

Fernanda Cirello

**Influência das ondas de infragravidade no  
processo de transposição sedimentar no  
promontório entre as praias Brava e Ingleses,  
norte da ilha de Santa Catarina, SC**

Florianópolis

2019

Fernanda Cirello

**Influência das ondas de infragravidade no processo de  
transposição sedimentar no promontório entre as  
praias Brava e Ingleses, norte da ilha de Santa  
Catarina, SC**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido  
à Universidade Federal de Santa Catarina  
como exigência parcial para obtenção do  
grau de Bacharel em Oceanografia.

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro de Ciências Físicas e Matemáticas  
Coordenadoria Especial de Oceanografia  
Curso de Graduação em Oceanografia

Orientador: Antonio Fernando Härter Fetter Filho  
Coorientador: Guilherme Vieira da Silva

Florianópolis  
2019

Cirello, Fernanda

Influência das ondas de infragravidade no processo de transposição sedimentar no promontório entre as praias Brava e Ingleses, norte da ilha de Santa Catarina, SC/ Fernanda Cirello – Florianópolis, 2019.

97 p. : il. (color.) ; 30 cm.

Orientador: Antonio Fernando Härter Fetter Filho

Coorientador: Guilherme Vieira da Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

1. Transporte de sedimentos. 2. Promontório. 3. Ondas de infragravidade. 4. Modelagem numérica. I. Fetter Filho, Antonio Fernando Härter. II. Vieira da Silva, Guilherme. III. Título.

Fernanda Cirello

**Influência das ondas de infragravidade no processo de transposição sedimentar no promontório entre as praias Brava e Ingleses, norte da ilha de Santa Catarina, SC**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Universidade Federal de Santa Catarina como exigência parcial para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

---

**Antonio Fernando Härter Fetter Filho**  
Orientador

---

**Professor**  
Antonio Henrique da Fontoura Klein

---

**Professor**  
Mauro Michelena Andrade

Florianópolis  
2019

*À minha querida amiga Lylyan Karlinsk Gomes que teve seu sonho interrompido e ao meu avô Ariovisto Cirello por ter me ensinado a amar a ciência.*

# Agradecimentos

Agradeço ao professor Antonio F. H. Fetter Filho e Antonio H. F. Klein pela oportunidade de participar do projeto TRANSED e entrar para o universo da modelagem. Minha também grande admiração por serem excelentes professores e incansáveis pelo desenvolvimento do curso de Oceanografia na UFSC. O meu muito obrigada a todos emails trocados, dúvidas respondidas e todo o suporte do meu coorientador, Guilherme Vieira da Silva. Obrigada por toda atenção remota e por fornecer teu modelo e tornar este trabalho possível! Muito obrigada também ao Mauro Michelena por aceitar fazer parte da banca e pelas correções e considerações neste trabalho. Luana Machado, palavras são insuficientes para agradecer a oportunidade do estágio na SLI Coastal Solutions e poder conviver contigo. Obrigada por todas ideias, discussão e apoio que você me deu, você é uma grande inspiração e te admiro muito! Eric Nardi, obrigada por toda a paciência e disponibilidade para me ajudar. Você me apresentou as primeiras linhas de comando no Matlab e teu suporte foi fundamental para processar os resultados do XB. Obrigada por ser esse gênio da programação e me ensinar a deixar tudo mais fácil!

Agradeço também todo o pessoal do Labdino pelo suporte, em especial a Yhaohannah Lima e ao Luis Mendonça, que sempre super me ajudaram com os computadores e os modelos rodando no lab. Muito obrigada ao pessoal do LOC por sempre me receber tão bem e me ajudar com os dados e referências para o trabalho, em especial a Charline Dalinghaus e o Michel Franco! Obrigada também ao professor Pedro Pereira pelas dicas na discussão deste trabalho. À toda equipe da SLI por ser essa empresa incrível e por me fazerem me sentir em casa durante o período do estágio e também por auxiliar disponibilizando máquina e ferramentas. Bruno Monti e Laíssa Baltazar, obrigada por me encorajarem nos meus momentos de surto com o modelo quebrando ou dando resultados bizarros. Sem vocês do lado para dar boas risadas, tudo seria bem mais chato para fazer e também menos colorido, Monti! Arthur Ohz e Wagner Costa, obrigada por toda ajuda com os meus primeiros passos com o XB e o D3D! Francisco Jr., sem as nossas infinitas conversas, jamais teria persistido nisso tudo, obrigada! Renan Ozekoski obrigada por ser esse grande amigos e agora sócios! Queridas da Base Pilates, Elke Longo e Camila Tombini, a coluna só continuou boa por causa de vocês! hehe Lisana Scottá, Marina Rizzo e Maria Clara Rios, amigas incríveis da minha vida, obrigada por todos os cafés, comidinhas e carinho pra dar uma aliviada nesse período! Pai, mãe, Bel, vó Oneida e vô Ari, obrigada por serem a melhor família do mundo e por sempre me apoiarem e acreditarem em mim, vocês são minhas raízes e minha eterna força! Amo vocês!

*"Caminho eternamente por essas praias, Entre a areia e espuma.  
A maré alta apagará minha pegadas, E o vento soprará a espuma.  
Porém o mar e a praia permanecerão eternamente."*

*Khalil Gibran*

# Resumo

Este trabalho busca analisar a influência das ondas de infragravidade na transposição sedimentar entre a praia Brava e Ingleses, na ponta das Feiticeiras, norte da ilha de Santa Catarina. É utilizado o modelo numérico Xbeach nos modos estacionário e não-estacionário em cenários de ondas médias e extremas reportadas na bibliografia. O modelo foi calibrado em ambos os modos com dados de ondas e de sedimentos medidos. Derivadores são empregados para observar o padrão de circulação das correntes e é calculado o balanço do transporte longitudinal na região para cada cenário. No modo não-estacionário, ondas de infragravidade apresentam maiores amplitudes em cenários de ondas extremas de SE e é observada intensificação de correntes longitudinais e correntes de retorno em todos cenários. Os resultados indicam transporte longitudinal entre as praias de uma ordem de magnitude maior no modo não-estacionário. Esta é a primeira vez que o modelo Xbeach é utilizado para avaliar a transposição de sedimento em praias de enseada na ilha de Santa Catarina.

**Palavras-chave:** Xbeach. Praias de enseada. Transposição de sedimentos. Promontórios. Brava. Ingleses.

# Abstract

This work aims to analyze the influence of the infragravity waves on headland sand bypassing between Brava and Ingleses beach, at the Feiticeiras headland, north of Santa Catarina island. The Xbeach numerical model is applied in the stationary and non-stationary modes in medium and extreme wave scenarios reported in the bibliography. The model is calibrated in both modes with measured wave and sediment trap data. Virtual drifters are used to observe the current flow pattern. The longitudinal transport balance in the region is calculated for each scenario. In the non-stationary mode, infragravity waves present larger amplitudes in scenarios of extreme SE waves. Intensification of longitudinal currents and rip currents are observed in all scenarios. The results indicate longitudinal transport between the beaches of an order of magnitude higher in non-stationary mode. This is the first time that the Xbeach model is used to evaluate the headland sand bypassing at embayed beaches in Santa Catarina island.

**Keywords:** Xbeach. Embayed beaches. Bypassing. Headland. Brava. Ingleses.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Características de onda . . . . .	22
Figura 2 – Classificação de ondas . . . . .	23
Figura 3 – Grupo de ondas e ondas de infragravidade associadas . . . . .	26
Figura 4 – Representação esquemática da variação transversal de mínima, média e máxima altura de ondas, com o associado <i>set-up</i> pela zona de surf. $x_1$ e $x_2$ são as posições máximas e mínimas do ponto de quebra e $h$ é a profundidade. . . . .	27
Figura 5 – Ilustração de um corte transversal de um sistema de praia ( <i>beach system</i> ) bidimensional com os processos das ondas ( <i>wave process</i> ) e o tipo de morfologia ( <i>morphology</i> ). Contém uma zona subaérea ( <i>subaerial beach</i> ) ou zona de espraiamento ( <i>swash</i> ) que fica acima da margem da praia ( <i>shoreline</i> ); Uma zona de surfe ( <i>surf zone</i> ) contendo bancos submersos ( <i>bar</i> ), canais ( <i>channel</i> ) e quebra de ondas ( <i>wave breaking</i> ); e uma zona próxima à praia ( <i>neashore zone</i> ) onde ocorre o empinamento da onda ( <i>wave shoaling</i> ). Esta zona se estende em direção ao mar até a base da onda ( <i>wave base</i> ) . . . . .	29
Figura 6 – Esquema de transposição de sedimentos entre promontórios (SHORT; MASSELINK, 1999). . . . .	32
Figura 7 – Área de estudo: (1) localização do estado de Santa Catarina na América do Sul, (2) localização da ilha de Santa Catarina no estado de Santa Catarina, (3) localização da área de estudo. . . . .	36
Figura 8 – Localização das praias (em branco), promontórios (em preto) e ilhas (em cinza) da região da área de estudo. Fonte: ESRI World Imagery. EPSG:5880. DATUM: SIRGAS2000. PROJEÇÃO: Policônica. . . . .	37
Figura 9 – Fluxograma geral da metodologia do trabalho. . . . .	40
Figura 10 – Seleção dos cenários de ondas. a) Porcentagem de ocorrência por direção. b) Função de distribuição acumulativa de altura de ondas em cenários médios e extremos. Extraído de: Vieira da Silva et al. (2018) . . . . .	42
Figura 11 – Localização do ADCP em ciano. Período de fundeação: outubro de 2013 a setembro de 2014. Dados concedidos pela CASAN. Localização das armadilhas de sedimento em amarelo. Fonte: ESRI World Imagery. EPSG:5880. DATUM: SIRGAS2000. PROJEÇÃO: Policônica. . . . .	43

Figura 12 – Grades numéricas utilizadas para simulação de onda. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. Fonte das grades regional e intermediária: Vieira da Silva et al. (2016b). . . . .	45
Figura 13 – Batimetria interpolada para as grades numéricas regional e intermediária. Fonte: ESRI World Imagery. DATUM horizontal: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. DATUM vertical: Nível médio do mar (NMM). . . . .	46
Figura 14 – Batimetria interpolada para as grade numérica local. Fonte: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. DATUM vertical: Nível médio do mar (NMM). . . . .	46
Figura 15 – Posição inicial dos derivadores. Fonte: ESRI World Imagery. DATUM horizontal: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. DATUM vertical: Nível médio do mar (NMM). . . . .	50
Figura 16 – Séries temporais dos períodos de verão (26 a 31 de janeiro de 2014) e inverno (17 a 22 de agosto de 2014) selecionados para calibração de ondas. $H_s$ : altura significativa, $T_p$ : Direção de pico, $Dir_m$ : Direção média. . . . .	51
Figura 17 – <i>Boxplot</i> da magnitude do transporte de carregamento de fundo medidos e simulados em HS1 e HS2. . . . .	53
Figura 18 – Propagação dos cenários de ondas para a costa com o D3D. Na primeira linha, eventos médios e na segunda linha, os extremos. A estrela branca representa o local dos parâmetros de ondas extraídos para o XB. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	56
Figura 19 – Altura de ondas de infragravidade computadas pelo modelo XB no modo não-estacionário em cenários médios. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	57
Figura 20 – Altura de ondas de infragravidade computadas pelo modelo XB no modo não-estacionário em cenários médios. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	58
Figura 21 – Cenário médio de ondas de direção NE. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	59

Figura 22 – Cenário extremo de ondas de direção NE. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	60
Figura 23 – Cenário médio de ondas de direção E. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	62
Figura 24 – Cenário extremo de ondas de direção E. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	63
Figura 25 – Cenário médio de ondas de direção SE. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	65
Figura 26 – Cenário extremo de ondas de direção SE. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	66
Figura 27 – Cenário médio de ondas de direção S. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	67

Figura 28 – Cenário extremo de ondas de direção S. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	68
Figura 29 – Parâmetro adimensional de escala do emabaimento de Short e Mas-selink (1999) para as praias Brava e Ingleses. . . . .	70
Figura 30 – Propagação de ondas com as grades testadas na calibração. Notar na área exterior às grades o resultado da propagação com o modelo D3D. . . . .	80
Figura 31 – <i>Scatter plot</i> da série temporal da calibração de ondas no período de 26 de janeiro de 2014 a 06 de fevereiro de 2014. Hs: altura significativa, Tp: Direção de pico, Dir: Direção média. . . . .	87
Figura 32 – <i>Scatter plot</i> da série temporal da calibração de ondas no período de 17 de agosto de 2014 a 22 de agosto de 2014. Hs: altura significativa, Tp: Direção de pico, Dir: Direção média. . . . .	88
Figura 33 – Série temporal do transporte de sedimentos por carregamento de fundo simulado e medido no período entre 17 a 22 de agosto de 2019 no modo estacionário. . . . .	89
Figura 34 – Série temporal do transporte de sedimentos por carregamento de fundo simulado e medido no período entre 17 a 22 de agosto de 2019 no modo não-estacionário. . . . .	90
Figura 35 – <i>Drifters</i> no cenário médio de NE nos modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	91
Figura 36 – <i>Drifters</i> no cenário extremo de NE no modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	91
Figura 37 – <i>Drifters</i> no cenário médio de E nos modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	92
Figura 38 – <i>Drifters</i> no cenário extremo de E no modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	92
Figura 39 – <i>Drifters</i> no cenário médio de SE nos modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	93

Figura 40 – <i>Drifters</i> no cenário extremo de SE no modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	93
Figura 41 – <i>Drifters</i> no cenário médio de S nos modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	94
Figura 42 – <i>Drifters</i> no cenário extremo de S no modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. . . . .	94
Figura 43 – Exemplo de megacorrentes (erosão em grande escala interrompida topograficamente) em três praias de Sydney. Fonte: Narrabeen de dados de campo; Palm Beach de Wright, Cowell e Coffey (1980); Curl Curl de imagens aéreas. Extraído de: Short (1985). . . . .	96
Figura 44 – Assinatura do processo associado com a topografia de banco e corrente transversal (Palm Beach, N.S.W, Fevereiro de 1980). Note as correntes fortes e as correntes alimentadoras. Extraído de: Wright e Short (1984). . . . .	97

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros dos casos de ondas . . . . .	42
Tabela 2 – Erros estatísticos para $H_s$ , $T_p$ e $Dir_m$ . . . . .	52

# Lista de abreviaturas e siglas

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CFM	Centro de Ciências Físicas e Matemáticas
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
D3D	Delft3D
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil
IG	Infragravidade
INSTAT	Modo não-estacionário do modelo Xbeach
ISC	Ilha de Santa Catarina
LabDino	Laboratório de Dinâmica dos Oceanos
LTT	Terraço de baixa mar ( <i>Low Tide Terrace</i> )
LOC	Laboratório de Oceanografia Costeira
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
R	Refletiva ( <i>Reflective</i> )
RBB	Banco e Praia Rítmica ( <i>Rhythmic Bar and Beach</i> )
SC	Santa Catarina
STAT	Modo estacionário do modelo Xbeach
TBR	Banco e Correntes Transversais ( <i>Transverse Bar and Rips</i> )
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
WW3	Wave Watch III
XB	Xbeach

# Lista de símbolos

$H$	Altura
$H_{rms}$	Altura quadrática média
$HIG_{rms}$	Altura quadrática média de ondas de infragravidade
$H_s$	Altura significativa
$A$	Amplitude
$C_f$	Celeridade de fase
$C_g$	Celeridade de grupo
$L$	Comprimento de onda
$\theta$	Direção de propagação
$Dir_m$	Direção média
$Dir_p$	Direção de pico
$\eta$	Elevação da superfície
$f$	Frequência
$\omega$	Frequência angular
$g$	Aceleração da gravidade
$\beta$	Inclinação do fundo
$k$	Número de onda
$\Omega$	Parâmetro adimensional de classificação de praias
$\delta'$	Parâmetro de escala do embaiamento
$\beta_b$	Parâmetro de inclinação do fundo normalizado
$T$	Período
$T_p$	Período de pico
$T_p$	Período médio
$h$	Profundidade

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>21</b>
2.1	Objetivo Geral	21
2.2	Objetivos Específicos	21
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Ondas</b>	<b>22</b>
3.1.1	Ondas de gravidade geradas por ventos	23
3.1.2	Ondas de infragravidade	25
<b>3.2</b>	<b>Transporte de sedimentos e praias de enseada</b>	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Transposição de sedimentos entre promontórios</b>	<b>31</b>
<b>3.4</b>	<b>O modelo Delft3D Wave</b>	<b>32</b>
<b>3.5</b>	<b>O Modelo Xbeach</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>35</b>
4.1	Norte da ilha de Santa Catarina	36
4.2	Brava	36
4.3	Ingleses	38
4.4	Ponta das Feiticeiras	38
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Tratamento inicial de dados</b>	<b>41</b>
5.1.1	Dados batimétricos e de granulometria do sedimento	41
5.1.2	Dados de onda	41
5.1.3	Dados de ADCP	42
5.1.4	Dados transporte sedimento	42
<b>5.2</b>	<b>Confecção das grades de cálculo e interpolação da batimetria</b>	<b>43</b>
<b>5.3</b>	<b>Calibração do modelo</b>	<b>47</b>
5.3.1	Calibração modelo - Ondas	47
5.3.2	Calibração modelo - Transporte de sedimentos	48
<b>5.4</b>	<b>Simulação do transporte de sedimentos em cenários médios e extremos</b>	<b>48</b>
<b>5.5</b>	<b>Derivadores virtuais</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>51</b>
6.1	Calibração de ondas	51

<b>6.2</b>	<b>Calibração do transporte de sedimentos</b>	<b>52</b>
<b>6.3</b>	<b>Propagação de ondas de águas profundas para águas rasas</b>	<b>54</b>
<b>6.4</b>	<b>Ondas de infragravidade no XB</b>	<b>57</b>
<b>6.5</b>	<b>Cenários médios e extremos de ondas</b>	<b>58</b>
6.5.1	Nordeste (NE)	58
6.5.1.1	Leste (E)	61
6.5.2	Sudeste (SE)	64
6.5.3	Sul (S)	64
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>72</b>
<b>8</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>74</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE A – GRADES TESTADAS NA CALIBRAÇÃO</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE B – PARÂMETROS DO MODELO NO MODO ESTACIONÁRIO</b>	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE C – PARÂMETROS DO MODELO NO MODO NÃO ESTACIONÁRIO</b>	<b>84</b>
	<b>APÊNDICE D – SCATTER PLOT DAS SÉRIES DE ONDAS SIMULADAS NO XB</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE E – SÉRIE TEMPORAL DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM HS1 E HS2</b>	<b>89</b>
	<b>APÊNDICE F – DERIVADORES</b>	<b>91</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>95</b>
	<b>ANEXO A – MEGACORRENTES</b>	<b>96</b>

# 1 Introdução

Praias de enseada, sejam desenvolvidas naturalmente ou criadas artificialmente, são geralmente associadas a um sistema de circulação fechado, com trocas de sedimento no sentido transversal, mas podem também experimentar alguma troca de sedimentos nas proximidades de promontórios ou de estruturas artificiais (AB RAZAK, 2015). A transposição de sedimentos por promontórios (*headland sand bypassing*) entre praias é assunto de crescente interesse em pesquisas e se mostra como um processo importante para compreender o balanço sedimentar em regiões costeiras com presença de praias intercaladas por promontórios.

O processo de transposição foi conceituado e mais aceito mundialmente através do modelo proposto por Short e Masselink (1999). Recentemente o processo foi provado por Ab Razak (2015) através de estudos de modelagem numérica. No Brasil, Vieira da Silva (2016) identificou, explicou e quantificou o processo para a região norte da ilha de Santa Catarina (SC), como também desenvolveu um modelo conceitual de transposição de sedimentos para a área. Nesse estudo, foi registrada também a importância de forçantes (ventos, marés e ondas), confirmando a hipótese de que a ação das ondas é a principal forçante da transposição de sedimentos nos promontórios para a região. Em sua tese, o modelo Delft3D (D3D) foi selecionado por ser capaz de simular longos intervalos de tempo (ano), entretanto a ação das ondas de infragravidade é um processo desconsiderado pelo modelo D3D. Alguns estudos indicam que a ação dessas ondas pode estar relacionada com o transporte de sedimentos em direção ao mar, conseqüentemente, disponibilizando sedimento para a transposição (BAKKER et al., 2016; BERTIN et al., 2018).

Na zona próxima a costa, parte da energia das ondas está em frequências mais baixas que os marulhos (*swell*) e as vagas (*sea waves*). Essa energia é referente aos movimentos de ondas de infragravidade (IG). Ondas IG são ondas longas com período de 20s até aproximadamente 300s, associadas a radiação de estresse de grupos de ondas incidentes (MUNK, 1949; TUCKER, 1950; LONGUET-HIGGINS; STEWART, 1962). São ondas de pequena amplitude no oceano aberto, mas na região próxima à costa elas podem ter maior amplitude e então dominar o movimento da água, principalmente durante tempestades.

O Xbeach (ROELVINK et al., 2009) é um modelo numérico *open-source* baseado em processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos que inclui a além da transformação das ondas curtas (refração, empinamento e quebra) as ondas IG (geração, propagação e dissipação). Este trabalho busca então analisar a influência das ondas de infragravidade

na transposição sedimentar entre as praias Brava e Ingleses em diferentes cenários (médios e extremos) com o Xbeach, contribuindo com estudos realizados por [Vieira da Silva \(2016\)](#) para o entendimento da dinâmica sedimentar do norte da ilha de SC.

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo Geral

Analisar a ação das ondas de infragravidade no processo de transposição sedimentar na ponta das Feiticeiras, entre as praias Brava e Ingleses, ilha de Santa Catarina, SC.

### 2.2 Objetivos Específicos

- 1) Representar o transporte de sedimentos na região das praias Brava e Ingleses com o modelo numérico Xbeach;
- 2) Quantificar o transporte longitudinal de sedimentos entre a praia Brava e Ingleses em cenários de ondas médias e extremas reportados na bibliografia, utilizando dois módulos do Xbeach, o estacionário e não-estacionário.
- 3) Verificar a influência das ondas de infragravidade no transporte sedimentar na ponta das Feiticeiras.

## 3 Referencial Teórico

### 3.1 Ondas

Ondas são distúrbios no estado de equilíbrio de um corpo material que geram oscilações e propagam por distâncias e tempos maiores que os comprimentos de ondas e períodos característicos dos distúrbios, como um sinal que se move a uma taxa distinta ao do movimento do meio (HOLTHUIJSEN, 2007; PEDLOSKY, 2003).

Dois principais parâmetros são utilizados para descrevê-las nos oceanos: altura ( $H$ ) e comprimento de onda ( $L$ ) (Figura 1).  $H$  refere-se a mudança total vertical em altura entre a crista (pico) e a cava da onda.  $L$  é a distância entre dois picos sucessivos (ou duas cavas sucessivas). Demais parâmetros podem ser determinados através de  $H$  e  $L$  (DEAN; DALRYMPLE, 1991), como, esbeltez da onda (*wave steepness*), relação entre a altura da onda e seu comprimento ( $H/L$ ) e amplitude ( $A$ ), metade de  $H$ . O intervalo de tempo entre dois picos sucessivos (ou duas sucessivas cavas) passando por um ponto fixo é conhecido como o período ( $T$ ), geralmente medido em segundos (s). O número de picos que passa por um ponto fixo por segundo é conhecido com a frequência ( $f$ ) (THE OPEN UNIVERSITY, 1999). A elevação da superfície  $\eta$  é caracterizada como a distância vertical entre a superfície da onda e o eixo  $x$  e  $h$  a profundidade de propagação.

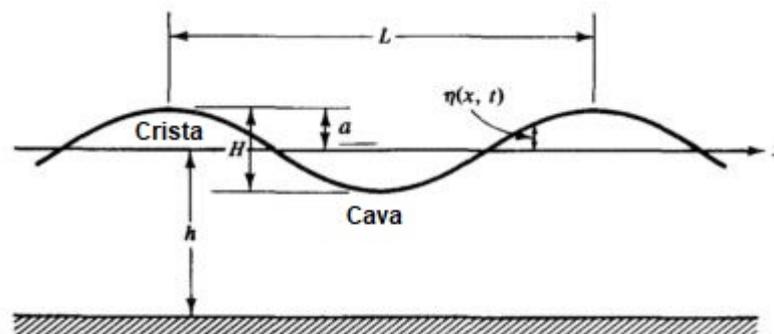


Figura 1 – Características de onda

Fonte: Modificado de Dean e Dalrymple (1991)

Quando descritas em uma série temporal, há estatisticamente parâmetros fundamentais a serem considerados (HOLTHUIJSEN, 2007) e quatro deles serão tratados neste trabalho: altura significativa de onda ( $H_s$ ), altura associada à média do último terço da distribuição acumulativa de frequência das alturas; altura quadrática média ( $H_{rms}$ ), o valor médio quadrático das alturas presentes,  $H_{rms}$  é proporcional a energia

de onda; período de pico ( $T_p$ ), período associado ao maior nível de energia em um gráfico espectral e direção de propagação média ( $\theta_m$ ), direção média de onda em um registro.

A superfície dos oceanos é uma combinação de uma grande variedade de tipos de ondas, sendo geralmente classificadas de acordo com a sua geração e os mecanismos de restauração, que induzem oscilações dentro de uma ampla faixa de períodos e comprimentos de onda associados (TOFFOLI; BITNER-GREGERSEN, 2017). Holthuijsen (2007) esquematizou os diversos tipos de ondas de acordo com as forças atuantes no fluido, suas frequências (períodos) e sua energia arbitrária (Figura 2). Neste trabalho serão abordadas as ondas geradas por ventos, componentes essenciais na morfodinâmica costeira, e ondas de infragravidade, que podem ter um efeito significativo (ROELVINK; RENIERS, 2012).

