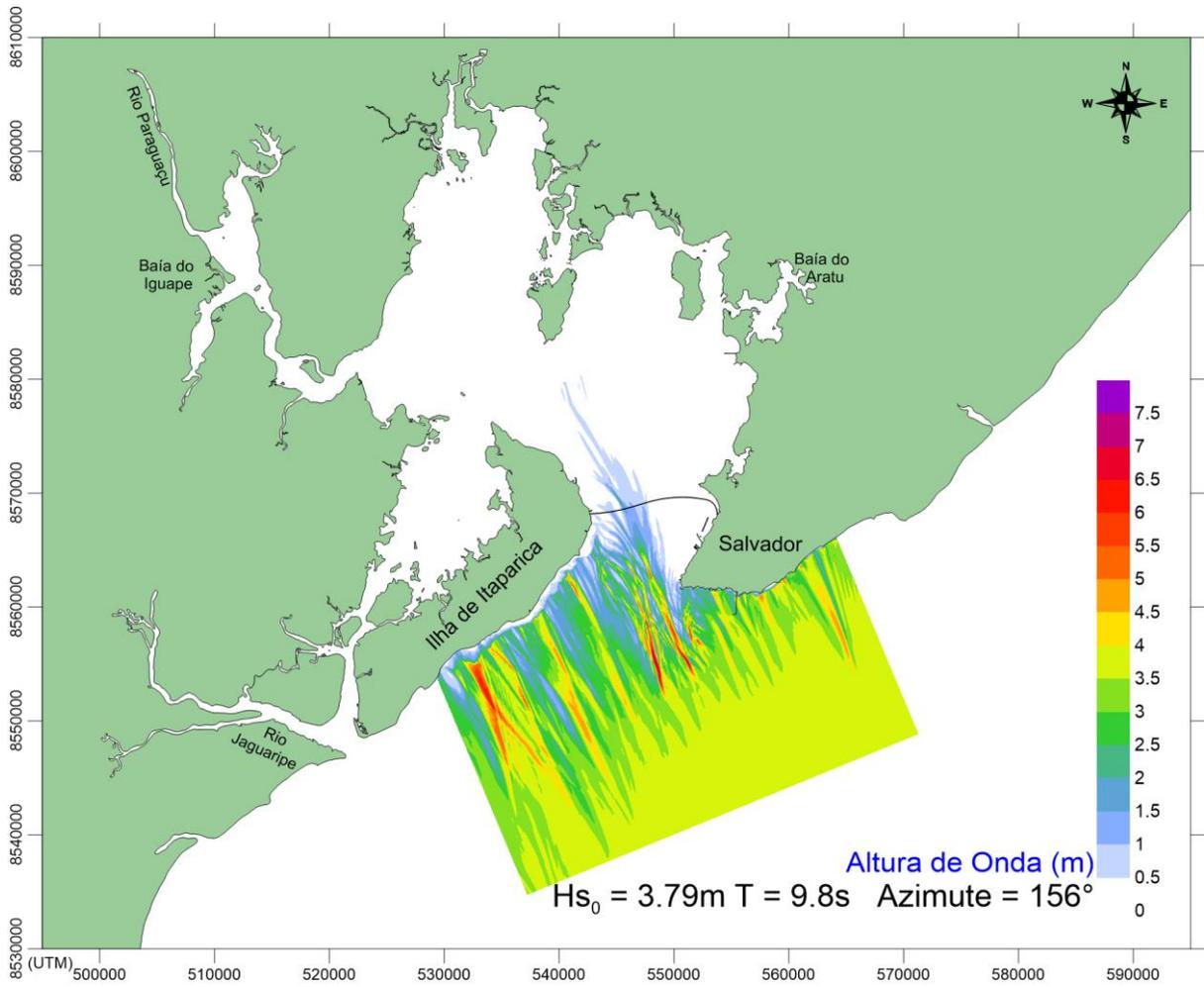


Figura 103: Propagação de onda para a onda com maior altura significativa em águas profundas, considerando a série de 30 anos reconstituída com o modelo WW3. A altura da onda na ponte é em torno de 1.7 m.

## 7 Reconhecimentos

Este relatório contou com a participação dos técnicos listados abaixo. Na lista, a sigla AECO representa a Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/ UFRJ.

- Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D.: responsável técnico e coordenador geral, participou da concepção das modelagens, desenvolvimento dos modelos, análise de dados, elaboração de mapas e gráficos, edição e finalização deste relatório.
- Eduardo E. Gonzáles-Gorbeña, D.Sc.: pesquisador em pós-doc vinculado à AECO, participou da concepção de modelagens, desenvolvimento dos modelos, análise de dados, elaboração de mapas e gráficos, edição deste relatório, em especial na seção 5.6.
- Julia Lima Soares, Oceanógrafa, mestranda na AECO, participou de análise de dados de ondas, elaboração de gráficos e tabelas, com o SMC-Brasil, cf. seção 5.7.6.
- Ludmila Assunção Pinheiro, D.Sc., pesquisadora em pós-doc na AECO, participou de análise de dados, elaboração de mapas e gráficos e edição final deste relatório.
- Mario Grüne Souza e Silva, M.Sc., doutorando AECO, participou de análise de dados, elaboração de mapas e gráficos e edição final deste relatório.
- Otávio Goulart Pécly, D.Sc.: participou de análise de dados para desenvolvimento dos modelos, elaboração de mapas e gráficos, edição de partes deste relatório..
- Patricia Auler Rosman, M.Sc.: participou de suporte técnico, manutenção evolutiva do SisBaHiA<sup>®</sup>, e elaboração de mapas e gráficos.

---

Rio de Janeiro, 30 de Março de 2016.

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman  
COORDENADOR DO PROJETO

Prof. Antonio Carlos Fernandes  
COORDENADOR  
PROGRAMA DE ENGENHARIA OCEÂNICA

Fernando Alves Rochicha  
DIRETOR SUPERINTENDENTE  
FUNDAÇÃO COPPETEC