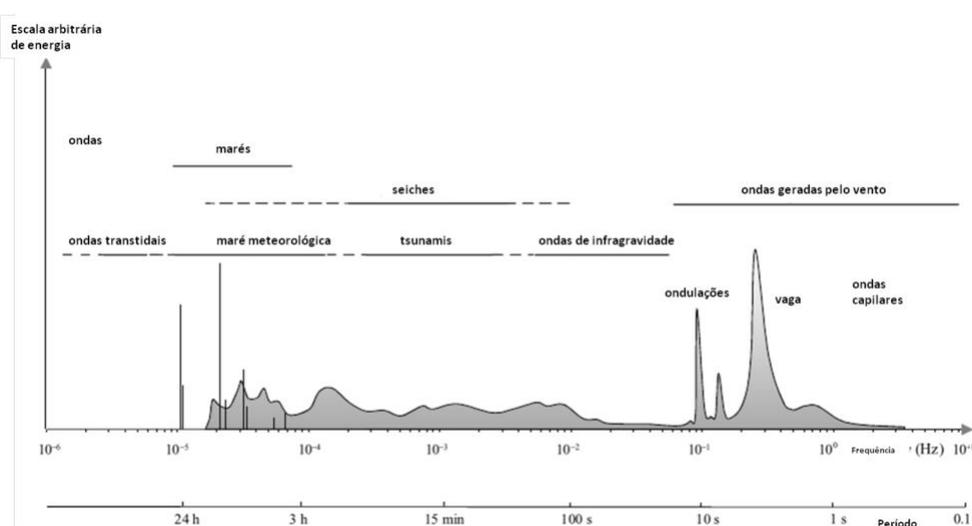


Figura 2 – Classificação de ondas

Fonte: Retirado de Holthuijsen (2007)

### 3.1.1 Ondas de gravidade geradas por ventos

Os ventos são um dos principais fatores de geração de ondas nos oceanos, através da troca de *momentum* entre o vento e a camada de água subjacente (YOUNG, 1999; ROELVINK; RENIERS, 2012). A geração de ondas pelo vento depende da extensão, duração, velocidade em que o vento sopra na pista de vento, uma determinada área (*fetch*) na superfície do oceano. Variações do campo de ventos na superfície do mar, produzem um vasto número de componentes harmônicos, que interagem entre si e viajam pela superfície do oceano com diferentes períodos, direções, amplitudes e fases (HOLTHUIJSEN, 2007). As condições iniciais de ondas na pista de vento são caracterizadas por ondas muito curtas propagando em diversas direções. Conforme o vento persiste e aumenta a sua intensidade, ondas de comprimento e altura maiores

são formadas (KOMAR, 1998). Uma vez formadas, as ondas se afastam do seu local de geração e se dispersam em grupos. São denominadas vagas (*sea*) as ondas irregulares geradas localmente na pista de vento e marulho (*swell*) as ondas regulares geradas em locais distantes de sua ocorrência (HOLTHUIJSEN, 2007).

A velocidade com a qual as ondas se dispersam podem ser deduzidas da relação de dispersão (3.1), definida pela relação da frequência circular ( $\omega=2\pi/T$ ) com o número de onda ( $k=2\pi/L$ ) e a profundidade local ( $h$ ).

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (3.1)$$

Quando a velocidade de fase, ( $C_f=\omega/k$ ), é relacionada com a equação da relação de dispersão (3.2), pode-se inferir que ondas com comprimento maiores ( $k$  pequeno) viajam mais rapidamente e atingem regiões mais distantes de sua origem primeiramente que as ondas menores (HOLTHUIJSEN, 2007; THE OPEN UNIVERSITY, 1999). Este fato explica porque os marulhos são mais regulares quando comparados com as vagas e precedem as ondas de comprimento menores geradas pela mesma tempestade em locais distantes (SATO, 2010).

$$C_f = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \quad (3.2)$$

Ondas com comprimentos e períodos similares propagam no oceano combinam-se em grupos, perdendo suas identidades individuais (Figura 3). Ondas individuais não persistem muito tempo no oceano aberto, apenas enquanto elas passam pelo grupo (THE OPEN UNIVERSITY, 1999). O grupo de ondas avança mais lentamente que as ondas individuais no grupo, tornando mais significativa a velocidade do grupo,  $C_g$ , que a de fase,  $C_f$ . O grupo de ondas se propagam na mesma direção das ondas, e  $C_g$  é a metade de  $C_f$  em águas profundas (DEIGAARD et al., 1992). À medida que as ondas se aproximam da costa há a diminuição da profundidade local, do comprimento de onda e  $C_f$  e torna-se próxima à  $C_g$  (DEIGAARD et al., 1992).

Os processos que atenuam as ondas em águas profundas são o de dispersão; *white-capping*, quebra da ponta da crista da onda porque está sendo forçada pelo vento mais rapidamente que sua velocidade de propagação; viscosidade; resistência do ar e interação não linear entre onda-onda (HOLTHUIJSEN, 2007). Já na zona costeira, a interação das ondas com o fundo e com obstáculos provocam diversos processos, como reflexão, difração, refração e empinamento e causam mudanças significativas nas propriedades das ondas. Tais processos são descritos a seguir com base em Komar (1998) e Holthuijsen (2007).

Reflexão ocorre quando as ondas propagadas encontram um obstáculo e retor-

nam em direção oposta à original. O processo de difração é o desvio ou espalhamento da onda ao contornar ou transpor um obstáculo, sendo a difração mais intensa quanto menor for o comprimento da onda em relação ao tamanho do obstáculo. Refração é a redução da velocidade do avanço das ondas devido a mudança dos contornos batimétricos, ou a interação com correntes, ocasionando alterações na direção das ondas. Ao se aproximarem da costa as cristas das ondas tendem a se alinhar paralelamente com a batimetria, tendendo a formar uma perpendicular com a linha de costa. Por fim, em resposta à redução da velocidade de propagação para manter o fluxo médio de energia, há um incremento na altura de onda e diminuição do comprimento de onda, aumentando a sua esbeltez (relação entre altura e comprimento de onda).

### 3.1.2 Ondas de infragravidade

A existência de grupos de ondas (Figura 3) leva a formação de ondas de segunda ordem com períodos correspondentes aos dos grupos (DEIGAARD et al., 1992). Estas ondas são comumente denominadas ondas de infragravidade (IG), devido a sua frequência estar abaixo das ondas de gravidade (Figura 2). Inicialmente observadas por Munk (1949), ondas IG são ondas superficiais com um período típico de 20 a 300s (frequência entre 0,004-0,4 Hz) e são referidas na literatura também como *surf-beats*, ondas subarmônicas (*subharmonic waves*), ondas de baixa frequência (*low frequency waves*) e ondas longas ligadas (*bound long waves*).

As ondas IG são geradas pelo grupo de ondas incidentes e podem ser classificadas por três tipos: ondas longas ligadas, *bound long waves*, que são forçadas localmente pelos grupos de ondas e viajam na velocidade do grupo de ondas geradas pelo vento; ondas vazantes, *leaky waves*, ondas IG refletidas na linha de costa que radiam para fora da zona de surfe e viajam sentido *offshore* e ondas longas aprisionadas, *edge waves*, que não podem escapar da costa devido a grande refração que sofrem por causa da batimetria local (AB RAZAK, 2015).

Três mecanismos explicam sua geração: a formação de ondas longas ligadas, a variação do ponto de quebra das ondas na zona de surfe e *bore merging*, o salto na frente da quebra das ondas, similar a um salto hidráulico. Estes mecanismos são explicados em Bertin et al. (2018), sendo esta a referência utilizada para explicar os processos a seguir.

Munk (1949) foi o primeiro a relatar ondas IG e concebeu o termo *surf-beat*, sugerindo que este é um fenômeno na frequência da batida das ondas geradas por vento, ou seja, na frequência característica dos grupos de ondas e que as ondas longas são geradas na zona de surfe. Tucker (1950) mediu as ondas IG para fora da zona de surfe e observou correlações entre o envelope de ondas curtas e as ondas IG. Observando a elevação das ondas longas em diferentes tempos, concluindo que ondas

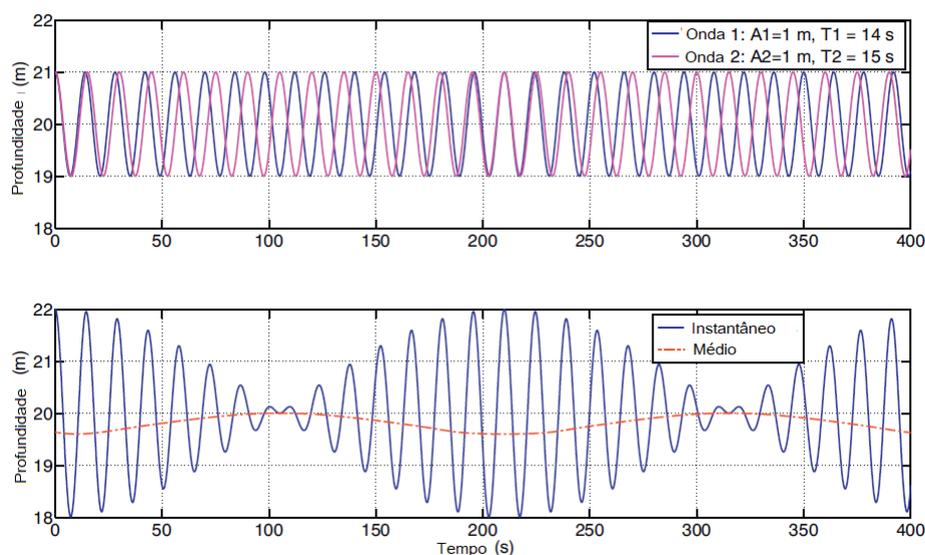


Figura 3 – Grupo de ondas e ondas de infragravidade associadas

Fonte: Modificado de (BERTIN et al., 2018)

IG livres viajam em direção *offshore*, produzida pelos grupos de ondas quebrando na praia. Este foi o primeiro estudo que reportou a reflexão das ondas IG. Longuet-Higgins e Stewart (1962) explicou os processos descritos por Munk (1949) e Tucker (1950) e demonstrou que as ondas IG são forçadas pela variação da radiação de estresse e fluxo de massa nos grupos de ondas, viajando na mesma velocidade dos grupos a que forçam.

Além da criação de ondas ligadas, os grupos de ondas incidentes também causam uma variação do ponto de quebra das ondas na escala de tempo dos grupos. Ondas com maiores alturas tendem a quebrar mais longe da costa do que ondas com menores alturas, variando a posição de quebra das ondas no grupo (Figura 4). A variação temporal do ponto de quebra causa uma variação temporal no gradiente de radiação de estresse na zona inicial de quebra, a qual é balanceada pela variação temporal do nível na zona próxima à costa (*wave set-up*) (Figura 4).

Após quebrarem, ondas curtas se reorganizam no interior da zona de surfe em *bores* (a frente da quebra das ondas, assemelhando-se a um salto hidráulico). Em um campo de ondas aleatório, a diferença de celeridade entre *bores* consecutivos, podem levar a confluência de frentes de ondas. Quando a zona de surfe é larga o suficiente, um *bore* pode sobrepor um *bore* a frente e se combinarem em uma frente de ondas única. Este processo não-linear leva a um aumento no período de onda na zona de surfe e contribui para uma transferência de energia de ondas de baixa frequência para frequências de IG.

Quando as ondas IG aproximam-se de águas rasas, elas transferem parte de

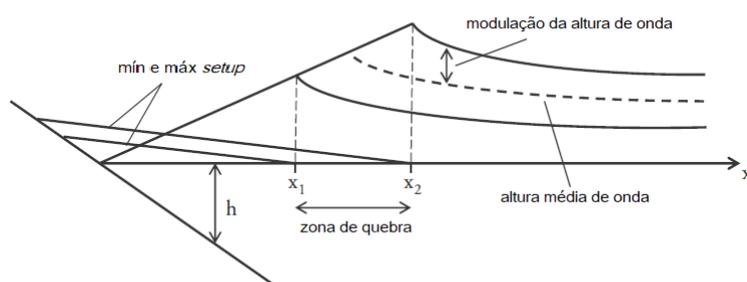


Figura 4 – Representação esquemática da variação transversal de mínima, média e máxima altura de ondas, com o associado *set-up* pela zona de surf.  $x_1$  e  $x_2$  são as posições máximas e mínimas do ponto de quebra e  $h$  é a profundidade.

Fonte: Modificado de Bertin et al. (2018)

sua energia de volta para altas frequências, processo que é extremamente dependente da declividade do fundo. Em praias dissipativas, ondas IG podem dissipar grande parte de sua energia através da quebra delimitada pelo fundo. Quando o fundo é muito rugoso, como em recifes de corais, parte da energia é dissipada pelo atrito com o fundo. A energia de ondas IG que não é dissipada é refletida para o mar, predominantemente nas mais baixas frequências de IG e em fundos mais inclinados. Essa reflexão de ondas IG pode resultar no desenvolvimento de ondas estacionárias. Ondas IG refletidas, podem ser refratadas como também aprisionadas e então ondas de borda (*edge waves*) podem ser formadas.

Ondas IG tem uma gama de implicações na dinâmica costeira. Elas podem modelar as velocidades de correntes em correntes de retorno e influenciar no transporte transversal e longitudinal da praia. Em praias com perfis moderadamente inclinados, ondas IG podem dominar o transporte transversal, geralmente promovendo transporte *offshore* na zona de surfe e também induzir sobrelavagem e promover erosão de dunas e rompimento de cordões arenosos.

Para mais detalhes, além de Bertin et al. (2018) apresentar uma revisão sobre ondas IG, também as relaciona com os processos na zona próxima a costa (*nearshore zone*), variando desde erosão costeira durante as tempestades, forçando correntes de retorno (*rip currents*), geração de ondas seiches em portos e hidrodinâmica de recifes de corais.

## 3.2 Transporte de sedimentos e praias de enseada

Sedimentos são formados pela desintegração física e química de rochas da crosta terrestre. Uma vez que são desintegrados das rochas, eles podem ser trans-

portados pela gravidade, pelos ventos ou pela água. Quando em contato com fluidos em movimento, o fluido exerce forças desestabilizadoras nos grãos de sedimentos em repouso, até que estas excedem as forças estabilizadoras dos grãos e inicia-se a mobilização de sedimentos para transporte.

Taiani (2010) revisa os mecanismos envolvidos no transporte de sedimento, relacionando-os às características do grão e do fluido, bem como as forças resultantes da interação entre estes. Aqui serão descritos brevemente os principais procesos do transporte de sedimento, para mais detalhes, consultar o trabalho de Taiani (2010). A principal força desestabilizadora do sedimento é a chamada tensão de cisalhamento, originada pelo atrito do escoamento do fluido com a camada de sedimento. Quando a tensão de cisalhamento no fundo se torna maior que a força inercial da partícula, inicia-se a movimentação de rolamento em contínuo contato com o fundo. Com o aumento da velocidade do fluido, a tensão de cisalhamento no fundo também aumenta, e os grãos começam a se mover em saltos, processo chamado saltação.

A medida que a tensão de cisalhamento excede a força de decantação, os grãos de sedimento podem ser carregados para um nível no qual as forças turbulentas no leito são comparadas ou superiores que o peso submerso das partículas, e então elas podem ficar suspensas, levando ao transporte por suspensão. Usualmente o transporte de sedimentos por rolamento e saltação é chamado de transporte de carregamento de fundo, *bed-load transport*, enquanto por suspensão são chamadas de transporte de carregamento suspenso, *suspended load transport* (RIJN et al., 1993). Ambos processos podem ocorrer simultaneamente e a zona de transição entre ambos os modos não é bem definido.

Praias são formadas pelo acúmulo e transporte de sedimentos (SHORT; MASSELINK, 1999). São ambientes altamente dinâmicos, com complexa interação entre forças aero e hidrodinâmicas, transporte de sedimento e mudanças na morfologia local (LESSER, 2009), interações conhecidas como processos morfodinâmicos. Estes processos dirigem a evolução morfológica costeira, que ocorre usualmente em escalas de tempo de magnitudes maiores que a escala de tempo das flutuações hidrodinâmicas que dirigem o transporte de sedimentos.

Short e Masselink (1999) delimitam as praias em três regiões distintas (Figura 5), sendo estas regiões a zona subárea (*Subaerial Beach*), zona de surfe ou de arrebentação (*Surf Zone/Wave Breaking Zone*) e zona próxima a costa ou zona de empinamento de onda (*Nearshore zone/Wave Shoaling Zone*). Não há consenso nacional e mundial sobre a delimitação de praias, o proposto por Short e Masselink (1999) será adotado neste trabalho.

A relação dos fatores morfológicos e hidrodinâmicos podem ser utilizados para classificar as praias. Wright e Short (1984) utiliza o parâmetro adimensional  $\Omega$  (3.3),

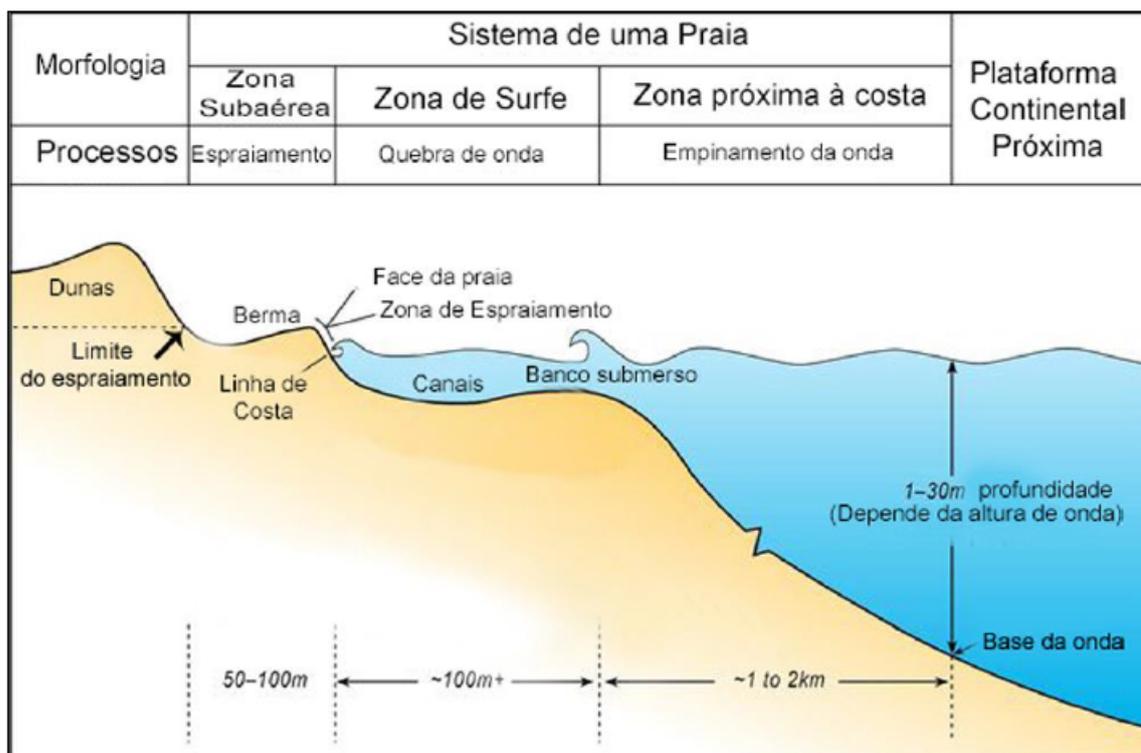


Figura 5 – Ilustração de um corte transversal de um sistema de praia (*beach system*) bidimensional com os processos das ondas (*wave process*) e o tipo de morfologia (*morphology*). Contém uma zona subaérea (*subaerial beach*) ou zona de espraiamento (*swash*) que fica acima da margem da praia (*shoreline*); Uma zona de surfe (*surf zone*) contendo bancos submersos (*bar*), canais (*channel*) e quebra de ondas (*wave breaking*); e uma zona próxima à praia (*neashore zone*) onde ocorre o empinamento da onda (*wave shoaling*). Esta zona se estende em direção ao mar até a base da onda (*wave base*)

Extraído de: Pacheco (2015). Modificado de: Short e Masselink (1999)

onde  $H_s$  é altura significativa de ondas,  $W_s$  a velocidade média de decantação dos sedimento da face da praia e  $T_m$  o período médio das ondas, e classifica praias em três estágios: refletivas ( $\Omega < 1$ ), intermediárias ( $2 < \Omega < 5$ ), e dissipativas ( $\Omega > 6$ ).

Praias refletivas são geralmente mais íngremes e sem presença de bancos submersos. Ocorre a ausência de uma zona de surfe e a quebra de ondas ocorre na zona do espraiamento. Praias intermediárias são praias que se encontram entre o estado dissipativo e refletivo e apresentam um ou dois bancos submersos e correntes de retorno. Praias dissipativas apresentam alta energia de ondas, uma grande zona de surfe com formação de múltiplos bancos submersos. A contribuição relativa de ondas incidentes, subharmônicas, ondas de infragravidade e ondas de borda, o balanço da circulação da zona de surfe até as correntes próximas ao fundo e o transporte resultante

de areia varia de acordo com cada estado de praia.

$$\Omega = \frac{H_s}{W_s T_m} \quad (3.3)$$

Recentemente, baseado em medições em praias dissipativas ( $\beta \approx 1:80$ ) e intermediárias ( $\beta \approx 1:35$ ), Bakker et al. (2016) propõe que o transporte de sedimento em praias arenosas esta ligado à razão entre a altura da onda IG e a altura da onda curta (HIG/HSW). Esta relação pode ser um bom parâmetro para estimar o tipo de mobilização de sedimento e pode também explicar a direção e magnitude de transporte resultante pelas ondas IG.

Em praias íngremes, refletivas, ondas IG são relativamente pequenas e ondas curtas dominam a hidrodinâmica. A relação HIG/HSW é geralmente menor que 0,4 e a areia é suspensa na escala de tempo de IG por ondas curtas. Neste caso, a correlação entre o grupo de ondas curtas e velocidade orbital de ondas IG determinam se o transporte de sedimentos por ondas IG é em direção a praia ou ao mar. No geral, ondas IG contribuem para menos de 20% no total de transporte transversal nestes locais. Ao contrário, em praias levemente inclinadas, dissipativas, ondas IG podem dominar a hidrodinâmica. A razão HIG/HSW, excede 0,4 e a areia é suspensa em velocidade de ondas IG direcionadas a praia. Isso resulta em um transporte em direção ao mar, com ondas IG contribuindo para mais de 60% do transporte total transversal (BERTIN et al., 2018).

Quando uma praia é delimitada por promontórios, estes podem ter um grande impacto na planta da praia, no transporte de sedimentos e na morfodinâmica. Um padrão de refração e difração de ondas é associado a presença do promontório, e a enseada apresenta uma zona de sombra com pouca energia de ondas, a planta se torna mais curvada no centro e tem uma forma mais retilínea na área que permanece exposta às ondas. Quando os promontórios são amplamente espaçados e/ou a praia recebe ondas pequenas, os promontórios impactam a circulação da zona de surfe apenas nos seus arredores.

Caso a distância entre os dois promontórios que formam a enseada é pequena ou ocorre um aumento da energia de ondas, uma megacorrente (*megarip*) pode ser formada no centro da praia e estender para fora da costa em uma extensão na ordem de 3 a 4 vezes o tamanho da zona de surfe. O grau de impacto do promontório pode ser previsto através do parâmetro de escala do embaçamento  $\delta'$  (3.4). Este parâmetro relaciona o comprimento da linha de costa do embaçamento ( $S_l$ ), a extensão do embaçamento ( $C_l$ ) e a altura de quebra da onda ( $H_b$ ). Para  $\delta'$  maior que 19, a praia apresenta um padrão de circulação normal, entre 8 e 19, o padrão de circulação é

transicional e valores menores que 8, a circulação é celular (SHORT, 1999).

$$\delta' = \frac{S_t^2}{100C_l H_b} \quad (3.4)$$

Um padrão de circulação normal ocorre quando a praia é larga o suficiente para não ser afetada pelo promontório. O padrão de circulação transicional ocorre quando o tamanho do embaçamento começa a influenciar a circulação na zona de surfe, inicialmente causando as correntes longitudinais se voltarem em direção ao mar na extremidade do promontório, enquanto ainda mantem alguma circulação normal longe dos promontórios. Uma circulação celular ocorre quando o promontório controla a circulação de todo o embaçamento, com megacorrentes ocorrendo em uma ou duas extremidades do embaçamento e também distantes do promontório (SHORT, 1999).

### 3.3 Transposição de sedimentos entre promontórios

Em praias de enseada, delimitadas por promontórios ou por estruturas artificiais, ocorre um movimento lateral de areia entre as suas extremidades, as quais se manifestam pela aparente "rotação" da planta praial. Na maioria dos casos, a rotação praial é atribuída a uma mudança sazonal ou periódica do clima de ondas que leva a mudanças na direção das ondas, a qual induz variações na linha de costa, principalmente em praias de enseada longas. Esta rotação pode levar a um mecanismo que libera pulsos de areia em volta de promontórios, processo conhecido como *headland sand bypassing* (SHORT, 1999). A presença de um grande promontório entre duas praias, age como uma barreira no transporte longitudinal na zona de surfe, minimizando-o. Como consequência, o transporte longitudinal requer uma troca de sedimento transversal e um transporte longitudinal para fora da zona de surfe para transpor o promontório (ABRAZAK, 2015).

Short e Masselink (1999) explica a transposição de sedimentos entre promontórios, como o ilustrado na Figura 6. Inicialmente, o transporte longitudinal causado pela rotação praial resulta em um acúmulo de areia na porção a barlar do promontório (A). Uma duna de areia subaquosa se manifesta na ponta do promontório e imediatamente se move a sotamar (B). O banco formado pela onda de areia se move em direção a costa e pode resultar em uma acresção na praia, entretanto, maior parte da areia permanece submersa. As ondas de areia migram em direção a sotamar, e suas formas podem variar de pequenas ondas de areia a grandes pontais. A onda de areia pode migrar e se mover como um banco ao mar (C). Quando a onda de areia ou o banco se une a praia, inicia uma corrente controlada pela topografia e que migra em avanço da onda, geralmente causando severa erosão costeira localizada (D). Então a areia se une a praia, causando acresção (E).

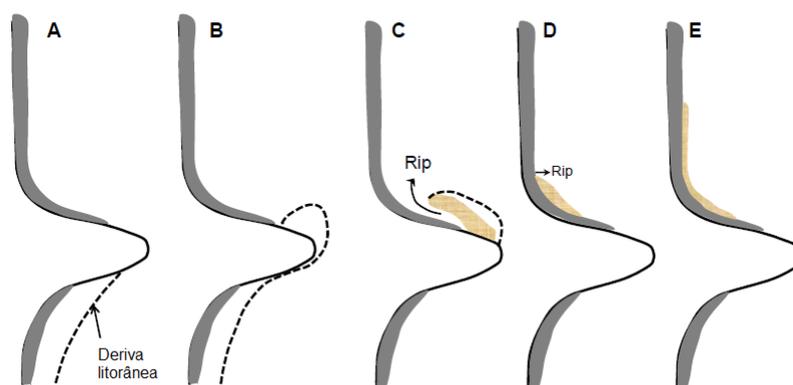


Figura 6 – Esquema de transposição de sedimentos entre promontórios (SHORT; MASSELINK, 1999).

Fonte: Adaptado de Ab Razak (2015)

Apesar de relacionada com o mecanismo de rotação praial, praias que não apresentam esta dinâmica podem também sofrer *bypassing*. Se a extremidade do promontório encontrar-se em profundidades menores que a profundidade de fechamento, pode ocorrer transposição. O transporte nestes casos pode transpor o promontório através de dunas migratórias ou pela face da praia, durante marés altas. Até agora, processos de transporte de sedimentos em praias de enseada delimitadas por promontórios ainda está em investigação e mais estudos são necessários para a compreensão do fenômeno (AB RAZAK, 2015).

### 3.4 O modelo Delft3D Wave

O Delft3D é um software *open-source* com abordagem multidisciplinar para áreas costeiras, rios e estuários. Ele é composto por diferentes módulos, sendo neste trabalho utilizado o Delft3D-FLOW e Delft3D-WAVE.

Delft3D-FLOW é um modelo multidimensional (2D ou 3D) hidrodinâmico que resolve um sistema de equações de águas rasas. As equações consistem em equações horizontais de movimento (conservação de momento), na equação de continuidade, equações de transporte para constituintes conservativos e um modelo de fechamento turbulento. Acelerações verticais são assumidas como sendo pequenas em relação à aceleração da gravidade, e a equação vertical de momento é reduzida à relação de pressão hidrostática, sendo então adequado para regiões rasas, áreas costeiras, estuários, rios, lagos e lagoas. Este modelo é considerado o estado da arte em modelagem hidrodinâmica e é validado mundialmente (DELFT3D-FLOW..., 2019).

O modelo Delft3d-WAVE foi desenvolvido para representar a evolução de ondas geradas por ventos em águas costeiras. Integrado ao modelo Delft3d-WAVE, o SWAN

é um modelo de ondas de terceira geração (BOOIJ; RIS; HOLTHUIJSEN, 1999) que computa propagação de ondas, geração de ondas por ventos, interações não lineares onda-onda e dissipação, dado uma topografia de fundo, campo de ventos, nível de água e campo de correntes em águas profundas, intermediárias e rasas. Baseado na conservação da ação de onda, o SWAN é um modelo espectral e resolve ondas em todas as direções e diversas frequências. Processos de refração provocados por correntes ou por mudanças na profundidade, representação dos processos de geração de ondas pelo vento, dissipação por *whitecapping*, fricção com o fundo e quebra induzida pela profundidade, assim como interações não lineares onda-onda (*frequency shift*, *quadruplets* e *triads*) são resolvidas pelo modelo (DELFT3D-WAVE... , 2014).

### 3.5 O Modelo Xbeach

Xbeach (ROELVINK et al., 2009) é um modelo numérico *open-source* que foi desenvolvido para simular processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos e impactos em costas arenosas com resolução espacial da ordem de quilômetros e escala de tempo de tempestades, em modos 1D e 2DH.

O modelo inclui os processos hidrodinâmicos de transformação de ondas curtas, refração, empinamento e quebra; transformação de ondas longas (ondas IG); *setup* induzido por ondas; interação onda-corrente e correntes não-estacionárias; como também sobrelavagem (*overwash*) e inundação. De forma geral, o Xbeach inclui três modelos separados de ondas: modelo de balanço de ação de ondas e modelo de dissipação em opções de modos estacionário, *stat*, e não-estacionário, *instat*, e modelo *roller* no modo *instat*.

No modo *stat*, o modelo resolve eficientemente equações de onda, mas negligenciando ondas IG. No modo *instat* (ou *surfbeat*, como é referido nos parâmetros do modelo), o XBeach resolve as variações do nível d'água na escala de ondas IG usando as equações não-lineares de águas rasas, *nonlinear shallow water (NLSW) equations*. É empregado também um modelo de dissipação de grupo de ondas e um modelo *roller*, para representar *momentum* armazenado na superfície após a quebra das ondas. As variações do gradiente de radiação de estresse exercem forças na coluna d'água e dirigem ondas de períodos longos e correntes não-estacionárias, que são resolvidas pelas equações *NLSW*. O modo *instat* é usado quando o foco maior é nos processos na zona do espraiamento do que em correntes medias no tempo. O modo não-estacionário é totalmente válido em praias dissipativas, onde ondas curtas são em sua maioria dissipadas quando se aproximam da linha de costa. Em praias intermediárias, durante eventos extremos, movimentos de espraiamento são predominantes na banda da IG e também o *runup* (NEDERHOFF, 2018).

Os processos morfodinâmicos do Xbeach incluem transporte de carregamento de fundo e em suspensão, colapso de dunas frontais, atualização da batimetria e rompimento de cordões arenosos (*breaching*). O modelo tem sido validado com uma série de testes analíticos, laboratoriais e testes de campo usando uma configuração de parâmetros padrão. O Xbeach também foi validado mundialmente em regiões costeiras, principalmente em praias, portos e estuários (BOLLE et al., 2011; VAN DONGEREN et al., 2012).

Neste trabalho foi utilizado a versão 1.23.5527, com o codinome XBeach X, a qual teve diversos aprimoramentos, como a melhoria na paralelização com MPI (*Message Passing Interface*) e melhor efeito de refração nos modos *stat* e *surfbeat*. Para mais informações do modelo, consultar Nederhoff (2018)

## 4 Área de Estudo

As praias Brava e Ingleses são situadas na porção norte da Ilha de Santa Catarina (ISC), na costa central do estado de Santa Catarina (Figura 7). A costa do estado de Santa Catarina encontra-se submetida a condições oceanográficas e meteorológicas transicionais e de forte dinâmica. A passagem de frentes frias e a atuação de ciclones extratropicais acontecem regularmente na região das praias em estudo e tais sistemas influenciam a ocorrência de marés meteorológicas positivas e ondas de tempestade (SERAFIM; BONETTI, 2017). Essas ondas, especialmente se associadas à marés astronômicas de sizígia, tem maior potencial de alcance na linha de costa. Com o aumento da lâmina d'água disponível, a interação com o fundo e a perda de energia são retardadas, movendo a zona de surfe e espraiamento temporariamente em direção à costa, permitindo que a excursão das ondas tenham maior avanço em direção à linha de costa que o usual.

O clima da região é subtropical (Cfa), mesotérmico úmido, sem estações de seca e com verões quentes (EPAGRI, 2002). As temperaturas médias variam entre 15°C e 18°C no inverno e no verão entre 24°C e 26°C. Os ventos de quadrante Sul frios e úmidos, associados à Frente Polar Atlântica e ciclones extratropicais no inverno, apresentam as maiores velocidades médias, chegando até 80km/h. Ventos de Nordeste são mais frequentes na região e menos intensos, com média de 12km/h. Os ventos de Nordeste são predominantemente originados da Massa Tropical Atlântica, do anticiclônico semi-estacionário Tropical Atlântico, principalmente no verão (MONTEIRO, 1992).

Em termos gerais, as ondas mais frequentes na área de estudo provém do quadrante Sul com período de 12s, seguidas pelas vagas de Leste com período de 8s. A maior energia de onda provém de Sul e Sudeste, com maiores períodos (acima de 11s) e ondas que ultrapassam 4m de altura em águas profundas. Em termos sazonais, durante os meses de outono e inverno, as ondulações de Sul prevalecem sobre as vagas de Leste. No verão há um equilíbrio entre ambas, já durante a primavera as vagas de Leste são predominantes (ARAÚJO et al., 2003).

As marés na região de estudo são do tipo micromarés. A relação entre as componentes de maré diurnas K1 e O1 e as componentes de maré semi-diurnas M2 e S2, determinam o tipo de maré e para região apresenta o valor de 0,44, indicando uma maré mista com predominância semi-diurna, com duas baixa-mares e duas preamares. As variações entre a média das baixa-mares e a média das preamares de sizígia na região é de 0,85m (FEMAR, 2000).

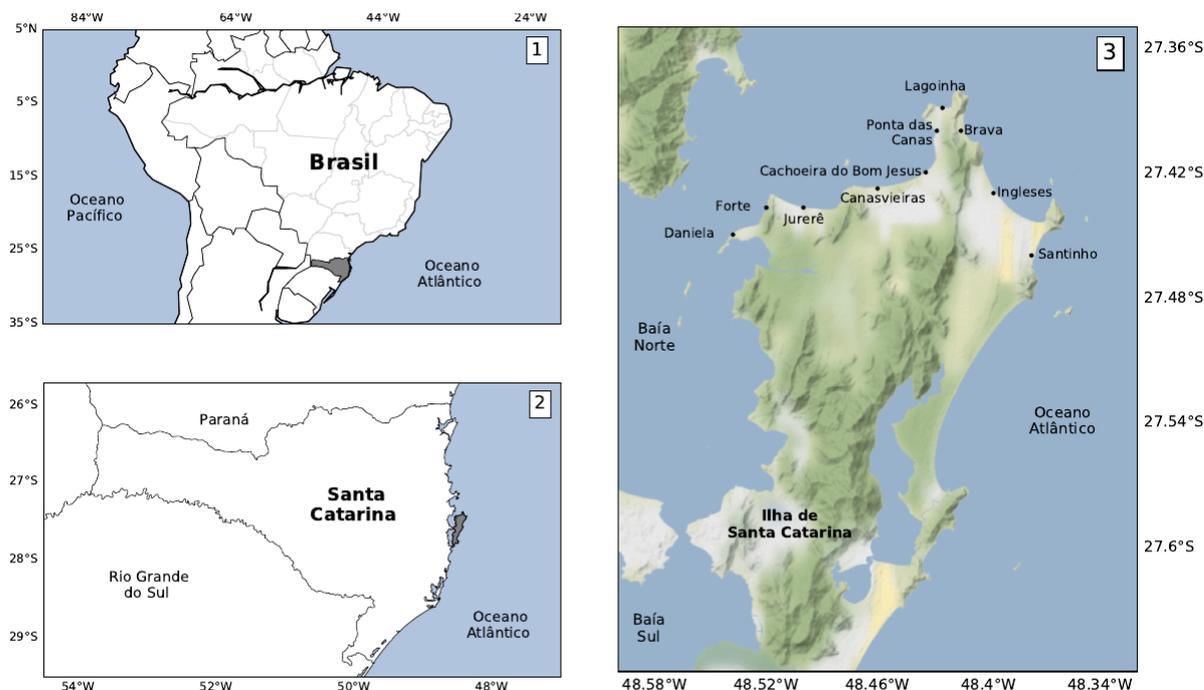


Figura 7 – Área de estudo: (1) localização do estado de Santa Catarina na América do Sul, (2) localização da ilha de Santa Catarina no estado de Santa Catarina, (3) localização da área de estudo.

## 4.1 Norte da ilha de Santa Catarina

Localizada entre a ponta da Daniela e a ponta dos Ingleses, adjacente ao canal Norte da ISC e ao oceano Atlântico, a costa Norte possui 33km de extensão, distribuídos em vinte e uma praias arenosas, o que corresponde em 17,94% das praias da ISC (HORN FILHO; LEAL; OLIVEIRA, 2017). São agrupadas por sistemas praias e praias isoladas separadas por promontórios. A granulometria da região é bastante homogênea. Todas as praias são compostas de areias finas, bem selecionadas ou muito bem selecionadas, com diâmetro médio em torno de 0,21mm (HORN FILHO, 2006). As praias da região variam entre praias refletivas abrigadas no Norte a praias intermediárias de bancos e correntes transversais (TBR) a bancos e praias rítmicas (RBB) (KLEIN; SHORT; BONETTI, 2016).

## 4.2 Brava

A praia Brava localiza-se entre a ponta das Feiticeiras e da ponta do Rapa no norte da ISC. Ela é voltada para Leste e apresenta um comprimento 1,9km. A distância entre a extremidade da ponta do Rapa e das Feiticeiras ( $C_i$ ) é aproximadamente 2,4km e do comprimento da linha de costa embaixamento ( $S_i$ ) é 3km. de A largura média da praia é 45m, sendo a maior do norte da ISC e possui uma declividade média de 4° (HORN FILHO; LEAL; OLIVEIRA, 2017). A granulometria da praia Brava é composta

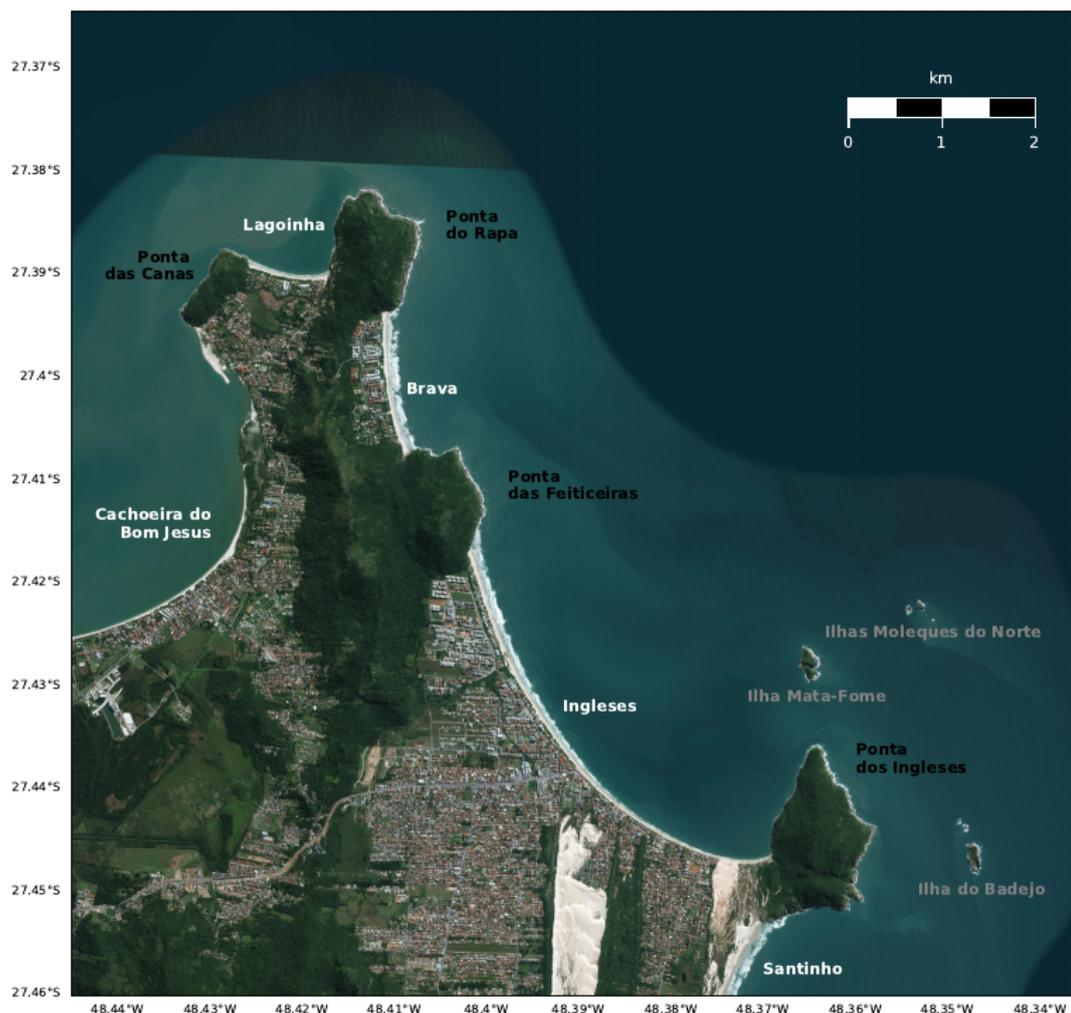


Figura 8 – Localização das praias (em branco), promontórios (em preto) e ilhas (em cinza) da região da área de estudo. Fonte: ESRI World Imagery. EPSG:5880. DATUM: SIRGAS2000. PROJEÇÃO: Policônica.

predominantemente por areias finas (HORN FILHO, 2006), 0,30mm próximo ao sul da Brava (VIEIRA DA SILVA et al., 2016a).

Devido aos perfis praias homogêneos em toda sua extensão, a praia é classificada como intermediária com presença de correntes de retorno. Apresentou boa capacidade de recuperação sedimentar após a passagem de um ciclone extra-tropical, indicando grande transporte de sedimento na mesma (SCHWEITZER et al., 2006). Klein, Short e Bonetti (2016) classifica a praia Brava como praia intermediária de banco e corrente transversal (TBR). A profundidade de fechamento nesta praia é de 5,21m (KLEIN et al., 2016).

### 4.3 Ingleses

A praia dos Ingleses é a praia mais ao Sul da costa Norte da ISC. Com um comprimento de 5km, é uma praia semiexposta com face voltada para nordeste. Ingleses apresenta correntes longitudinais bidirecionais, influenciadas pelos ventos incidentes dos quadrantes Norte e de Sul, bem como correntes de retorno, que podem aparecer ao longo da praia. A distância entre a extremidade da ponta dos Ingleses e das Feiticeiras ( $C_l$ ) é aproximadamente 4,4km e do comprimento da linha de costa embaixamento ( $S_l$ ) é 6,85km. Possui largura média de 20m e declividade de 5° (HORN FILHO; LEAL; OLIVEIRA, 2017). Predomina-se areias finas a muito finas (HORN FILHO; LEAL; OLIVEIRA, 2017; FARACO, 2003) e a granulometria é de 0,20mm na porção sul da praia (VIEIRA DA SILVA et al., 2016a).

Klein, Short e Bonetti (2016) classifica a praia entre praia intermediária de terraço de baixa mar (LTT) e refletiva. Ingleses apresenta perfis suaves e pouca declividade, sendo as maiores larguras de praia no setor Norte e menores no setor Sul. Períodos de acreção e erosão na praia foram relacionados por Faraco (2003) com a altura e direção de ondas. Sob influência de ondas de sudeste com alturas baixas, os perfis praias tendem a ser acrescivos e sob a influência de ondas de Leste, de maior altura, tendem a ser erosivos. A profundidade de fechamento nos setores semiprotetido é de 5,39m e no semiexposto 5,13m (KLEIN et al., 2016). Próximo à praia dos Ingleses, dois campos de dunas estão presentes: do Santinho e do Moçambique. Ambos migram no sentido Norte por influência dos ventos do quadrante Sul e é estimado um valor de *overpassing* de 10000 m<sup>3</sup> por ano na região (BOEYINGA et al., 2010).

### 4.4 Ponta das Feiticeiras

A Ponta das Feiticeiras é o promontório entre as praias Brava e Ingleses (Figura 8). O perfil na frente do promontório é o mais íngreme da região norte da ilha de SC, apresentando uma proporção de 1:30m, os primeiros 70m do promontório está em profundidades menores que 5m. Vieira da Silva et al. (2016b), quantificou o transporte de sedimento na região e verificou que o promontório é alimentado pelo caminho de sedimento da plataforma interna que começa na ponta dos Ingleses. Também observou duas células circulares, uma ao final do Norte dos Ingleses e outra ao Sul da Brava. O balanço de transporte de sedimento observada neste promontório é de 3000m<sup>3</sup> por ano em direção a praia Brava, o que indica um caminho de transporte de sedimento preferencial no sentido anti-horário na costa norte da ISC.

## 5 Metodologia

A metodologia aplicada seguiu os momentos descritos no fluxograma da [Figura 9](#). Ela pode ser separada em três momentos distintos: (1a) modelagem de uma série temporal de ondas de águas profundas para rasas e (1b) propagação de cenários de ondas médias e extremas para a costa com o modelo D3D ; (2a) Utilização da série temporal (1a) como fronteira no XB para calibração (de ondas e transporte de sedimentos) do modelo tanto em modo estacionário como não estacionário; (2b) Utilização dos cenários representativos selecionados (etapa 1b) como fronteira para propagação no XB para a modelagem costeira de processos de onda e transporte de sedimentos e morfologia em ambos modos; (3) Análise de resultados obtidos na fase anterior (2b) para comparação entre modos do XB.

Os dados de entrada utilizados neste trabalho foram todos obtidos do trabalho de [Vieira da Silva \(2016\)](#), como também foi cedido o seu modelo de para a propagação de ondas com o D3D. Como este trabalho visa fazer análise apenas de ondas no transporte de sedimento, foi desativado vento e a maré do modelo de [Vieira da Silva \(2016\)](#) para a propagação de ondas. Para a modelagem com o XB, foi criada adicionalmente uma grade local em maior resolução para as praias Brava e Ingleses na qual foi possível interpolar a batimetria da região em maior detalhamento. Esta foi aninhada às grades produzidas em [Vieira da Silva \(2016\)](#) para a propagação de ondas e para a modelagem com o XB.

Tendo as grades numéricas prontas, o passo seguinte foi calibrar o modelo de ondas e de sedimento do XB. Para isso, dados de ondas foram simulados com o D3D dos meses de janeiro e agosto de 2019 (1a) foram extraídos para a fronteira do XB (2a), o qual foi simulado nos modos estacionário e não-estacionário e comparados com dados medidos *in situ* de um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP). O transporte de sedimento simulado em ambos os modos também foi comparado com os valores obtidos de uma armadilha de sedimento de transporte por carregamento de fundo. Após a calibração do modelo de ondas e de transporte de sedimento, os cenários com eventos de ondas extremas e médias propostos por [Vieira da Silva et al. \(2018\)](#) foram propagados para costa com o modelo D3D (1b) e extraídos parâmetros de ondas para a fronteira do XB (2b). Foi calculado o transporte longitudinal em todos cenários extrapolado para um ano da praia Brava até Ingleses (3).

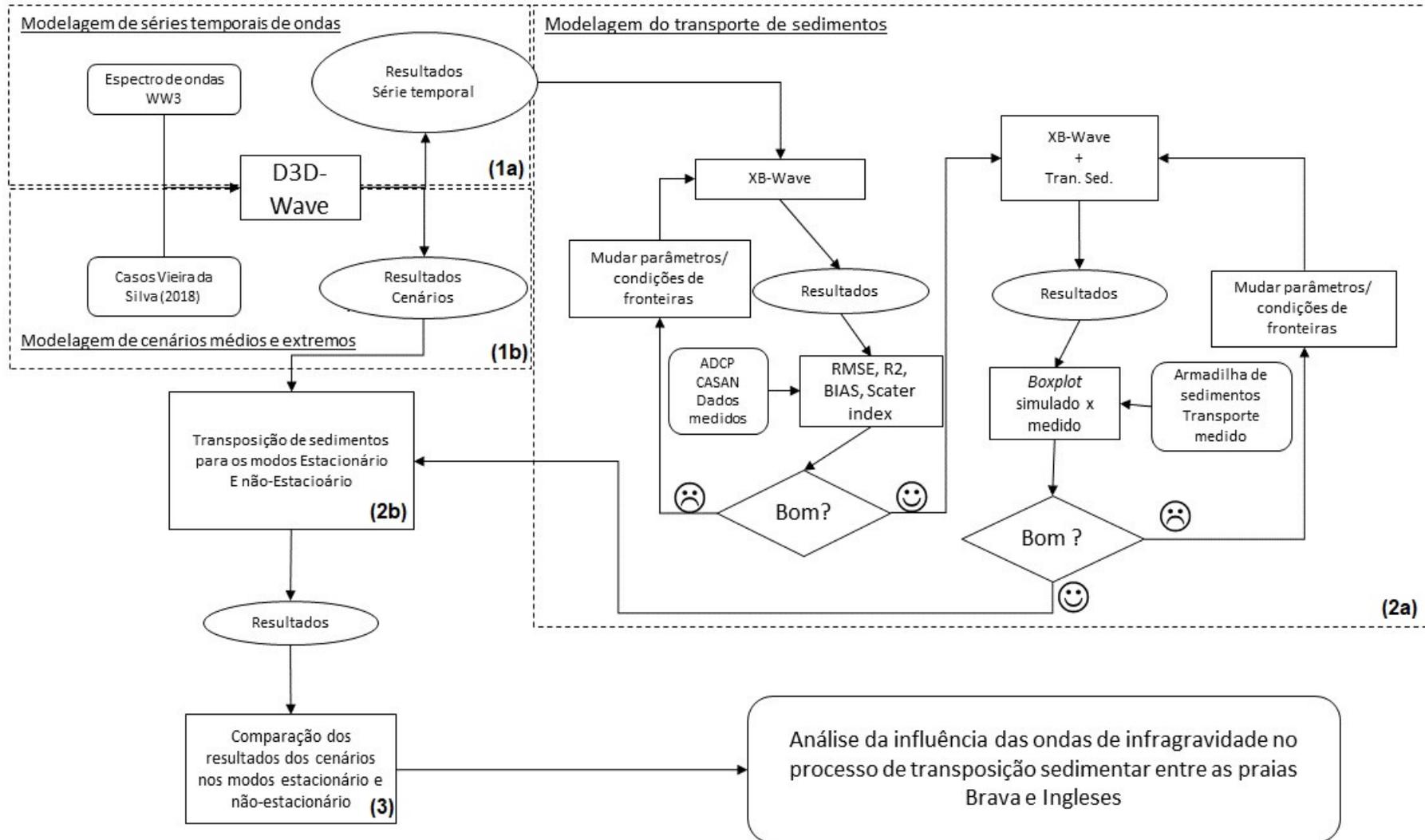


Figura 9 – Fluxograma geral da metodologia do trabalho.

## 5.1 Tratamento inicial de dados

Nesta seção encontra-se uma breve descrição de como os dados foram tratados na tese de [Vieira da Silva \(2016\)](#) e as adaptações feitas para esta monografia. São eles: dados batimétricos, para posterior interpolação nas grades de domínio de cálculo; séries temporais de ondas e granulometria das praias para entrada no modelo e dados medidos em campo para posterior calibração.

### 5.1.1 Dados batimétricos e de granulometria do sedimento

Os dados batimétricos utilizados no trabalho são provenientes da base de dados SMC-Brasil (Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria - IH Cantabria) baseado nas cartas náuticas da DHN/CHM da Marinha do Brasil e de levantamentos batimétricos efetuados pelo Laboratório de Oceanografia Costeira (LOC) da UFSC no projeto para o MMA (Ministério do Meio Ambiente) entre os anos de 2013 e 2014 ([KLEIN et al., 2016](#)). Dados granulométricos das praias Brava e Ingleses foram retirados de estudos realizados [Vieira da Silva et al. \(2016b\)](#). Esses dados apontam a presença de granulometria média de 0,22mm (areia fina) para os dois sistemas praias.

### 5.1.2 Dados de onda

Para a modelagem da série temporal de ondas de águas profundas para águas rasas, uma série temporal de espectro de ondas foi obtida do modelo global *Wave Watch III* (WW3) por [Vieira da Silva et al. \(2016b\)](#), extraído no ponto de grade com coordenadas 27°30' S e 47°15' W ou em UTM 277728,00m E; 6956167,00m S zona 23J, a 200m de profundidade, no período compreendido entre janeiro de 2014 a janeiro de 2015 ([Figura 12](#)).

Para definição dos casos a serem propagados, [Vieira da Silva et al. \(2018\)](#) analisou dados de ondas de 36 anos do WW3, distribui em octantes (N, NE, E, SE, S, SO, O e NO) e calculou a frequência para cada direção. Um cenário extremo e médio foi definido para cada direção, correspondendo respectivamente ao ao 50-ésimo percentil e 95-ésimo percentil da distribuição de  $H_s$ . O  $T_p$  associado a cada  $H_s$  foi determinado segundo [Kamphuis \(2010\)](#). Ondas de SO, O, NO e N ocorrem em 3% dos casos e tendem a propagar em direção ao mar ou chegarem atenuadas para a área de estudo. Esta análise feita por [Vieira da Silva et al. \(2018\)](#) resultou nos parâmetros indicados na [Tabela 1](#). A distribuição de frequência dos eventos podem ser verificadas na [Figura 10](#).

Tabela 1 – Parâmetros dos casos de ondas

Caso	Cenário	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)
1	NE médio	1,6	6,8
2	NE extremo	2,7	7,7
3	E médio	1,6	7,8
4	E extremo	2,7	8,5
5	SE médio	1,7	9,3
6	SE extremo	3,1	9,9
7	S médio	2,0	10,6
8	S extremo	3,7	11,1

Extraído de [Vieira da Silva et al. \(2018\)](#)

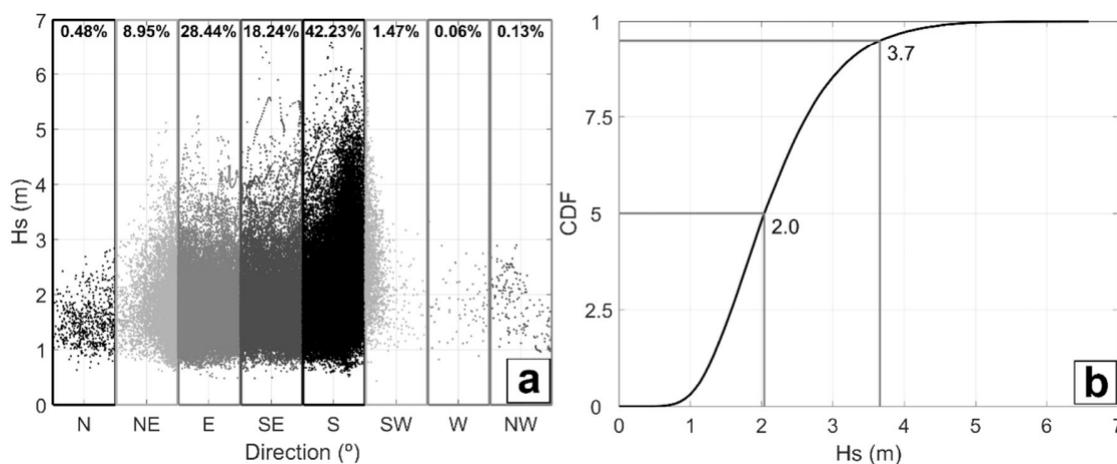


Figura 10 – Seleção dos cenários de ondas. a) Porcentagem de ocorrência por direção. b) Função de distribuição acumulativa de altura de ondas em cenários médios e extremos. Extraído de: [Vieira da Silva et al. \(2018\)](#)

### 5.1.3 Dados de ADCP

Os dados do ADCP concedidos para a realização desse trabalho foram adquiridos entre período de outubro de 2013 a setembro de 2014 pela CASAN, nas proximidades da ilha Mata-Fome, coordenadas  $27^{\circ} 24' 24,36''S$  e  $48^{\circ} 23' 41,14''O$  ou em UTM 6964120,71m S, 760394,70m E, zona 22J sul ([Figura 11](#)), na profundidade de 19,7m. Em suas medições constam dados de nível, correntes, ondas (altura significativa, período de pico, direção média).

### 5.1.4 Dados transporte sedimento

No dia 19 de agosto de 2014, dados de duas armadilhas de sedimentos foram adquiridos para quantificar o transporte de sedimento por carregamento de fundo nas proximidades da ponta das Feiticeiras ([VIEIRA DA SILVA et al., 2016b](#)).



Figura 11 – Localização do ADCP em ciano. Período de fundação: outubro de 2013 a setembro de 2014. Dados concedidos pela CASAN. Localização das armadilhas de sedimento em amarelo. Fonte: ESRI World Imagery. EPSG:5880. DATUM: SIRGAS2000. PROJEÇÃO: Policônica.

Os dados de transporte de sedimentos foram coletados durante um vento calmo de direção N, variando entre 2 a 4m/s, na maré baixa de quadratura, com altura significativa de ondas de 0,95m, período de pico de 7.8s e direção de ESE.

A primeira armadilha de sedimento está mais próxima a praia Brava, H1, em coordenadas  $27^{\circ}24'10.44''S$  e  $48^{\circ}24'21.60''O$  ou em UTM 6966265,14m S, 756491,49m E, zona 22J sul (Figura 11). A mais próxima praia dos Ingleses, H2, localiza-se em coordenadas  $27^{\circ}24'45.72''S$  e  $48^{\circ}24'4.68''O$ , ou em UTM 6965169,29m S, 756933,72m E, zona 22J sul.

## 5.2 Confecção das grades de cálculo e interpolação da batimetria

Para a simulação de ondas, foram utilizadas três grades: regional, intermediária e local (Figura 12). A grade regional é curvilínea e cobre uma área de 410km por 240km, variando em uma resolução de 10km x 6km em águas profundas e 1,7km x 1,7km em águas rasas, com 46 por 100 elementos. A grade intermediária cobre uma

área de 50km x 90km e também varia sua resolução de 1,5km x 1,2km em regiões mais distantes da costa para 30m x 30m em áreas mais próxima à costa. É uma grade retangular, com 337 por 234 elementos. Ambas foram concedidas do trabalho de (VIEIRA DA SILVA, 2016).

Para o modelo Xbeach foi projetada uma grade local na região da praia Brava e Ingleses cobrindo uma área de aproximadamente 11km x 9km. A resolução máxima da grade é de 50m, e nas áreas de interesse 8m, com 330 por 394 elementos. Foi utilizado o módulo RGFRID do *software* D3D e respeitou-se os aspectos de ortogonalidade, mantida em valores inferiores a 0,04, e gradiente espacial M e gradiente espacial N, com valores inferiores a 1,2.

Tendo todas as grades configuradas, foi interpolada a batimetria para o XB com o método de interpolação triangular através do módulo Delf3D-Quickin. Devido ao maior refinamento da grade local quando comparada com a grade intermediária e carência de dados medidos, a delimitação de áreas secas das regiões das ilhas Moleques do norte, Mata-fome e Badejo foram alteradas com base na carta náutica da DHN de número 1902. Para as simulações de transporte com o XB foi também necessária a criação de uma camada de sedimentos de 10m e delimitação dos promontórios e ilhas para não serem erodidos (definidas áreas com camada de 0m de sedimentos).

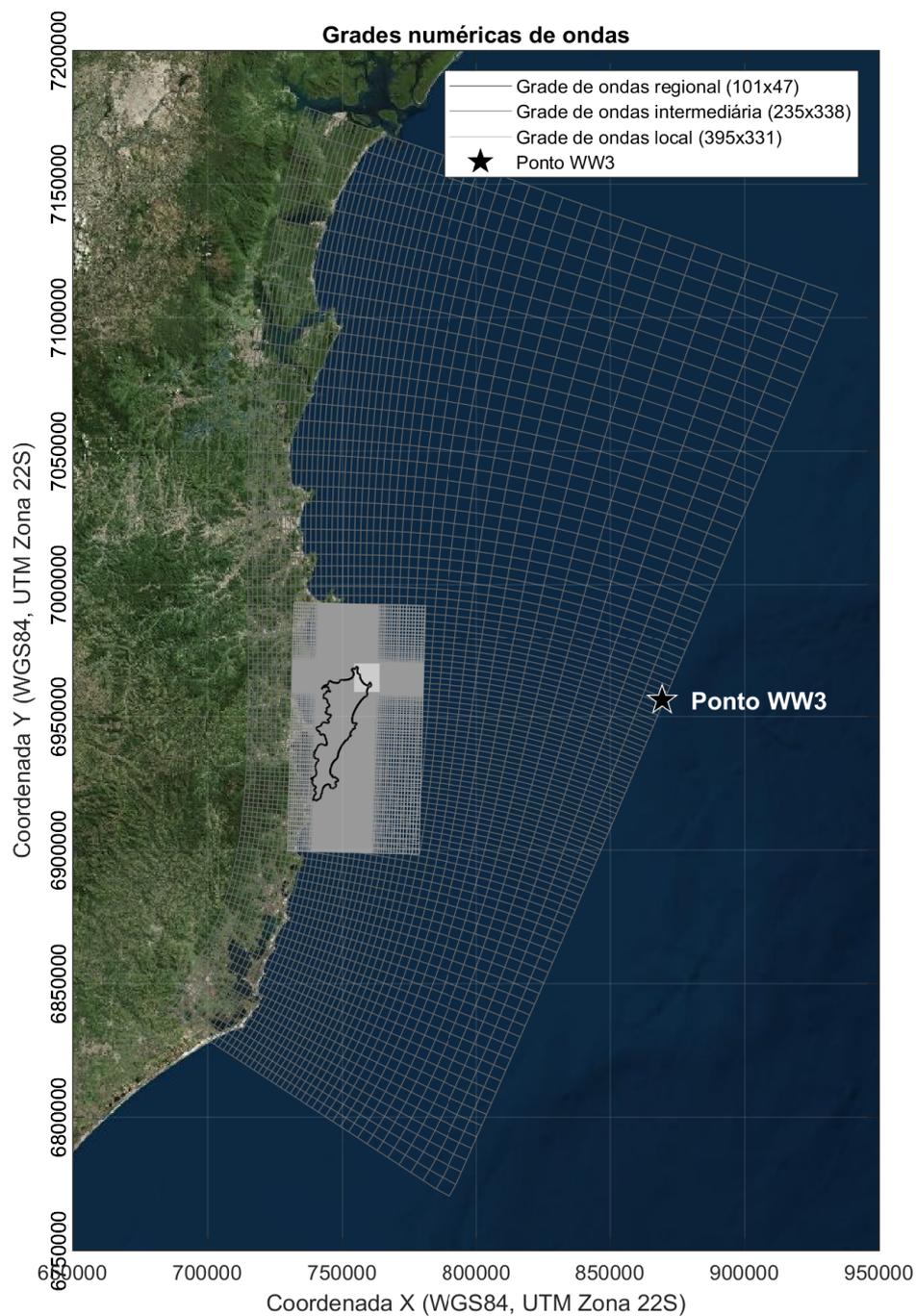


Figura 12 – Grades numéricas utilizadas para simulação de onda. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. Fonte das grades regionais e intermediária: [Vieira da Silva et al. \(2016b\)](#).

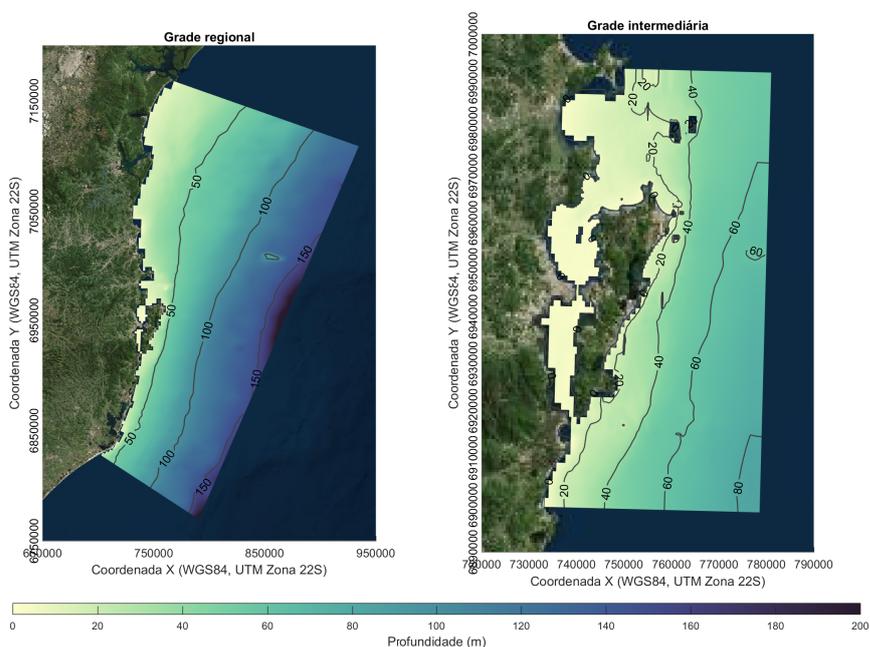


Figura 13 – Batimetria interpolada para as grades numéricas regional e intermediária. Fonte: ESRI World Imagery. DATUM horizontal: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. DATUM vertical: Nível médio do mar (NMM).

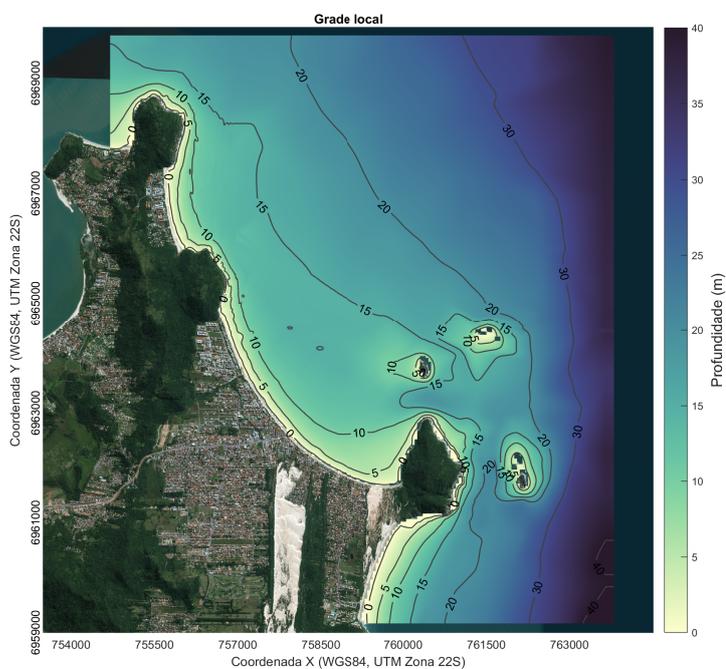


Figura 14 – Batimetria interpolada para as grade numérica local. Fonte: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. DATUM vertical: Nível médio do mar (NMM).

## 5.3 Calibração do modelo

### 5.3.1 Calibração modelo - Ondas

O modelo D3D cedido por (VIEIRA DA SILVA, 2016), foi rodado para propagar o espectro de ondas do WW3 nos períodos de janeiro a fevereiro de 2014 e julho a agosto de 2014, e então extraiu-se os parâmetros de ondas obtidos da simulação com o D3D para a fronteira do XB. Com o XB, foram testadas uma grade curvilínea, uma grade retangular rotacionada acompanhando o sentido nordeste da costa, e uma retangular normal. Também foram testadas grades compreendendo desde a isobata de 25 até 40m na região. As grades curvilínea e a retangular que acompanhava o sentido costa até a isóbata de 35m, negligenciaram ondulações mais ao sul da fronteira marinha (APÊNDICE A - Figura 30). Tentou-se utilizar mais de um ponto de entrada de dados paramétricos de ondas na fronteira do XB para contornar o problema, porém no modo STAT isto não é possível, inviabilizando a comparação entre os dois modos. A grade normal foi a que melhor representou os diversos cenários. Esta foi estendida então até a isóbata de 40m e foi a escolhida para prosseguir com a calibração.

Buscou-se fazer a calibração de ondas em um período correspondente ao verão (janeiro) e outro no inverno (agosto). Foram simulados com o XB nos modos STAT e INSTAT a série de ondas no período compreendido entre os dias 26 de janeiro de 2014 e 06 de fevereiro de 2014 (Figura 16) e de 17 de agosto a 22 de agosto de 2014, este último período abrange o período dos dados da armadilha de sedimento. Para cálculo dos erros entre os dados simulados e medidos no ponto ST17, foram obtidos parâmetros como a correlação ( $r^2$ ), índice de espalhamento (IE ou SI, *Scatter Index*), viés relativo (*relbias*), e o erro médio quadrático (EQM ou RMSE, *Root Mean Square Error*). Todos parâmetros estão descritos nas equações de 5.1 a 5.4, onde  $M$  são os dados medidos,  $S$ , dados simulados,  $N$  o número de elementos e  $\sigma$  o desvio padrão.

$$r^2 = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(M_i - \bar{M})}{\sigma_s \sigma_m} \quad (5.1)$$

$$SI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S}) - (M_i - \bar{M})}{\sum_{i=1}^N (M_i)^2}} \quad (5.2)$$

$$relbias = \frac{\bar{S} - \bar{M}}{\bar{M}} \quad (5.3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2} \quad (5.4)$$

O modelo XB não apresenta  $T_p$  e  $Dir_p$  como saída e  $H_{rms}$  é o parâmetro de saída de altura de ondas, pois o XB computa a propagação da energia de onda que varia na escala de tempo e espaço dos grupos. Para comparar a altura de ondas com os dados medidos do ADCP, foi utilizada a [Equação 5.5](#) com os valores médios de  $H_{rms}$  ([HOLTHUIJSEN, 2007](#)). Apesar de não terem sido calibrados o nível e correntes, foi verificado o comportamento dos mesmos durante todas as séries simuladas.

$$H_s = H_{rms}\sqrt{2} \quad (5.5)$$

### 5.3.2 Calibração modelo - Transporte de sedimentos

Para a calibração do transporte de sedimento, a série temporal de ondas entre os dias 17 de agosto a 22 de agosto de 2014, extraídas do D3D para a fronteira do XB, foi simulada com a ativação do transporte de sedimento e da morfologia após um dia de aquecimento do modelo. A magnitude do transporte de sedimento de carregamento de fundo do dia 19 de agosto foi comparada com a armadilha de sedimento. Apesar de também não terem sido calibrados, foram verificados também o comportamento do transporte de carregamento suspenso, sedimentação/erosão e foi realizada uma comparação entre batimetria inicial e final.

## 5.4 Simulação do transporte de sedimentos em cenários médios e extremos

Os cenários médios e extremos ([Tabela 1](#)) de [Vieira da Silva et al. \(2018\)](#) foram propagados com D3D para a fronteira do XB. Uma vez calibrada as ondas e o transporte de sedimento, utilizou a mesma configuração ([Apêndice B](#)) para a modelagem de cada cenário com o XB no modo STAT e INSTAT. No total foram feitas 16 simulações, quatro de direções NE, E, SE e S médios e quatro de extremos, em ambos os modos.

Como o XB resolve as variações do gradiente de radiação de estresse através das equações não-lineares de águas rasas, as ondas de infragravidade podem ser computadas através da variância do nível d'água ( $z_{s_{var}}$ ), sendo estas calculadas nos cenários simulados no modo não-estacionário com base na [Equação 5.6](#).

$$HIG_{rms} = \sqrt{8|z_{s_{var}}|} \quad (5.6)$$

Foram simulados 2 dias hidrodinâmicos para cada cenário e aplicado um MORFAC de valor 2 após o primeiro dia de aquecimento do modelo para diminuir o esforço computacional. Em todos os cenários, foram calculados o balanço do transporte longitudinal até a isobata de 10m da praia Brava até o setor semiexposto dos Ingleses.

Todos os resultados de transporte de sedimentos do modelo em  $\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$  (ou  $\text{m}^2/\text{s}$ ) foram integrados em transectos ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e multiplicado pelo número de segundos em um ano ( $\text{m}^3/\text{ano}$ ). Cabe ressaltar que este trabalho visa analisar o transporte gerado por ondas e que os cenários aqui simulados não ocorrem continuamente no período de um ano, sendo feito desta maneira apenas para facilitar a interpretação dos resultados.

## 5.5 Derivadores virtuais

Para analisar o comportamento das correntes em cada cenário, foram posicionados 200 derivadores virtuais superficiais no modelo espaçados aleatoriamente em 20m até a superfície da isóbata de 10m nas praias Brava e Ingleses e no entorno do promontório.

Por equívoco, os derivadores foram iniciados juntamente com as simulações hidrodinâmicas, não levando em consideração o período de aquecimento do modelo. Também por motivo não identificado eles foram desativados automaticamente pelo modelo no final primeiro dia de simulação. Devido ao tempo, não foi possível rodar novamente os modelos respeitando o período de aquecimento e também não foi possível identificar o porquê do desativamento no final do primeiro dia, sendo necessário fazer outros testes e rodar o modelo respeitando o período de aquecimento. Apesar disso, foi observado que os derivadores acompanham o fluxo das correntes médias, sendo então relevantes sua exposição neste trabalho para auxiliar na observação do efeito das ondas na hidrodinâmica local. O comportamento dos derivadores podem ser verificados no Apêndice F.

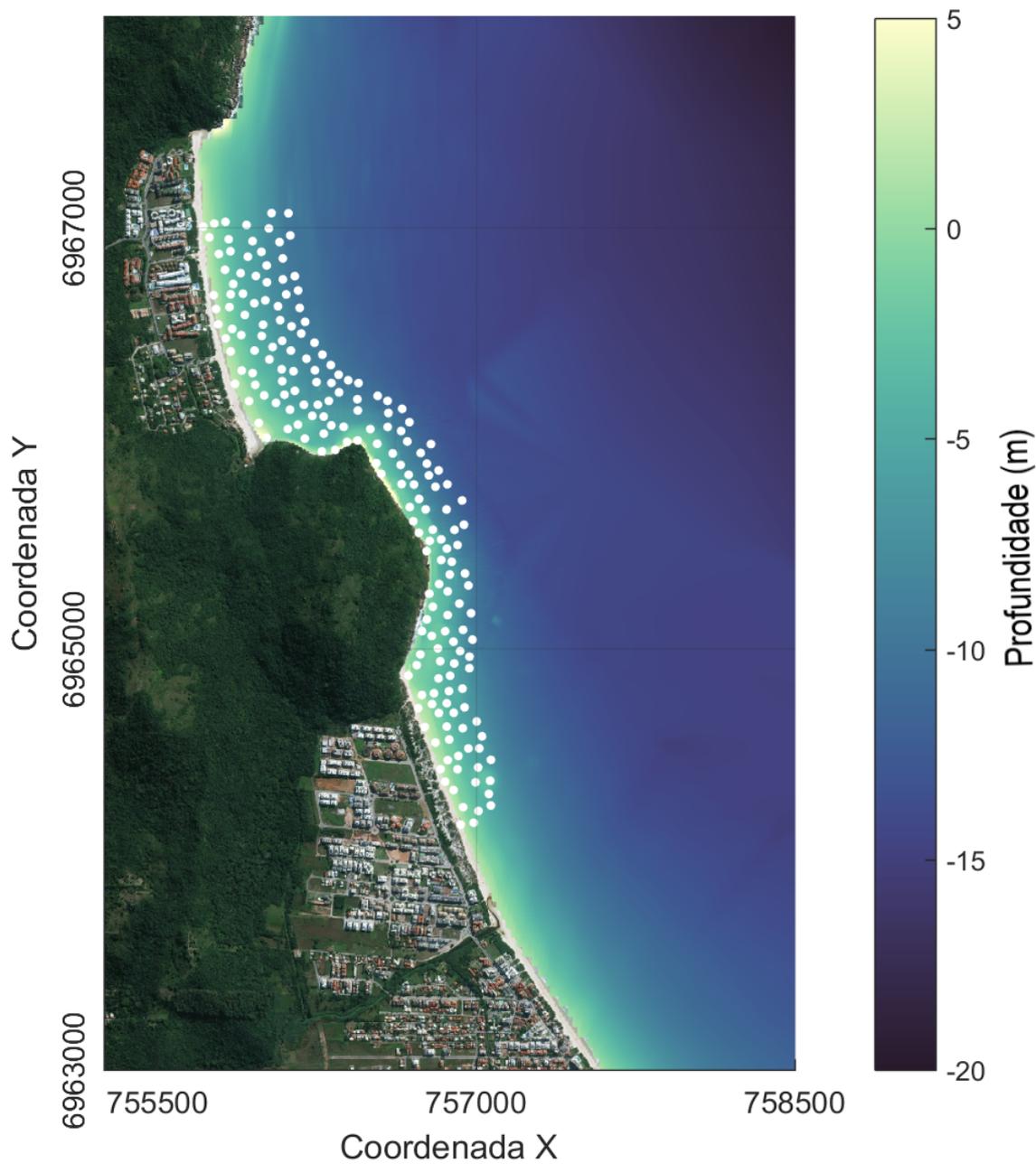


Figura 15 – Posição inicial dos derivadores. Fonte: ESRI World Imagery. DATUM horizontal: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S. DATUM vertical: Nível médio do mar (NMM).

## 6 Resultados e Discussão

### 6.1 Calibração de ondas

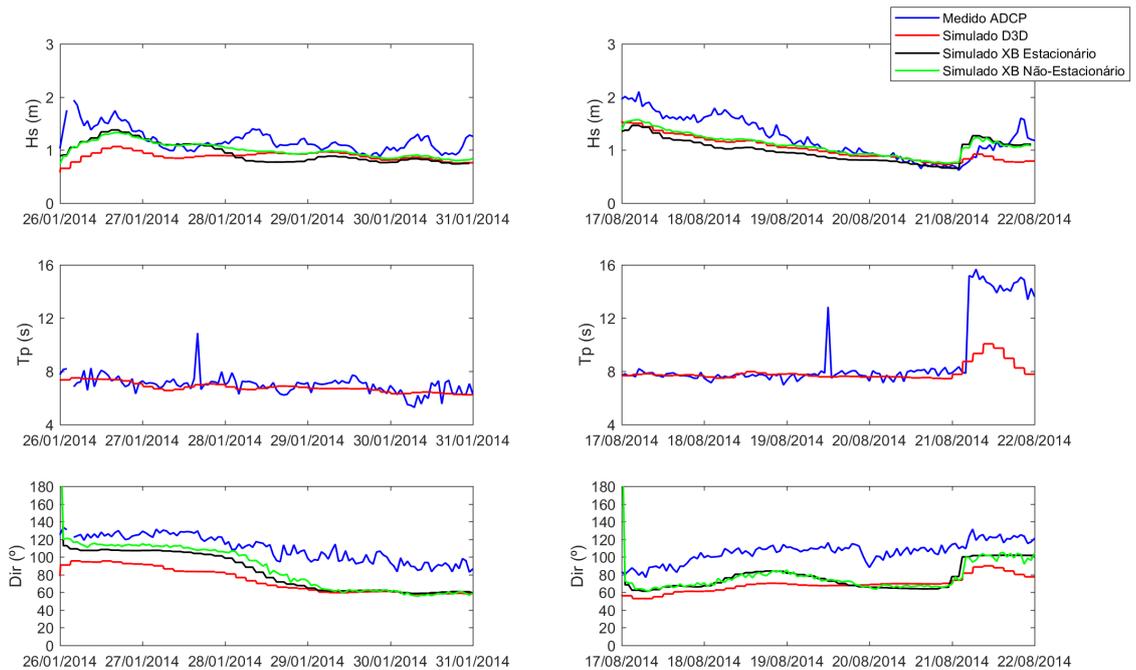


Figura 16 – Séries temporais dos períodos de verão (26 a 31 de janeiro de 2014) e inverno (17 a 22 de agosto de 2014) selecionados para calibração de ondas.  $H_s$  : altura significativa,  $T_p$ : Direção de pico,  $Dir_m$ : Direção média.

No período de verão, entre os dias 28 e 29 de janeiro, houve mudança na  $Dir_m$  da ondulação (de SE para E) e pode-se observar um menor erro de  $Dir_m$  do XB quando comparado com o D3D (Figura 16). Durante os testes com diferentes grades, quanto mais se estendia a grade até isobatas mais profundas, menores os erros obtidos com o XB na  $Dir_m$  do quadrante SE. No entanto, para não aumentar o esforço computacional com uma maior quantidade de elementos na grade, optou-se por estendê-la somente até a isóbata de 40m. Nesta profundidade, a batimetria é mais homogênea na fronteira *offshore* do XB. Supõe-se que o XB resolveu melhor o processo de refração e difração das ondas que o D3D, devido a uma resolução espacial maior utilizada no modelo que no D3D.

A localização do fundeio do ADCP, a qual apresenta as ilhas Mata-fome e Moleques do Norte no entorno, possui uma baixa resolução de dados de batimetria nas cartas náuticas e carência de levantamentos hidrográficos. Isto pode também favorecer

os erros e as diferenças obtidas em ambos modelos, tanto na  $Dir_m$  quanto na  $H_s$ . Há uma diferença de 5m da batimetria no ponto de fundeio do ADCP (19,7m) com a batimetria interpolada do modelo XB no mesmo ponto (14,7m).

De forma geral, o índice de espalhamento, o viés relativo e o erro quadrático médio é menor com XB nos dois modos em ambos os períodos, como o apresentado na Tabela 2. A correlação de  $Dir_m$  foi maior no período de verão e menor no período de inverno. O comportamento oposto é observado com a correlação de  $H_s$ . Como as séries temporais simuladas neste trabalho são curtas, o tamanho amostral é pequeno e os índices estatísticos podem não ser expressivos, sendo necessários períodos maiores (ou mais períodos) para uma melhor calibração do modelo.

O intuito principal deste trabalho é comparar os dois modos do XB para avaliar uma possível influência de ondas IG no transporte de sedimentos, portanto foram assumidos os erros expostos na Tabela 2 para prosseguir na calibração do transporte de sedimentos, apesar de não ter sido obtido uma excelente calibração e posterior validação do modelo. Além disso, a altura significativa das ondas computada pelo modelo é próxima da medida durante o período simulado correspondente a aquisição dos dados da armadilha de sedimentos (19 de agosto de 2014).

Tabela 2 – Erros estatísticos para  $H_s$ ,  $T_p$  e  $Dir_m$

Erros estatísticos	D3D			XB STAT		XB INSTAT		
	$H_s$	$T_p$	$Dir_m$	$H_s$	$Dir_m$	$H_s$	$Dir_m$	
26-31/jan	r2	0.21	0.48	0.89	0.56	0.77	0.55	0.80
	SI	0.31	0.08	0.33	0.26	0.28	0.21	0.26
	relbias	-0.25	-0.03	-0.33	-0.20	-0.22	-0.15	-0.19
	rmse	0.37	0.61	36.46	0.30	31.01	0.26	28.66
17-22/ago	r2	0.89	0.80	0.85	0.89	0.29	0.89	0.26
	SI	0.23	0.25	0.35	0.19	0.26	0.20	0.33
	relbias	-0.16	-0.11	-0.35	-0.08	-0.17	-0.10	-0.26
	rmse	0.30	2.35	37.34	0.24	27.47	0.25	35.02

## 6.2 Calibração do transporte de sedimentos

Quando comparados com dados da armadilha de sedimento (média de transporte em HS1 de  $2,31E-07$  m<sup>2</sup>/s e em HS2 de  $4,39E-07$  m<sup>2</sup>/s), o modo estacionário apresenta uma ordem de magnitude menor (média em HS1 de  $2,18E-08$  m<sup>2</sup>/s e HS2  $3,89E-08$  m<sup>2</sup>/s) e o modo não-estacionário é de mesma magnitude (média em HS1 de  $2,26E-07$  m<sup>2</sup>/s e HS2  $2,02E-07$  m<sup>2</sup>/s). Com o modelo D3D a média em HS1 é  $9,88E-08$  m<sup>2</sup>/s e HS2  $1,77E-07$  m<sup>2</sup>/s (VIEIRA DA SILVA et al., 2016b).

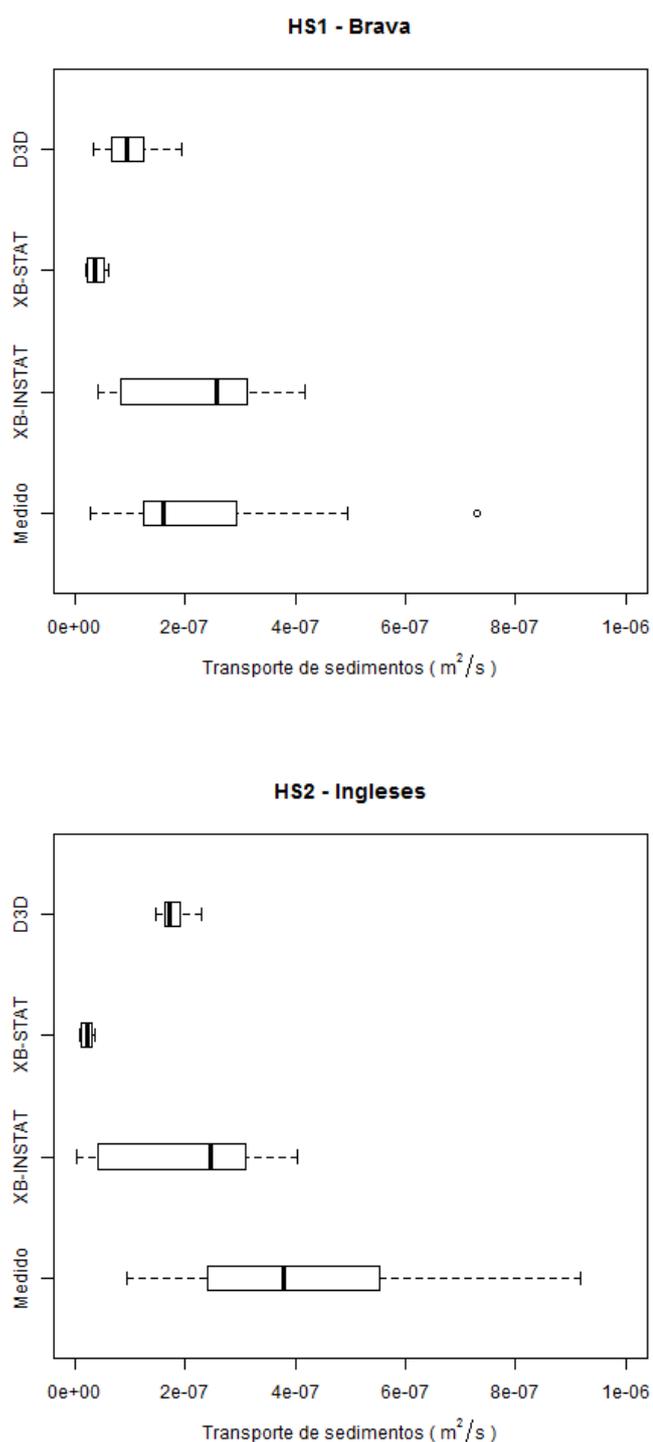


Figura 17 – *Boxplot* da magnitude do transporte de carregamento de fundo medidos e simulados em HS1 e HS2.

Ao passo que o D3D possibilita a customização da fórmula de transporte de sedimentos, o XB apresenta três fórmulas possíveis: Soulsby-Van Rijn (SOULSBY, 1997; RIJN, 1984), Van Thiel-Van Rijn (VRIES, 2009; RIJN, 2007) e Van Rijn (RIJN et al., 1993). No trabalho de Vieira da Silva et al. (2016b) foram testadas diversas

fórmulas, e Bijker (BIJKER, 1967; BIJKER, 1971) apresentou uma melhor correlação com dados medidos. Neste trabalho foi testada a fórmula de Van Rijn, e a padrão do XB, Van Thiel-Van Rijn. Não foi possível testar a fórmula de Soubby-Van Rijn devido ao tempo necessário para cada simulação.

Quando simulado com Van Rijn, o local das armadilhas de sedimento não apresentou algum transporte de carregamento de fundo em ambos os modos. Já com a fórmula de sedimento padrão, o XB apresentou resultados satisfatórios no modo não-estacionário quando comparado com as armadilhas. Um vez que a configuração padrão de transporte de sedimentos com a fórmula Van Thiel-Van Rijn apresentou bons resultados no modo não-estacionário, foi mantida a mesma fórmula de transporte de sedimentos em ambos os modos, deixando o modelo com os parâmetros padrões de transporte de sedimentos para a comparação.

Não foram considerados o vento e a maré para calibração do transporte de sedimentos com o modelo XB, no entanto as condições meteoceanográficas no momento da coleta de dados da armadilha de sedimento eram de maré baixa de quadratura e ventos de velocidade máxima de 4m/s. Tal condição ambiental não deve influenciar de forma significativa no valor do transporte de sedimentos para ser necessário utilizar estas forçantes na calibração do transporte. Além disso, Vieira da Silva et al. (2018) aponta que as ondas é a principal forçante que influencia no transporte de sedimento na região, apresentando baixa influência da maré e ventos no processo.

### 6.3 Propagação de ondas de águas profundas para águas rasas

A propagação dos casos de ondas médias e extremas para a costa (Tabela 1) com o modelo D3D-WAVE podem ser observados na Figura 18, bem como os parâmetros de ondas extraídos para a fronteira do XB.

Dalinghaus (2016) observou com o modelo SMC Brasil, que nos casos de NE, as ondas chegam à praia dos Ingleses sem enfrentar obstáculos, com a altura de ondas homogêneas em toda a linha de costa, o mesmo foi observado neste trabalho com cenários de NE propagados com o XB na praia Brava e Ingleses. Nos casos de ondas provindos de E, as ilhas Mata-fome e Moleques do Norte geram uma região de sombra onde a energia que chega à costa é atenuada de forma considerável, diminuindo a  $H_s$  em mais da metade nos Ingleses (DALINGHAUS, 2016).

Na praia Brava, em cenários de ondas de NE e E, as ondas também chegam à praia com alturas homogêneas por não enfrentarem obstáculos. A situação é modificada nas condições de ondas de SE, onde a Brava sofre o efeito de sombra da ponta

das Feiticeiras em sua porção sul, além do efeito das ilhas Mata-fome e Moleques do norte na porção central. Pode-se notar também um maior efeito de sombra das ilhas no cenário de SE na propagação de ondas com o modelo XB quando comparado com o D3D (Figura 18) e o SMC-Brasil (DALINGHAUS, 2016). Em cenários de ondas de S, tanto a praia Brava quanto Ingleses são protegidos pelas ilhas, reduzindo significativamente  $H_s$ , apesar dos cenários de S apresentarem os maiores valores de  $H_s$  e  $T_p$  na fronteira *offshore*.

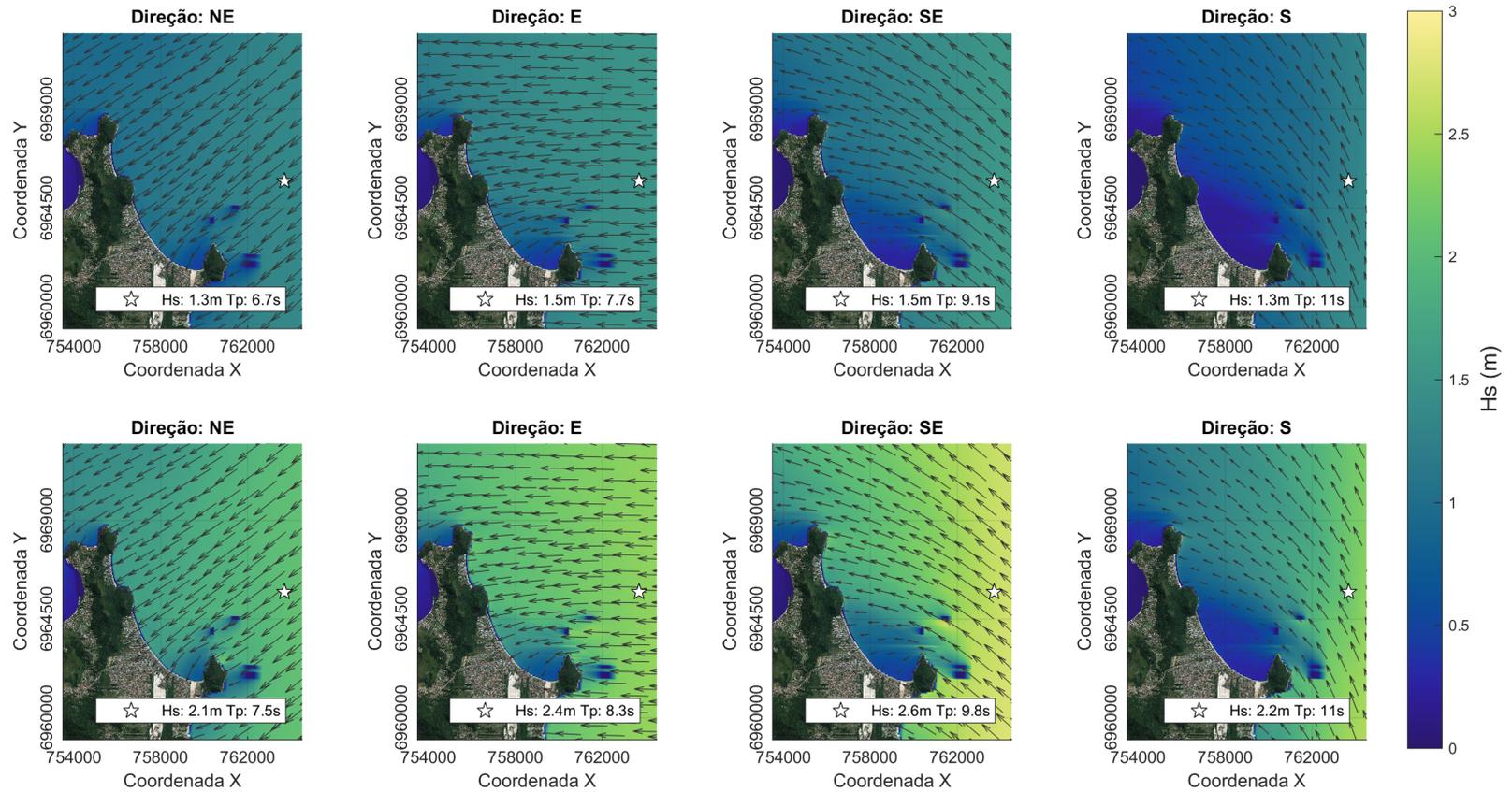


Figura 18 – Propagação dos cenários de ondas para a costa com o D3D. Na primeira linha, eventos médios e na segunda linha, os extremos. A estrela branca representa o local dos parâmetros de ondas extraídos para o XB. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

## 6.4 Ondas de infragravidade no XB

As ondas IG computadas pelo XB no modo não-estacionário em cenários médios podem ser observadas na [Figura 19](#) e em cenários extremos, na [Figura 20](#). Note a diferença da escala de cores dos cenários médios ( $HIG_{rms}$  de 0 a 0,05m) e cenários extremos ( $HIG_{rms}$  de 0 a 0,1m). Em cenários extremos, ondas IG são mais expressivas do que em cenários médios devido a uma maior radiação de estresse na coluna d'água causada por maiores alturas de ondas se aproximando na costa.

Apesar dos cenários de S apresentarem os maiores valores de  $H_s$  e  $T_p$  no ponto escolhido para análise estatística feita por [Vieira da Silva et al. \(2018\)](#), as ondas de SE perdem menos energia na propagação de águas mais profundas para rasas com o D3D, conseqüentemente apresentam os maiores valores na fronteira do XB. Tal fato pode explicar a maior altura encontrada de ondas IG produzidas nos cenários de SE, apesar da região de estudo ser protegida pela sombra das ilhas Mata-fome e Moleques do Norte e sofrer significativa atenuação da energia de ondas curtas.

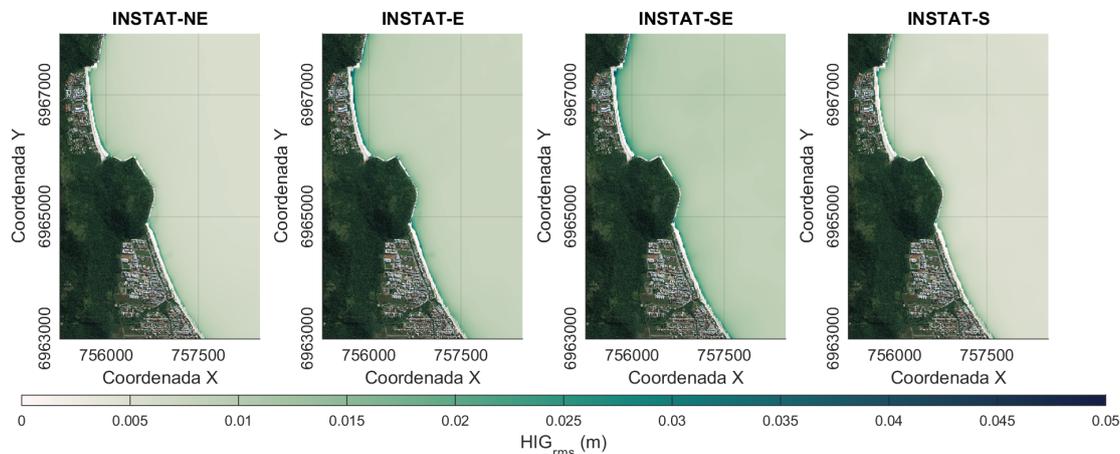


Figura 19 – Altura de ondas de infragravidade computadas pelo modelo XB no modo não-estacionário em cenários médios. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

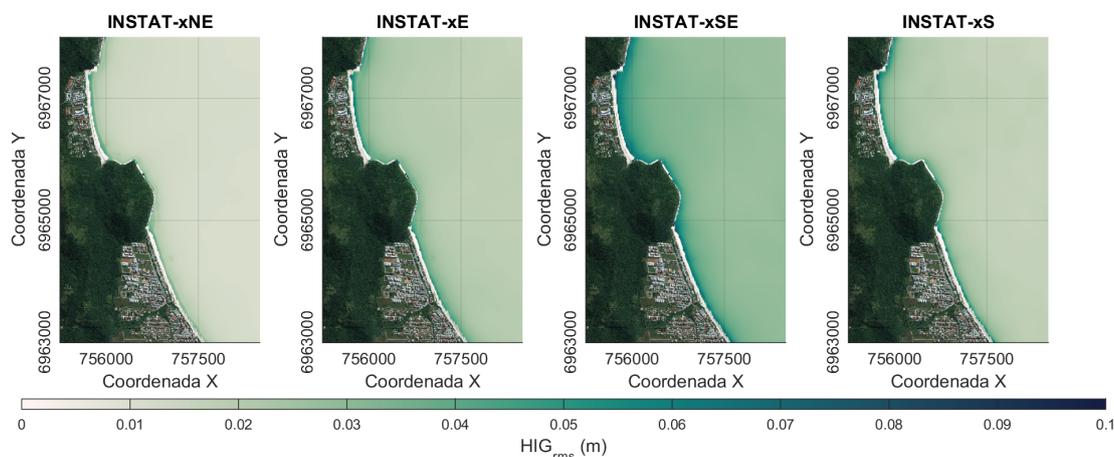


Figura 20 – Altura de ondas de infragravidade computadas pelo modelo XB no modo não-estacionário em cenários médios. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

## 6.5 Cenários médios e extremos de ondas

### 6.5.1 Nordeste (NE)

Nos cenários de NE no modo não-estacionário, é possível notar o acúmulo de sedimentos na porção norte da ponta das Feiticeiras produzido pelas correntes que geram um transporte longitudinal de direção norte para sul na praia Brava, principalmente em eventos extremos (Figura 22). O balanço do transporte longitudinal está em sua maioria no sentido norte para sul, apresentando alguns pulsos na porção norte do promontório no sentido contrário. Em eventos médios, o transporte chega a mais de  $200 \text{ m}^3/\text{ano}$  (Figura 21) e em extremos, a  $1000 \text{ m}^3/\text{ano}$  (Figura 22). Este padrão não é tão expressivo no modo estacionário, no qual o transporte é maior no sentido transversal da praia não ultrapassando  $40 \text{ m}^3/\text{ano}$  em eventos extremos (Figura 21).

Os derivadores são transportados para fora da enseada pela corrente longitudinal produzida pela ondulação de NE incidente na ponta do Rapa até a extremidade da ponta das Feiticeiras. Alguns escapam para fora na ponta das Feiticeiras, porém em sua maioria acompanham o caminho da corrente longitudinal até a praia dos Ingleses (Figura 35 e Figura 36).

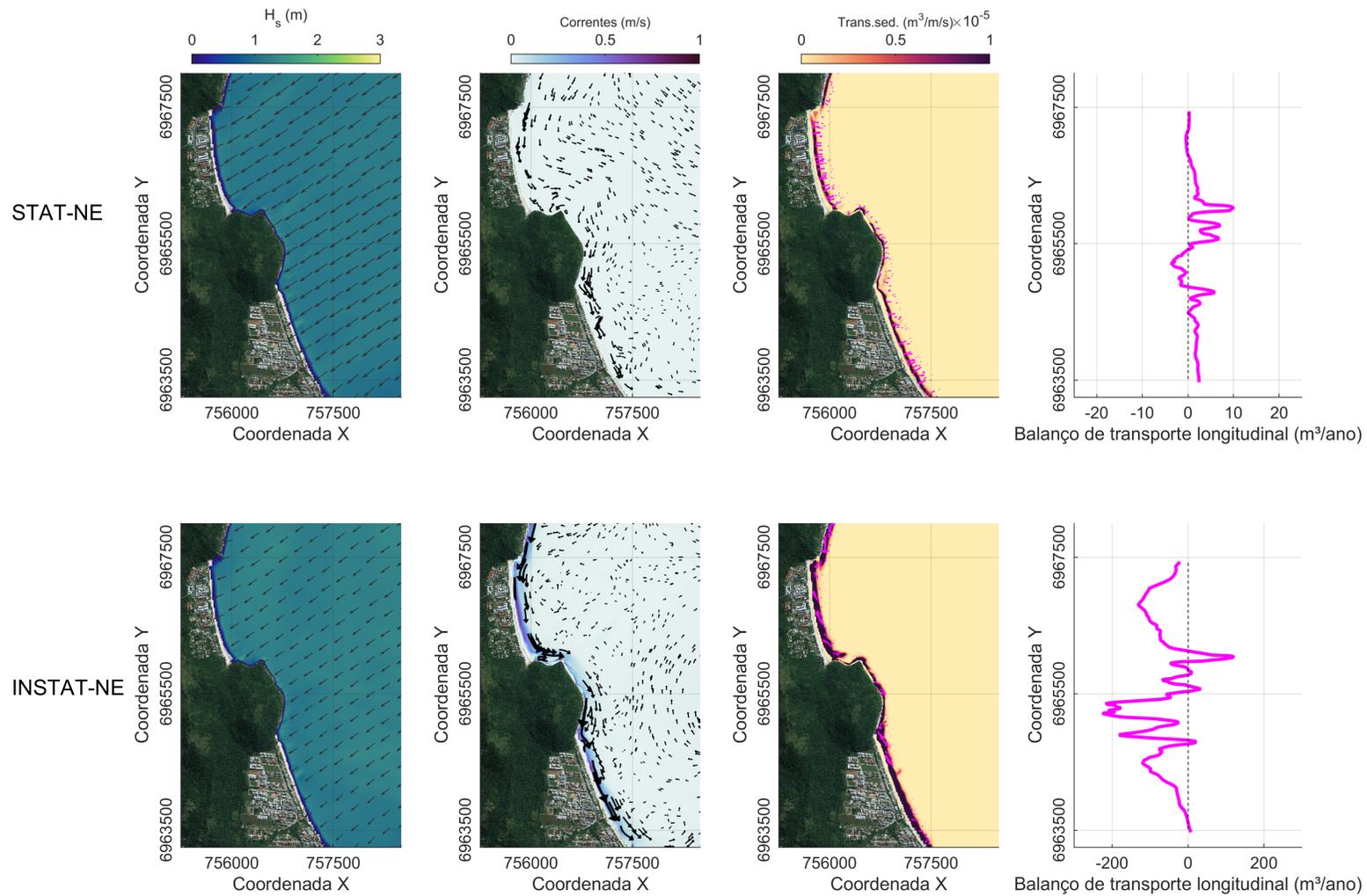


Figura 21 – Cenário médio de ondas de direção NE. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

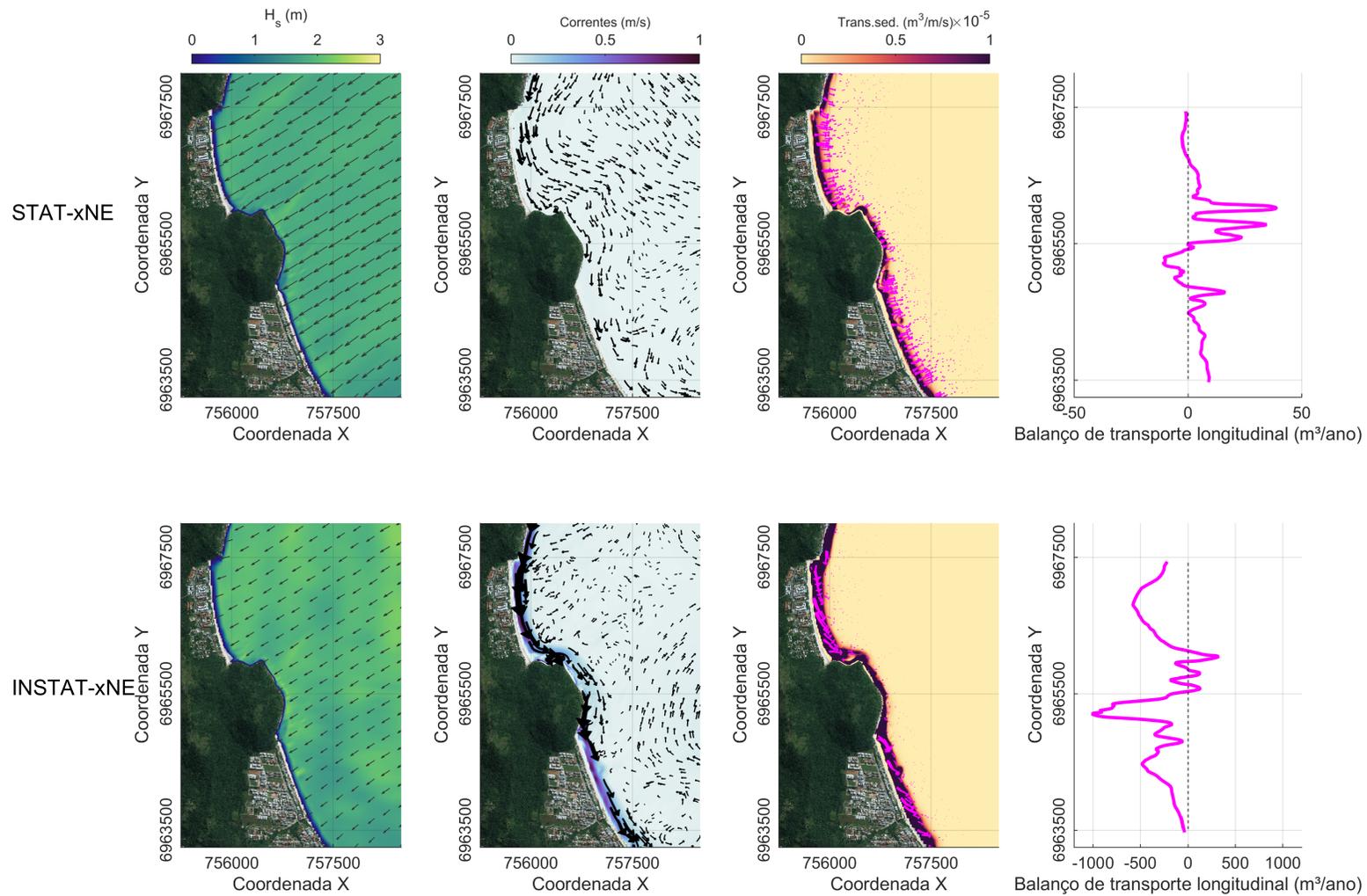


Figura 22 – Cenário extremo de ondas de direção NE. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

### 6.5.1.1 Leste (E)

No cenários de E, ondas chegam normais à costa e um padrão de correntes circular na praia Brava é verificado, produzido pela intensificação das correntes na ponta do Rapa e na Feiticeiras (Figura 23). É observada a formação de uma megacorrente de retorno no meio da praia Brava, com velocidades maiores computadas no modo não-estacionário em eventos extremos (Figura 24). Na praia dos Ingleses, o desenvolvimento de um padrão celular também é observado, porém menos intenso que na Brava, pois parte significativa da praia dos Ingleses está em zona de sombra das ilhas Mata-fome e Moleques do norte nos cenários de E, atenuando a ação das ondas.

O efeito da megacorrente no transporte pode ser verificado através das oscilações do balanço longitudinal entre o eixo negativo e positivo. É gerado um transporte longitudinal próximo a zero no local em que a megacorrente apresenta maiores velocidades, devido à maior intensidade do transporte transversal neste local. Em cenários médios, encontra-se um pulso de transporte transversal no setor norte dos Ingleses em direção *offshore* (Figura 23). A corrente longitudinal positiva e negativa na ponta das Feiticeiras são capazes de transportar mais de 500 m<sup>3</sup> em ambas direções, sendo interrompida no meio da Brava pela megacorrente e na praia dos Ingleses por uma corrente de retorno mais fraca. Novamente, o transporte longitudinal no modo estacionário é de uma ordem de magnitude menor que no não-estacionário em todas as condições de ondas de E.

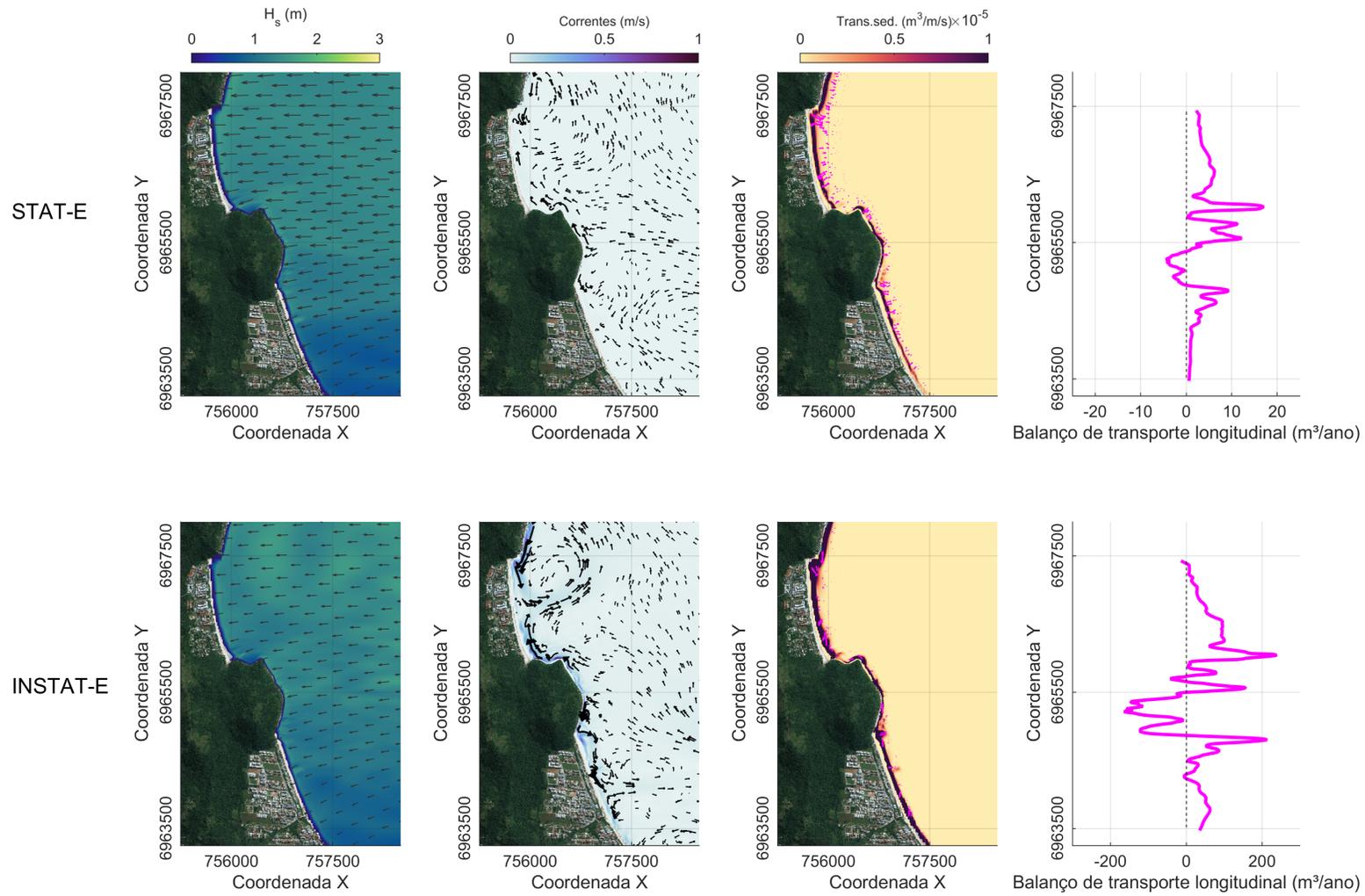


Figura 23 – Cenário médio de ondas de direção E. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

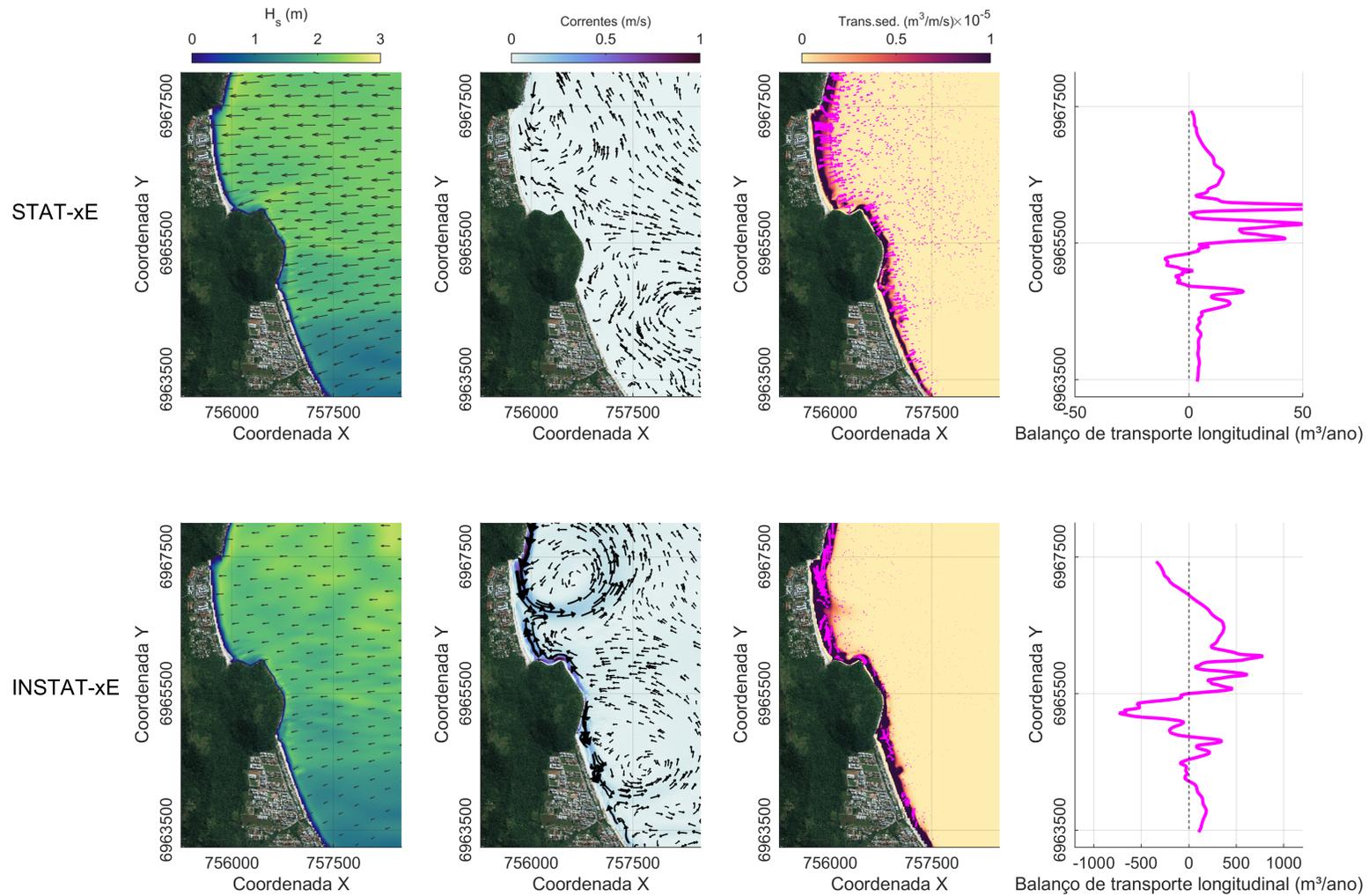


Figura 24 – Cenário extremo de ondas de direção E. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

### 6.5.2 Sudeste (SE)

Em cenários de SE, ainda pode ser observado o padrão circular de correntes, porém menos intensas que nos cenários de E. A praia Brava e a ponta das Feiticeiras entra na zona de sombra causada pelas ilhas Mata-fome e Moleques do norte, e há maior energia de ondas próxima a ponta do Rapa. Em eventos extremos é formado uma corrente e retorno na porção norte da praia Brava e dos Ingleses (Figura 26). No modo estacionário não é possível visualizar o pulso de areia acompanhando as correntes de retorno nestes locais. O balanço do transporte longitudinal é positivo, indicando um transporte em direção ao norte, salvo uma pequena região ao sul do promontório influenciada pela corrente de retorno ali formada. A ordem de magnitude de transporte longitudinal também é menor quando comparada com o modo não-estacionário. Em eventos extremos o modo estacionário não atinge  $20 \text{ m}^3/\text{ano}$ , enquanto em eventos médios o valor calculado para o modo não-estacionário é de cerca de  $95 \text{ m}^3/\text{ano}$ .

### 6.5.3 Sul (S)

Tanto a praia Brava quanto a praia dos Ingleses apresentam correntes menos intensas nos cenários de S, por serem ambas protegidas desta ondulação pelas ilhas (Figura 27). O sentido da corrente é preferencialmente no sentido de sul para norte das Feiticeiras até a Brava fora das enseadas. Dentro da enseada da Brava, a corrente de sul ao aproximar-se da ponta do Rapa inverte de direção e retorna em direção ao sul próximo a face da praia. Na praia dos Ingleses o padrão de circulação é bastante irregular. A diferença do transporte longitudinal em ambos os modos difere significativamente entre eventos médios extremos, não atingindo  $3 \text{ m}^3/\text{ano}$  no modo estacionário e  $120 \text{ m}^3/\text{ano}$  no não estacionário.

Um comportamento circular nos derivadores é observado no arredor da ponta das Feiticeiras e na praia Brava, mas a maioria dos derivadores são transportados longitudinalmente até saírem para fora das enseadas no final das simulações (Figura 41).

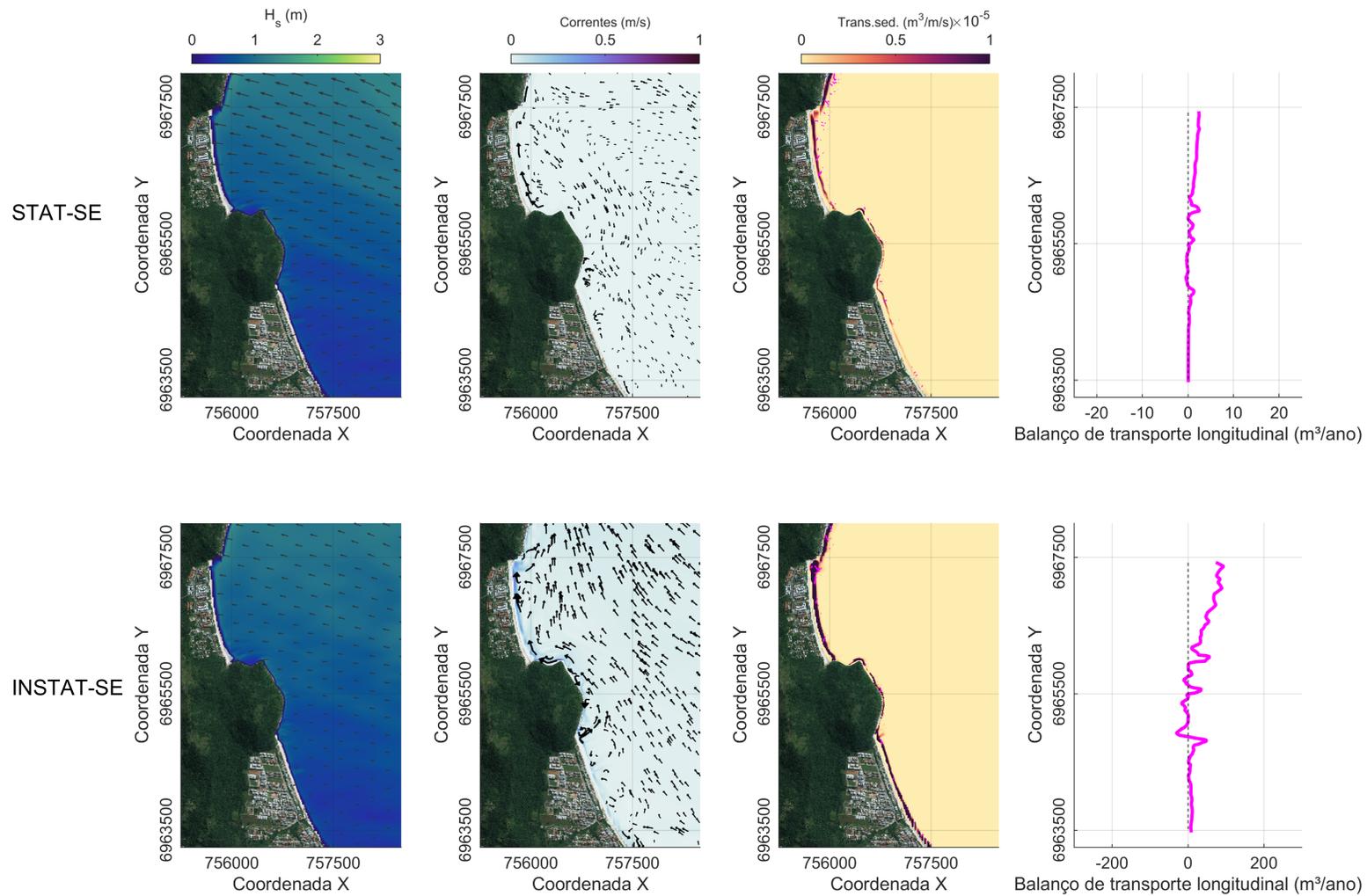


Figura 25 – Cenário médio de ondas de direção SE. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

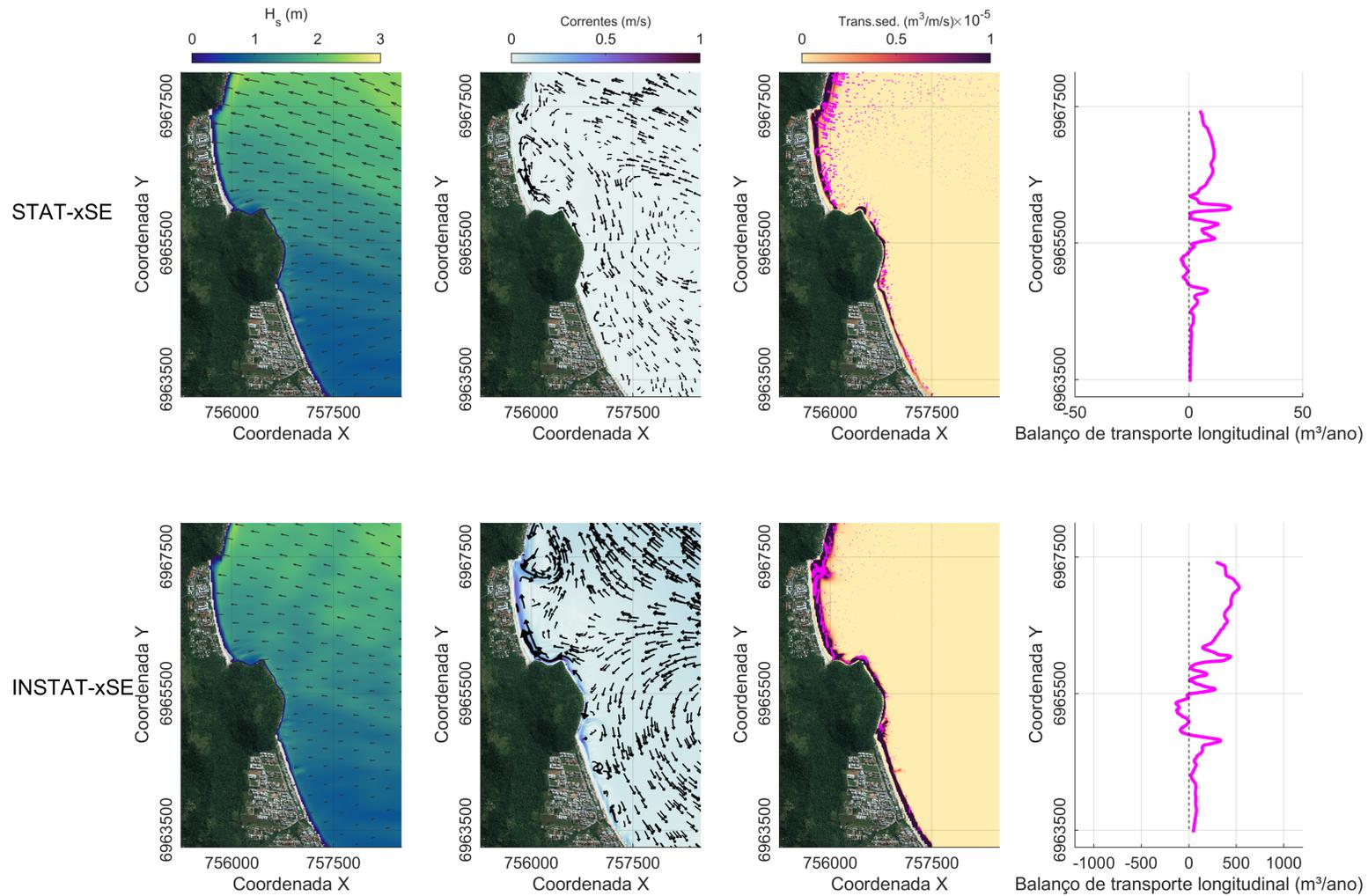


Figura 26 – Cenário extremo de ondas de direção SE. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

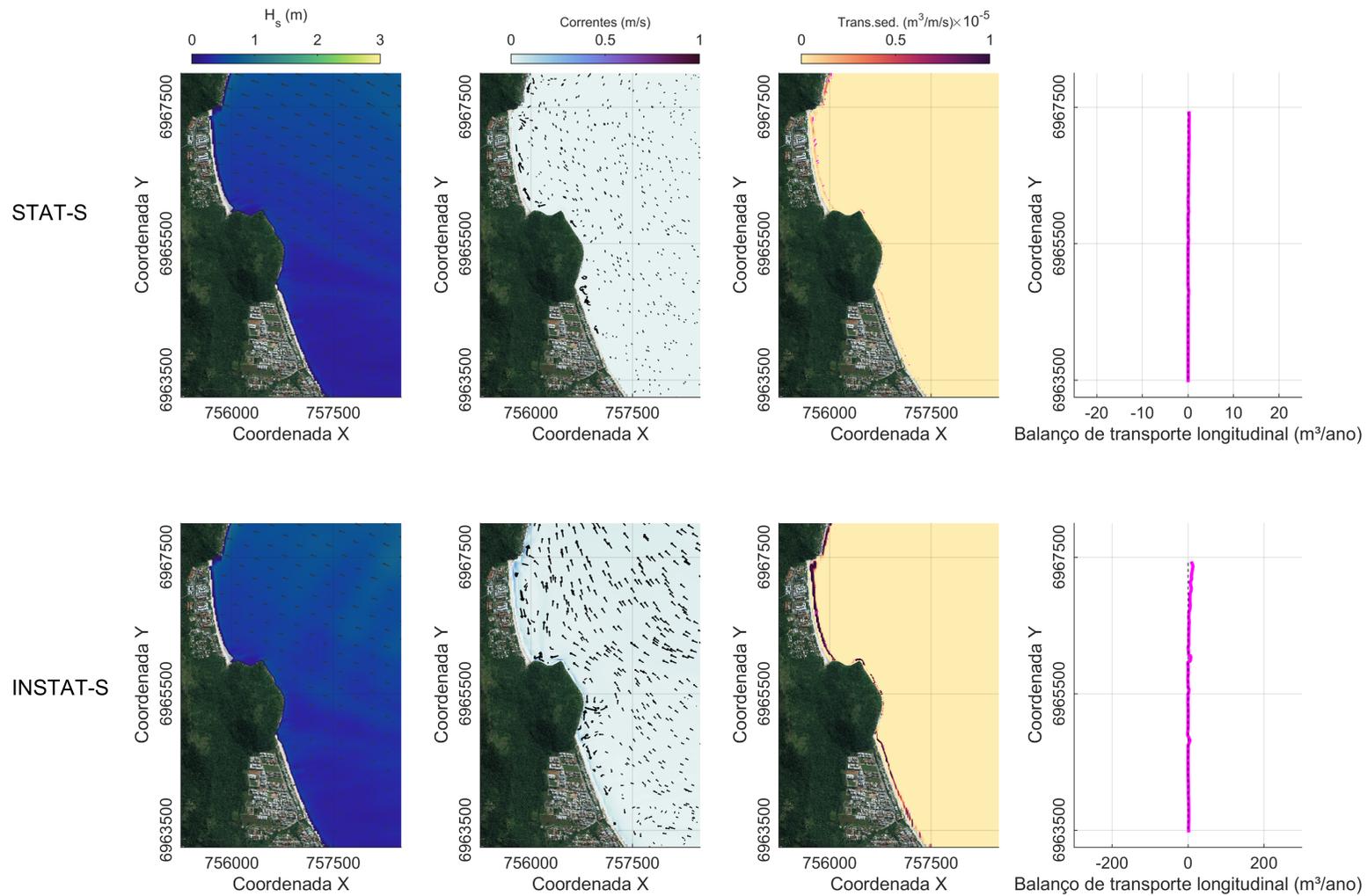


Figura 27 – Cenário médio de ondas de direção S. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

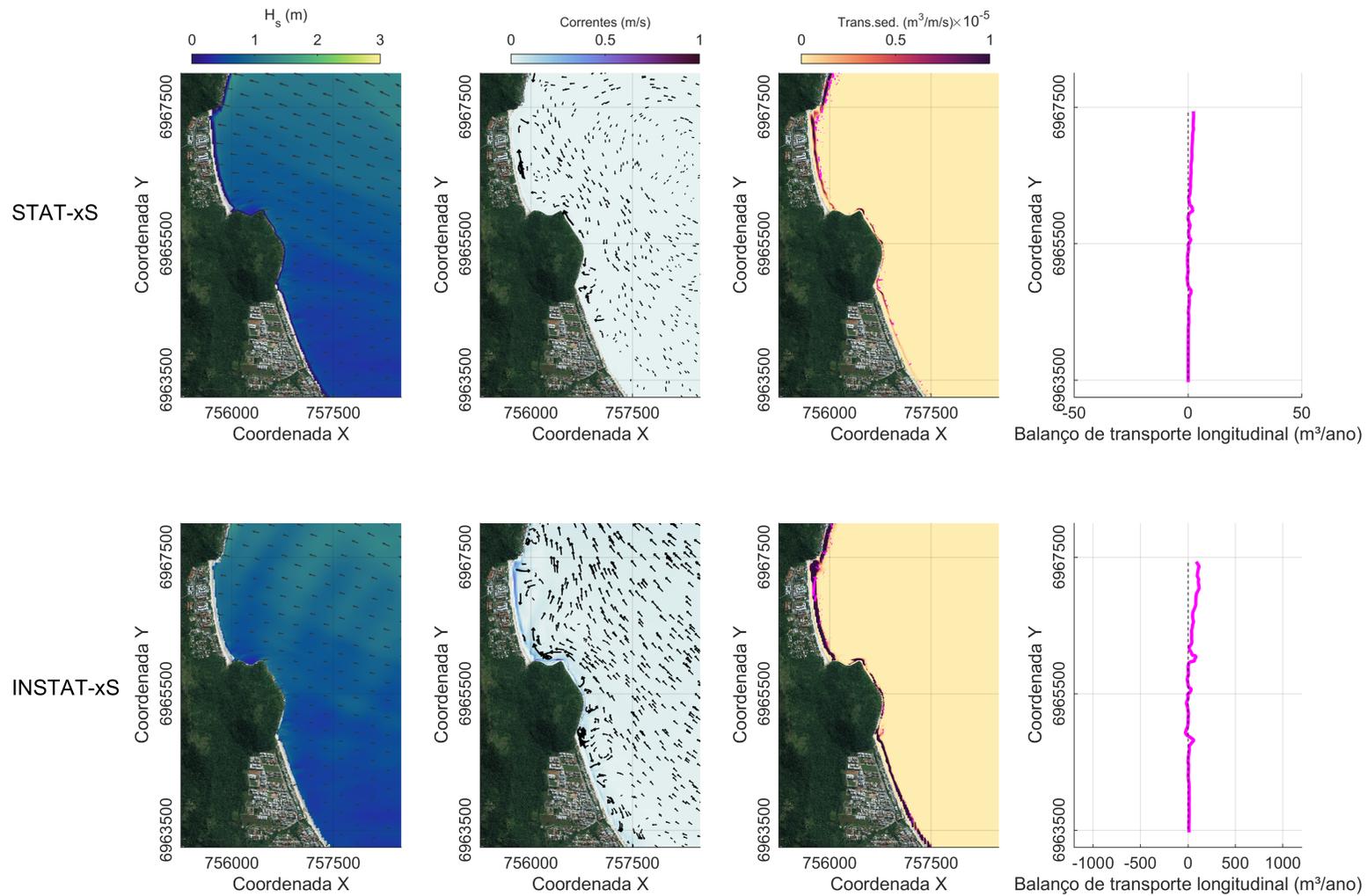


Figura 28 – Cenário extremo de ondas de direção S. Na primeira linha, o modelo XB no modo estacionário (STAT) e na segunda linha, no modo não-estacionário (INSTAT). Note a diferença de magnitude do balanço de transporte de sedimentos longitudinal do modo STAT para o INSTAT. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

A maior altura de onda IG encontrada em todos os cenários é de 0,1 m com ondas de direção SE. Conforme o proposto por [Bakker et al. \(2016\)](#), ao relacionar a altura máxima de ondas encontrada na zona de surfe com a altura de ondas IG, a relação  $HIG/HSW$  não supera 0,4, o que possivelmente não indica um transporte de sedimentos intensificado por ondas IG. Apesar da pouca amplitude para influenciar na mobilização de sedimentos, as ondas IG intensificam a velocidade das correntes longitudinais e as correntes de retorno, dirigindo o transporte de sedimentos.

Em todos os cenários, as correntes geradas por ondas no modo estacionário é de menor intensidade e o transporte de sedimentos ocorre na maioria das vezes transversalmente a praia. No modo não-estacionário é possível visualizar correntes longitudinais e transversais mais expressivas e o transporte de sedimento de maior magnitude as acompanhando. O transporte longitudinal no modo não-estacionário é uma ordem de magnitude maior em todos os cenários que no modo estacionário, no caso de NE extremo a diferença supera duas ordens de magnitude.

[Vieira da Silva et al. \(2018\)](#), ao modelar a transposição de sedimentos na região com o D3D e avaliar o transporte em transcetos, verificou também que os cenários de NE são de maior magnitude de transporte, ocorrendo no sentido horário, disponibilizando sedimentos da praia Brava para transpor a ponta das Feiticeiras em direção à Ingleses. Entretanto, o balanço de sedimento anual calculado no promontório para o ano de 2014, é de 3000 m<sup>3</sup> em direção a Brava ([VIEIRA DA SILVA et al., 2016b](#)). Apesar de apresentar maior intensidade, cenários de NE são de menor frequência de ocorrência na região ([Figura 10](#)) e eventos E, SE e S podem gerar correntes capazes de disponibilizar sedimentos na ponta das Feiticeiras em direção à Brava com maior frequência, entretanto em menor magnitude.

Em cenários de E extremo, é possível observar uma megacorrente na praia Brava no modo não-estacionário. Esta característica pode estar relacionada com o parâmetro adimensional de escala do embaiamento ( $\delta'$ ) calculado para a praia Brava e Ingleses na [Figura 29](#). Ondas de E propagam sentido a praia Brava sem enfrentar obstáculos, chegam normais à costa e perdem pouca energia. Em cenários extremos a altura de ondas de E no interior da enseada é de 2,3 m. Relacionando este valor de altura de ondas com o embaiamento (Equação 3.4), a praia Brava encontra-se na faixa de  $\delta'$  próxima a 19, migrando de uma circulação transicional para celular, coerente com o surgimento da megacorrente no meio da praia. A corrente neste cenário possui alta velocidade e remobiliza sedimentos para fora da zona de surfe. No modo estacionário é possível observar esta corrente, porém não atinge velocidades superiores a 1 m/s como no modo não-estacionário.

Em Palm Beach na Austrália megacorrentes foram observadas em experimentos conduzidos por [Short \(1985\)](#) em condições de ondas de direção E. Ao apresentar

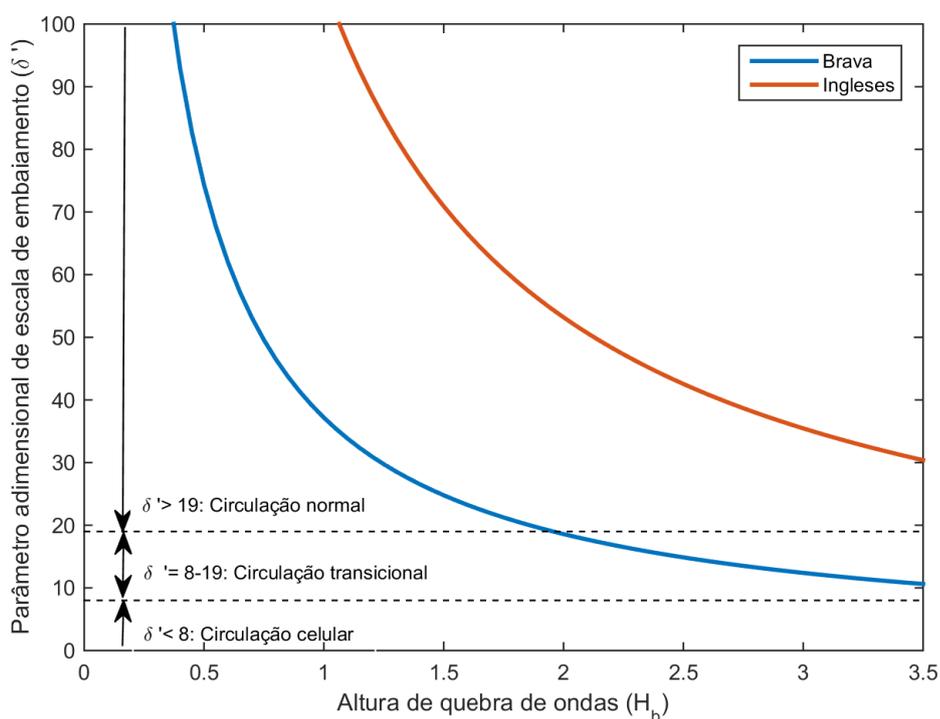


Figura 29 – Parâmetro adimensional de escala do embaçamento de Short e Masselink (1999) para as praias Brava e Ingleses.

uma topografia caracterizada como banco e corrente transversal, assim como a Brava, houve a formação de uma megacorrente dominante na praia com velocidades de até 2 m/s, que apesar de persistir forte e unidirecional, alternadamente se fortalecia e enfraquecia em frequências de infragravidade (WRIGHT; SHORT, 1984). Em cenários extremos de SE a posição da megacorrente formada ao norte da praia Brava também se assemelha com a descrita em Curl Curl Beach (Figura 43).

Apesar do parâmetro adimensional de escala do embaçamento de Short (1999) apresentar limitações, por não levar em consideração o ângulo das ondas e a curvatura da praia (AB RAZAK, 2015), neste estudo foi possível identificar tendência a circulação celular com base em sua fórmula. Castelle e Coco (2012) afirmam que a fórmula de Short (1999) superestima a circulação celular e propuseram uma nova fórmula que leva em consideração o ângulo de incidência e a curvatura da praia. Um maior aprofundamento do estudo dos parâmetros de escala do embaçamento é necessário, não sendo realizado aqui por fugir do escopo deste trabalho.

O padrão de circulação celular pode ser também observado com os derivadores virtuais (Figura 38). Ab Razak (2015) encontrou o mesmo padrão ao simular o XB em ambos os modos em uma praia de enseada idealizada com comprimento de 1500m. Em cenários de direção de ondas mais oblíquas à costa tendem a acompanhar a corrente longitudinal e escapar da enseada nas extremidades dos promontórios. Em direções

normais acompanham o padrão circular das correntes. De forma geral, derivadores tendem a escapar mais rapidamente das enseadas no modo não-estacionário em todos os casos.

Ao mesmo tempo que o parâmetros de escala do embaiamento podem auxiliar na explicação da formação de correntes de retorno, o fluxo e comportamento das correntes pode ser decomposto em diferentes bandas de frequência: infragravidade, baixíssima frequência, em uma média baseada no sistema de corrente de retorno e de ondas e por fim, em uma modulação associada com as variações no nível d'água causadas pelas marés (MACMAHAN; THORNTON; RENIERS, 2006). Pulsações de correntes de retorno na banda de infragravidade aumentam a velocidade máxima instantânea da corrente de retorno para mais de 1 m/s. Isto foi confirmado em um experimento de campo realizado no trabalho de MacMahan et al. (2004), em que é correlacionado com intervalo de confiança de 95% a presença de ondas de infragravidade estacionárias no sentido transversal da praia com a velocidade das correntes. Com base na literatura é possível supor que as diferenças de velocidades das correntes entre os modos do XB pode ser explicada pela geração de ondas IG, que são consideradas no modo não-estacionário.

A maior intensidade da circulação na zona de surfe causada pela presença das ondas IG no modo não-estacionário aumentam o transporte transversal, disponibilizando maior quantidade de sedimentos para ser transportado longitudinalmente entre as praias. Como o modo não-estacionário representou melhor o transporte quando comparado com a armadilha de sedimentos, pode-se inferir que é importante levar em consideração ondas IG no cálculo do volume de sedimentos a serem transpostos entre as praias Brava e Ingleses, tanto em cenários médios quanto extremos.

## 7 Conclusão

A influência das ondas de infragravidade na transposição de sedimentos entre a praia Brava e Ingleses foi investigada, comparando a modelagem do processo com Xbeach no modo estacionário e não-estacionário, que inclui a forçante de grupos de ondas e geração de ondas IG. Apesar de não ter se chegado a um excelente nível de calibração de ondas, aplicando o modelo XB no modo não-estacionário obteve-se uma melhor calibração do transporte de sedimentos, quando comparado com o D3D e o XB no modo estacionário. Verificou-se também intensificação das correntes na zona de surfe e o transporte de sedimentos de uma ordem de magnitude maior no modo não-estacionário tanto no período de calibração quanto em todos cenários simulados. A utilização do XB em praias intermediárias como Brava e Ingleses no modo não-estacionário se mostrou relevante também em eventos médios, nos quais a presença de ondas IG não são tão esperadas quanto em cenários extremos. Quando o foco do estudo é em eventos específicos e não na representação média do transporte, a modelagem com ondas IG pode causar diferenças significativas na representação das correntes na zona de surfe e na quantificação do transporte de sedimentos em praias de enseada.

## 8 Considerações Finais e trabalhos futuros

Neste trabalho não foi levado em consideração os ventos e marés na modelagem do transporte de sedimento, como também não foi calibradas as correntes. Apesar da bibliografia apontar baixo impacto das marés no transporte de sedimentos na região, elas podem amplificar a atuação das ondas IG, principalmente durante a preamar, momento em que ondas IG podem ter maior alcance na porção subaérea das praias. Testes modificando parâmetros de ondas, transporte de sedimento e de morfologia poderiam ser aplicados para melhorar a performance do modelo, porém devido ao tempo computacional gasto em cada simulação com o XB e carência de dados, não foi possível realizá-los. Uma avaliação mais detalhada das mudanças morfológicas e de batimetria em cada cenário é também necessária para melhor compreensão da formação de correntes de retorno e disponibilização de sedimentos para *bypassing* nas praias. Na região há também a presença de dois campos de dunas que devem influenciar na disponibilização de sedimento para transposição, com os avanços computacionais e as expectativas de desenvolvimento do modelo XB podem ser incorporados e representados no futuro.

# Referências

AB RAZAK, M. S. *Natural Headland Sand Bypassing*. 188 p. Tese (Doutorado) — Delft University of Technology, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 19, 25, 31, 32 e 70.

ARAÚJO, C. E. S. et al. Wave regime characteristics of southern brazilian coast. In: 6° INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, 2003, Sri Lanka. *Developing Countries, COPEDEC*. Sri Lanka, 2003. p. 15. Citado na página 35.

BAKKER, A. T. M. de et al. Cross-shore sand transport by infragravity waves as a function of beach steepness. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 121, n. 10, p. 1786–1799, 2016. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016JF003878>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 30 e 69.

BERTIN, X. et al. Infragravity wave: From mechanisms to impacts. *Earth-Science Review*, v. 42, n. 15, p. 25, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 19, 25, 26, 27 e 30.

BIJKER, E. W. Some considerations about scales for coastal models with movable bed. 1967. Citado na página 54.

BIJKER, E. W. Longshore transport computations. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, ASCE, v. 97, n. 4, p. 687–701, 1971. Citado na página 54.

BOEYINGA, J. et al. The effects of a bypass dunefield on the stability of a headland bay beach: A case study. *Coastal Engineering*, v. 57, n. 2, p. 152 – 159, 2010. ISSN 0378-3839. Hydrodynamics and Applications of Headland-Bay Beaches. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383909001409>. Citado na página 38.

BOLLE, A. et al. Application and validation of xbeach for three different field sites. In: 32ND CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 2010, Shanghai. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering; No 32 (2010)*. Shangai, 2011. v. 1, p. 13. Citado na página 34.

BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. A third-generation wave model for coastal regions, part i, model description and validation. *J. Geophys. Res.*, v. 104, p. 7649–7656, 01 1999. Citado na página 33.

CASTELLE, B.; COCO, G. The morphodynamics of rip channels on embayed beaches. *Continental Shelf Research*, Elsevier, v. 43, p. 10–23, 2012. Citado na página 70.

DALINGHAUS, C. *Análise da Estabilidade da Forma em Planta e Perfil nas Praias da Barra da Lagoa, Moçambique e Ingleses, Florianópolis - SC : Aplicações em Análise de Perigos Costeiros*. 200 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. [S.l.]: World Scientific Publishing Company, 1991. v. 2. Citado na página 22.

DEIGAARD, R. et al. *Mechanics of coastal sediment transport*. [S.l.]: World scientific publishing company, 1992. v. 3. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

DELFT3D-FLOW, Version: 3.15: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. [S.l.]: Deltares, 2019. Citado na página 32.

DELFT3D-WAVE, Version: 3.05.34160: Simulation of short-crested waves with swan. [S.l.]: Deltares, 2014. Citado na página 33.

EPAGRI. *Atlas Climatológico*. 2002. Disponível em: <http://www.ciram.epagri.sc.gov.br>. Citado na página 35.

FARACO, K. R. *Comportamento Morfológico e Sedimentológico da Praia dos Ingleses, Ilha de Santa Catarina, SC, Durante o Período de 1996 a 2001*. 119 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Citado na página 38.

FEMAR. *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*. 2000. Disponível em: [www.fundacaofemar.org.br](http://www.fundacaofemar.org.br). Citado na página 35.

HOLTHUIJSEN, L. H. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 387 p. ISBN 9780511270215. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23, 24 e 48.

HORN FILHO, N. O. Granulometria das praias arenosas da Ilha de Santa Catarina, SC. *Gravel*, v. 4, p. 1–21, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

HORN FILHO, N. O.; LEAL, P. C.; OLIVEIRA, J. S. de. *Geologia das 117 praias arenosas da Ilha de Santa Catarina, Brasil*. Florianópolis: Edições do Bosque, 2017. 220 p. ISBN 9788560501328. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 38.

HSU, J. R. C.; EVANS, C. Parabolic Bay Shapes and Applications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v. 87, n. 4, p. 557–570, 1989. ISSN 1753-7789. Disponível em: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/iicep.1989.3778>. Nenhuma citação no texto.

KAMPHUIS, J. W. *Introduction to coastal engineering and management*. [S.l.]: World Scientific, 2010. v. 30. Citado na página 41.

KLEIN, A. H. et al. Metodologia para quantificação de perigos costeiros e projeção de linhas de costa futuras como subsídio para estudos de adaptação das zonas costeiras: litoral norte da ilha de santa catarina e entorno. *Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável*, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 41.

KLEIN, A. H. F.; SHORT, A. D.; BONETTI, J. Santa catarina beach systems. In: \_\_\_\_\_. *Brazilian Beach Systems*. [S.l.]: Springer, 2016. p. 465–506. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 38.

KOMAR, P. *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall, 1998. ISBN 9780137549382. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=DyJgQgAACAAJ>. Citado na página 24.

- LESSER, G. *An approach to medium-term coastal morphological modelling*. 239 p. Tese (Doutorado) — Delft University of Technology, 2009. Citado na página 28.
- LONGUET-HIGGINS, M. S.; STEWART, R. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats'. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 13, n. 4, p. 481–504, 1962. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 26.
- MACMAHAN, J. H. et al. Infragravity rip current pulsations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 109, n. C1, 2004. Citado na página 71.
- MACMAHAN, J. H.; THORNTON, E. B.; RENIERS, A. J. Rip current review. *Coastal Engineering*, Elsevier, v. 53, n. 2-3, p. 191–208, 2006. Citado na página 71.
- MONTEIRO, M. A. *Avaliação das condições atmosféricas de Florianópolis para controle da Qualidade do ar*. 181 p. — Universidade Federal de Santa Catarina, 1992. Citado na página 35.
- MUNK, W. H. Surf beats. *Eos: Earth and Space Science News*, v. 30, p. 849–854, 1949. Citado 3 vezes nas páginas 19, 25 e 26.
- NEDERHOFF, K. *XBeach*: Xbeach documentation, release xbeach v1.23.5527 xbeachx final. [S.l.], 2018. 211 p. Disponível em: ([https://oss.deltares.nl/documents/48999/2022076/Documentation\\_XBeach-v1.23.5527-XBeachX\\_FINAL.pdf/d366edea-db7c-1c2e-4295-a7222c8970bc](https://oss.deltares.nl/documents/48999/2022076/Documentation_XBeach-v1.23.5527-XBeachX_FINAL.pdf/d366edea-db7c-1c2e-4295-a7222c8970bc)). Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- PACHECO, F. C. *Comportamento morfossedimentar do arco praial e evolução do uso do solo na Praia Brava, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil*. 90 p. — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Citado na página 29.
- PEDLOSKY, J. *Waves in the ocean and atmosphere: introduction to wave dynamics*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2003. Citado na página 22.
- RIJN, L. C. V. Sediment transport, part iii: bed forms and alluvial roughness. *Journal of hydraulic engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 110, n. 12, p. 1733–1754, 1984. Citado na página 53.
- RIJN, L. C. V. Unified view of sediment transport by currents and waves: part i and ii. *Journal of hydraulic engineering*, American Society of Civil Engineers, p. 649–667, 2007. Citado na página 53.
- RIJN, L. C. V. et al. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. [S.l.]: Aqua publications Amsterdam, 1993. v. 1006. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 53.
- ROELVINK, D.; RENIERS, A. *A guide to modeling coastal morphology*. [S.l.]: World Scientific, 2012. Citado na página 23.
- ROELVINK, D. et al. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal engineering*, Elsevier, v. 56, n. 11-12, p. 1133–1152, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 33.
- SATO, O. *Ondas e Marés*. 2010. Disponível em: ([ftp://io.usp.br/los/IOF1224/ondas\\_100623.pdf](ftp://io.usp.br/los/IOF1224/ondas_100623.pdf)). Citado na página 24.

SCHWEITZER, A. et al. *Acompanhamento da Evolução Morfodinâmica da Praia Brava, Ilha de Santa Catarina, Através do Monitoramento de Perfis Transversais*. Florianópolis: Anais da 58ª Reunião Anual da SBPC, 2006. Citado na página 37.

SERAFIM, M. B.; BONETTI, J. Vulnerabilidade das praias do Estado de Santa Catarina a eventos de erosão e inundação costeira: proposta metodológica baseada em um índice multicritério. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 8, n. 2, p. 36–54, 2017. ISSN 2176-6142. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/abequa/article/view/47281>. Citado na página 35.

SHORT, A. Rip-current type, spacing and persistence, narrabeen beach, australia. *Marine geology*, Elsevier, v. 65, n. 1-2, p. 47–71, 1985. Citado 3 vezes nas páginas 13, 69 e 96.

SHORT, A. D. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. [S.l.], 1999. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 70.

SHORT, A. D.; MASSELINK, G. Embayed and structurally controlled beaches. In: \_\_\_\_\_. *Handbooks of Beach and Shoreface Hydrodynamics*. 2. ed. Nova Iorque: John Wiley and Sons, 1999. p. 230–249. Citado 8 vezes nas páginas 9, 12, 19, 28, 29, 31, 32 e 70.

SOULSBY, R. *Dynamics of marine sands* thomas telford publications. London, UK, 1997. Citado na página 53.

TAIANI, L. R. P. M. *Transporte de sedimentos não-coesivos na zona de surfe*. 69 p. — Universidade do Vale do Itajaí, 2010. Citado na página 28.

THE OPEN UNIVERSITY. *Waves, tides and shallow-water process*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. 227 p. ISBN 9780750642811. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 24.

TOFFOLI, A.; BITNER-GREGERSEN, E. M. Types of Ocean Surface Waves, Wave Classification. *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, p. 1–8, 2017. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118476406.emoe077>. Citado na página 23.

TUCKER, M. J. Surf Beats: Sea Waves of 1 to 5 min. period. *Royal Society*, v. 202, n. 1071, p. 565–573, 1950. Disponível em: [www.jstor.org/stable/98550](http://www.jstor.org/stable/98550). Citado 3 vezes nas páginas 19, 25 e 26.

VAN DONGEREN, A. et al. Modelling infragravity waves and currents across a fringing coral reef. *Coastal Engineering Proceedings*, v. 1, n. 33, p. 1–10, dec 2012. ISSN 2156-1028. Disponível em: <http://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/6882>. Citado na página 34.

VIEIRA DA SILVA, G. *Transposição de sedimentos nos promontórios da costa norte da Ilha de Santa Catarina*. 114 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. Citado 6 vezes nas páginas 19, 20, 39, 41, 44 e 47.

VIEIRA DA SILVA, G. et al. Shoreline Change Analysis and Insight into the Sediment Transport Path along Santa Catarina Island North Shore, Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 320, n. 1999, p. 863–874, 2016. ISSN 07490208. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

VIEIRA DA SILVA, G. et al. Headland sand bypassing - Quantification of net sediment transport in embayed beaches, Santa Catarina Island North Shore, Southern Brazil. *Marine Geology*, v. 379, n. May, p. 13–27, 2016. ISSN 00253227. Citado 8 vezes nas páginas 10, 38, 41, 42, 45, 52, 53 e 69.

VIEIRA DA SILVA, G. et al. The influence of wave-, wind- and tide-forced currents on headland sand bypassing – Study case: Santa Catarina Island north shore, Brazil. *Geomorphology*, Elsevier B.V., v. 312, p. 1–11, 2018. ISSN 0169555X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.026>. Citado 8 vezes nas páginas 9, 39, 41, 42, 48, 54, 57 e 69.

VRIES, J. Van Thiel de. *Dune erosion during storm surges*. Tese (Doutorado) — Delft University of Technology, 2009. Citado na página 53.

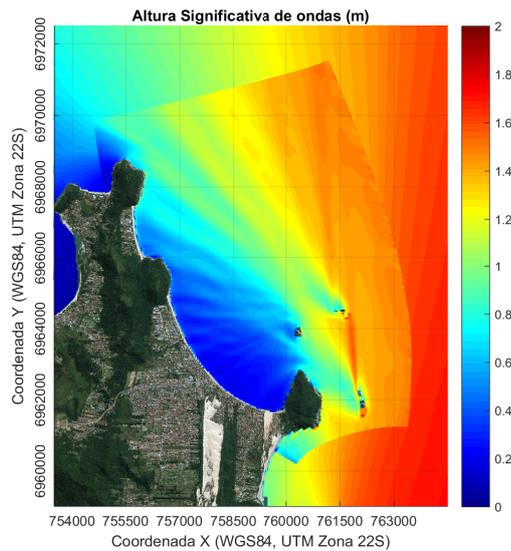
WRIGHT, L.; COWELL, P. J.; COFFEY, F. *Nearshore oceanography and morphodynamics of the Broken Bay-Palm Beach Region, NSW: implications for offshore dredging*. [S.l.]: Coastal Studies Unit, Department of Geography, University of Sydney, 1980. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 96.

WRIGHT, L. D.; SHORT, A. D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine geology*, Elsevier, v. 56, n. 1-4, p. 93–118, 1984. Citado 4 vezes nas páginas 13, 28, 70 e 97.

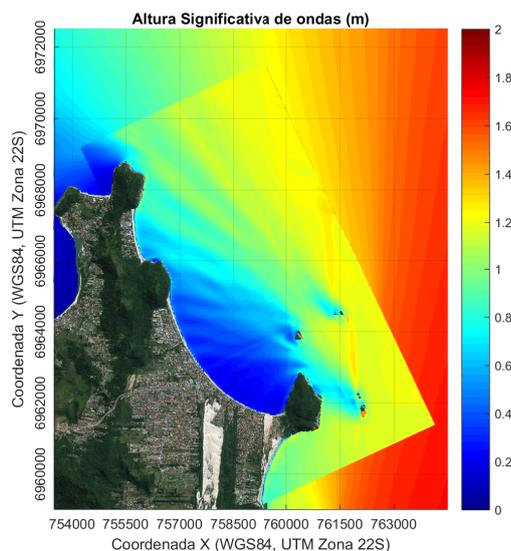
YOUNG, I. R. *Wind generated ocean waves*. [S.l.]: Elsevier, 1999. v. 2. Citado na página 23.

# Apêndices

# APÊNDICE A – Grades testadas na calibração



(a) Grade curvilínea seguindo a orientação da costa até a isobáta de 30m.



(b) Grade retangular seguindo a direção da costa até a isobáta de 35m.

Figura 30 – Propagação de ondas com as grades testadas na calibração. Notar na área exterior às grades o resultado da propagação com o modelo D3D.

# APÊNDICE B – Parâmetros do modelo no modo estacionário

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Time Frame Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

tstop = 432000

CFL = 0.7

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Domain Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

gridform = delft3d

xyfile = ret408.grd

depfile = ret408feitcorr.dep

thetamin = 0

thetamax = 180

dtheta = 15

thetanaut = 1

posdwn = 1

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Processes Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

swave = 1

lwave = 0

flow = 1

sedtrans = 1

morphology = 1

nonh = 0

gwflow = 0

q3d = 0

wind = 0

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Tide/Surge Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

tideloc = 0

zs0 = 0.6

```
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Wave Boundaries Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
bcfile = bndxb1.txt
instat = stat-table
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Wave Numerics Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
wavint = 120
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Wave Current Interaction xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx wci = 0
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Flow Boundaries Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
front = abs-2d
back = abs-2d
left = neumann
right = neumann
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Bed Composition Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
bedfriction = chezy
bedfriccoef = 65
D50 = 0.00022
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Drifters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
drifterfile = drifft1.txt
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Morphology Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
struct = 1
ne-layer = nelayer-msl17.dep
morstart = 86400
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Output Configuration xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
outputformat = fortran
tstart = 0
tintg = 3600
tintm = 3600
tintp = 3600
nglobalvar = 15
H
zs
```

zb

u

v

thetamean

sedero

Susg

Svsg

Subg

Svbg

taubx

tauby

Sutot

Svtot

nmeanvar = 9

H

thetamean

zs

Susg

Svsg

Subg

Svbg

Sutot

Svtot

# APÊNDICE C – Parâmetros do modelo no modo não estacionário

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Time Frame Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

tstop = 432000

CFL = 0.7

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Domain Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

gridform = delft3d

xyfile = ret408.grd

depfile = ret408feitcorr.dep

thetamin = 0

thetamax = 180

dtheta = 15

thetanaut = 1

posdwn = 1

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Processes Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

swave = 1

lwave = 1

flow = 1

sedtrans = 1

morphology = 1

nonh = 0

gwflow = 0

q3d = 0

wind = 0

xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Tide/Surge Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

tideloc = 0

zs0 = 0.6

```
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Wave Boundaries Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
bcfile = bndxb1.txt
instat = jons-table
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Wave Current Interaction xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
wci = 0
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Flow Boundaries Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
front = abs-2d
back = abs-2d
left = neumann
right = neumann
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Bed Composition Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
bedfriction = chezy
bedfriccoef = 65
D50 = 0.00022
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Drifters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
drifterfile = driftt1.txt
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Morphology Parameters xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
struct = 1
ne-layer = nelayer-msl17.dep
morstart = 86400
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx Output Configuration xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
outputformat = fortran
tstart = 0
tintg = 3600
tintm = 3600
tintp = 3600
nglobalvar = 15
H
zs
zb
```

u

v

thetamean

sedero

Susg

Svsg

Subg

Svbg

taubx

tauby

Sutot

Svtot

nmeanvar = 9

H

thetamean zs

Susg

Svsg

Subg

Svbg

Sutot

Svtot

# APÊNDICE D – *Scatter plot* das séries de ondas simuladas no XB

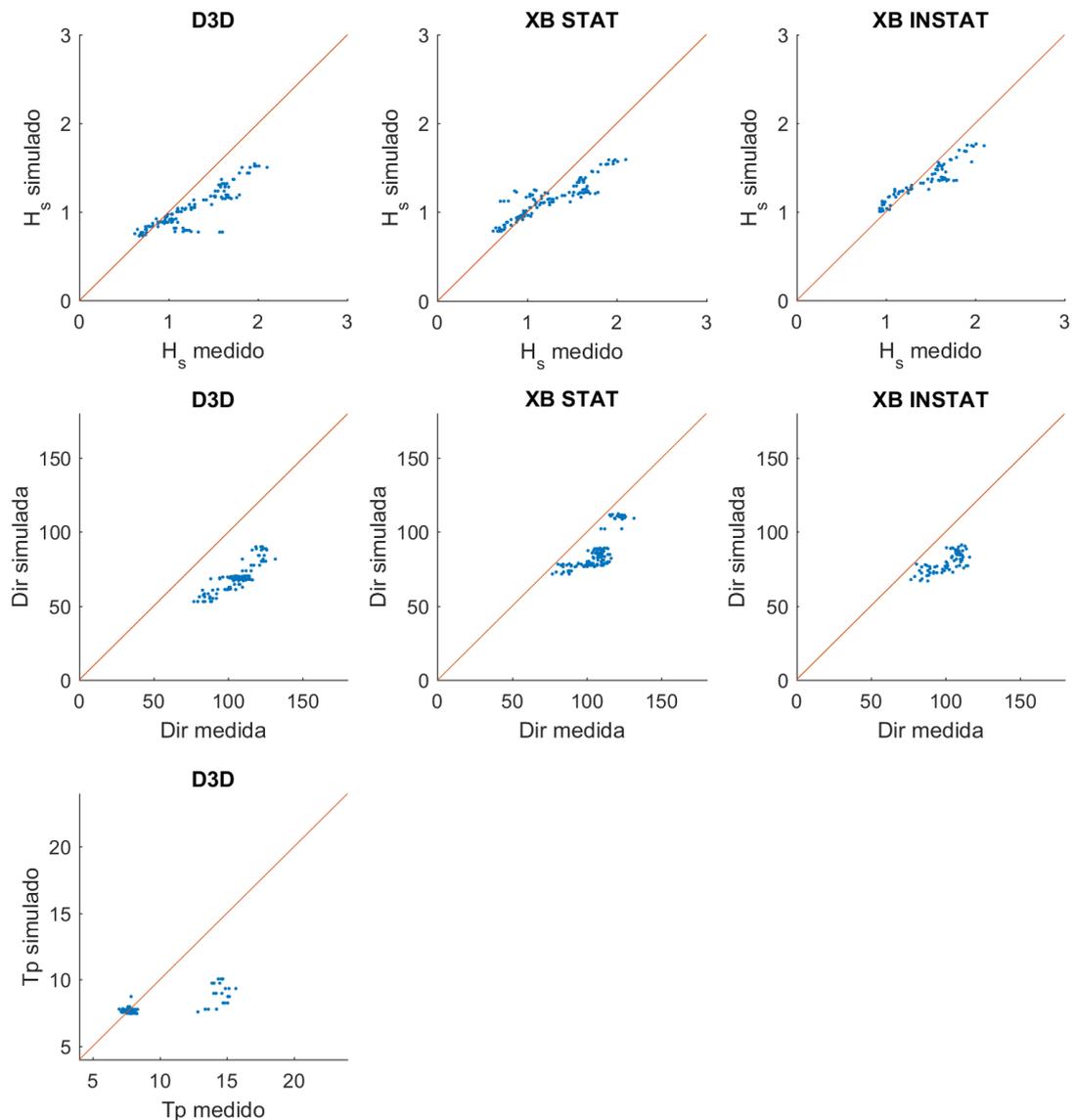


Figura 31 – *Scatter plot* da série temporal da calibração de ondas no período de 26 de janeiro de 2014 a 06 de fevereiro de 2014.  $H_s$ : altura significativa,  $T_p$ : Direção de pico, Dir: Direção média.

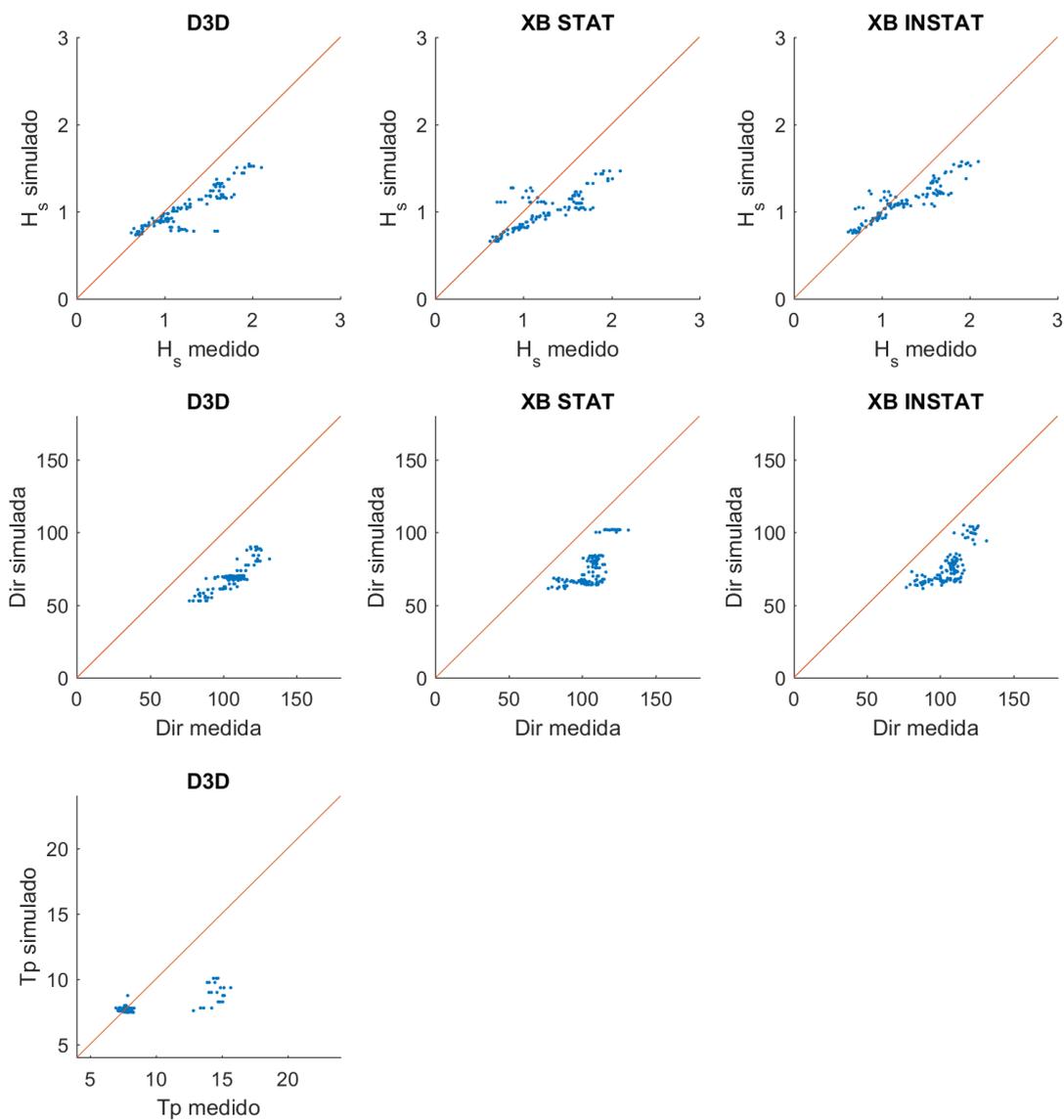


Figura 32 – Scatter plot da série temporal da calibração de ondas no período de 17 de agosto de 2014 a 22 de agosto de 2014. Hs: altura significativa, Tp: Direção de pico, Dir: Direção média.

# APÊNDICE E – Série temporal do transporte de sedimentos em HS1 e HS2

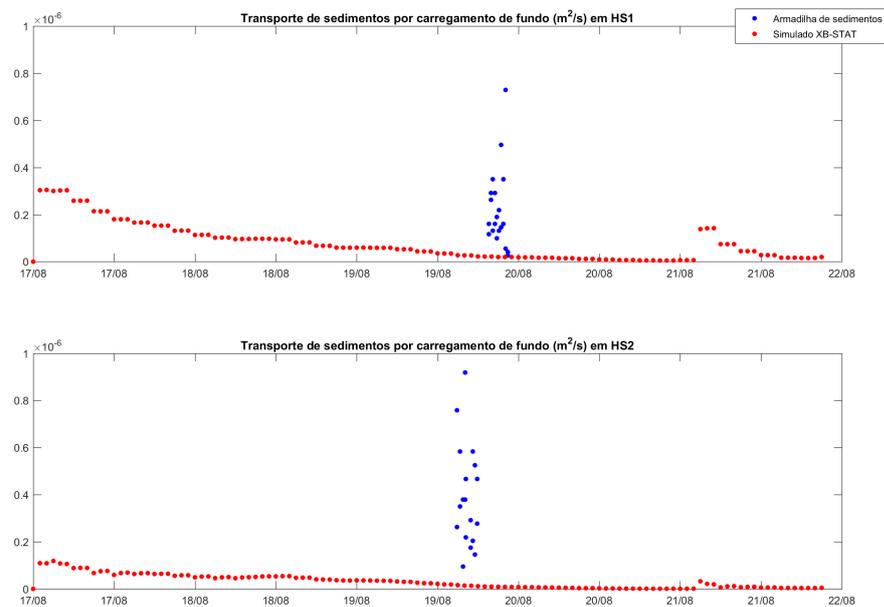


Figura 33 – Série temporal do transporte de sedimentos por carregamento de fundo simulado e medido no período entre 17 a 22 de agosto de 2019 no modo estacionário.

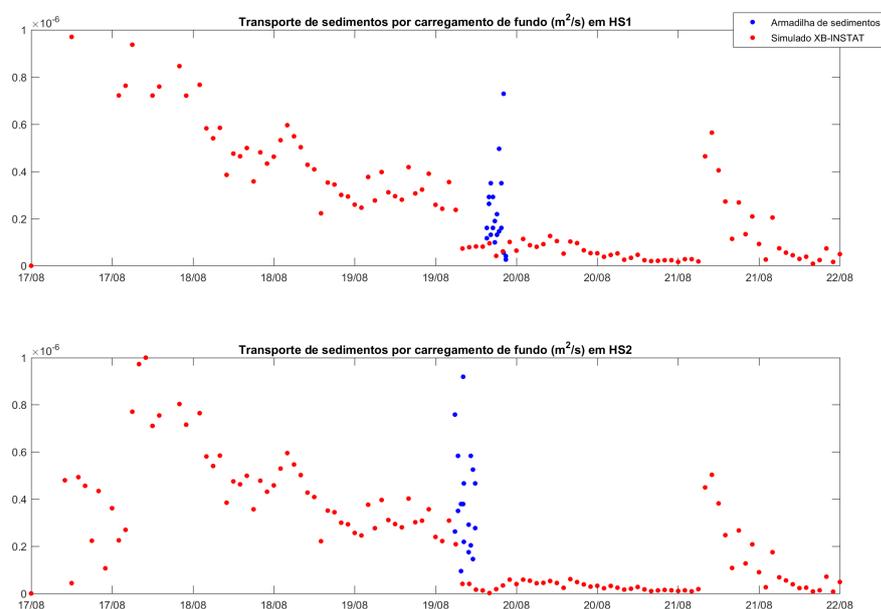


Figura 34 – Série temporal do transporte de sedimentos por carregamento de fundo simulado e medido no período entre 17 a 22 de agosto de 2019 no modo não-estacionário.

# APÊNDICE F – Derivadores

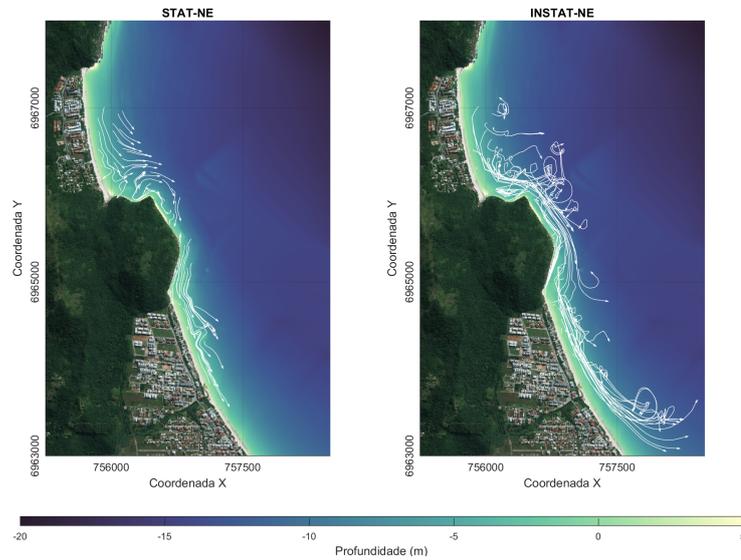


Figura 35 – *Drifters* no cenário médio de NE nos modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

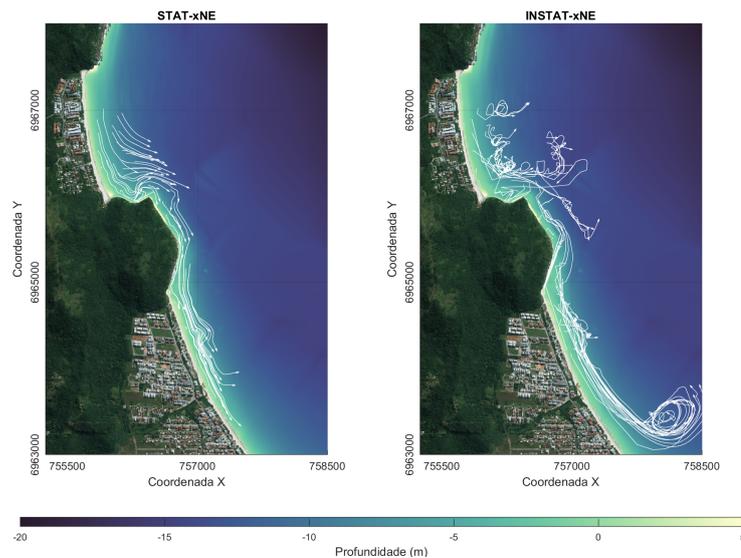


Figura 36 – *Drifters* no cenário extremo de NE no modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

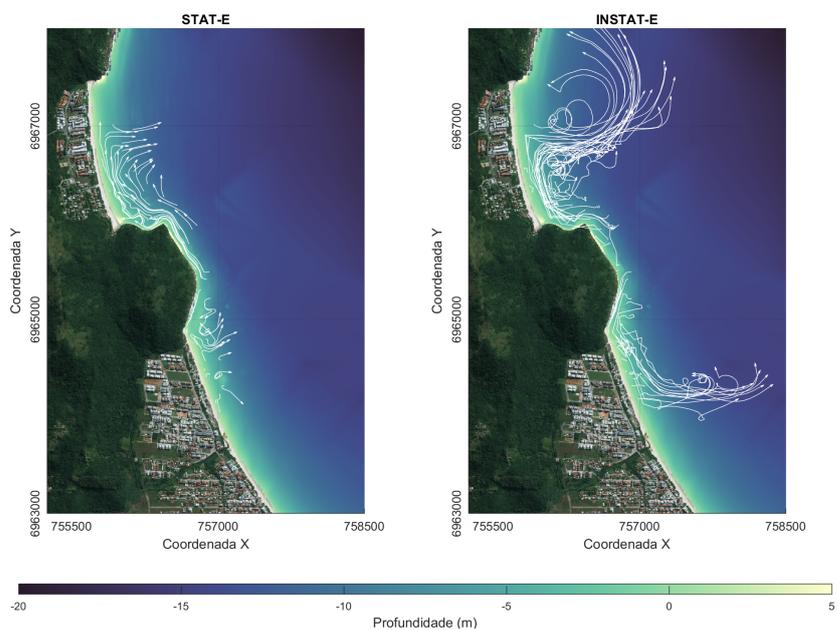


Figura 37 – *Drifters* no cenário médio de E nos modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

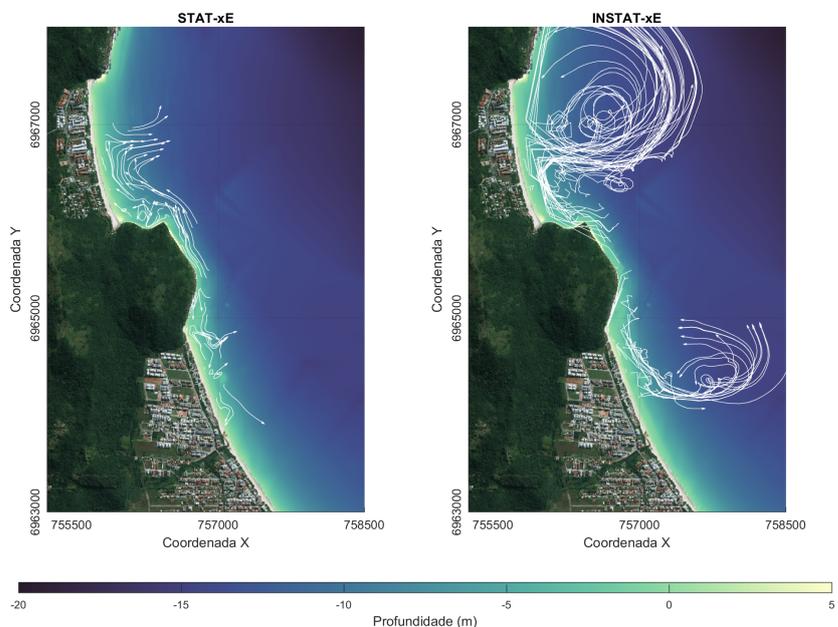


Figura 38 – *Drifters* no cenário extremo de E no modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

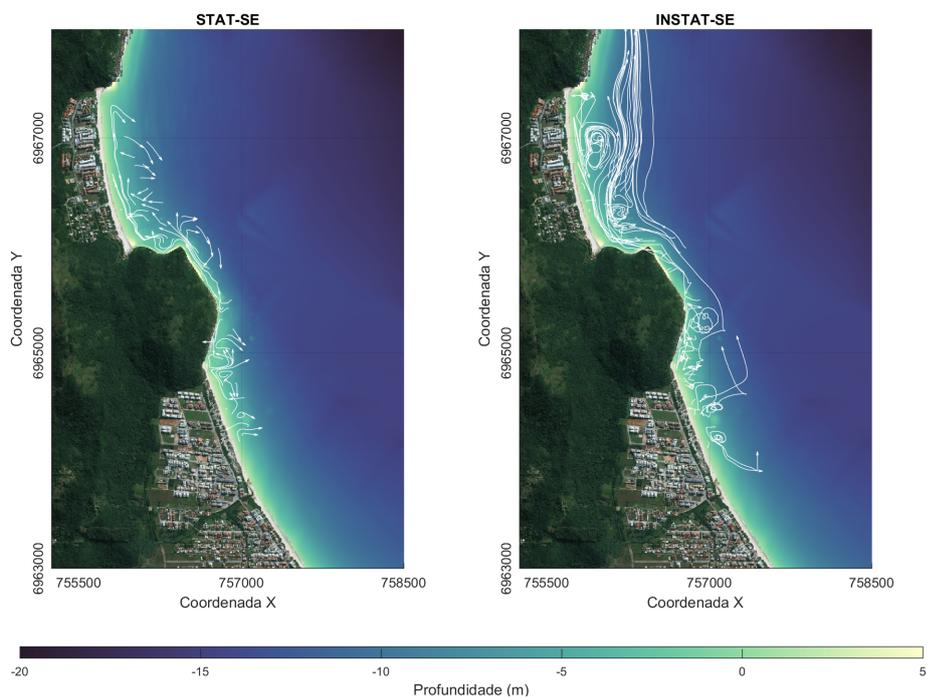


Figura 39 – *Drifters* no cenário médio de SE nos modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

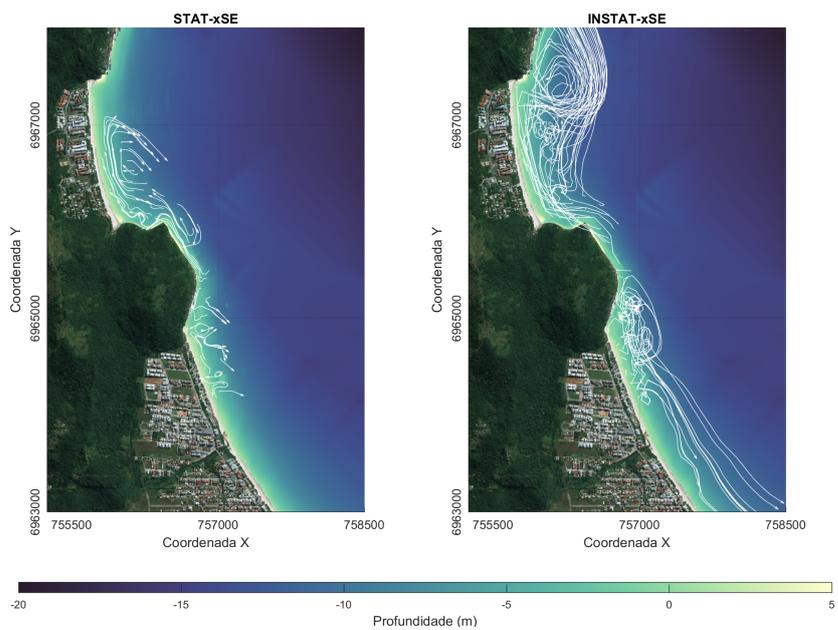


Figura 40 – *Drifters* no cenário extremo de SE no modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

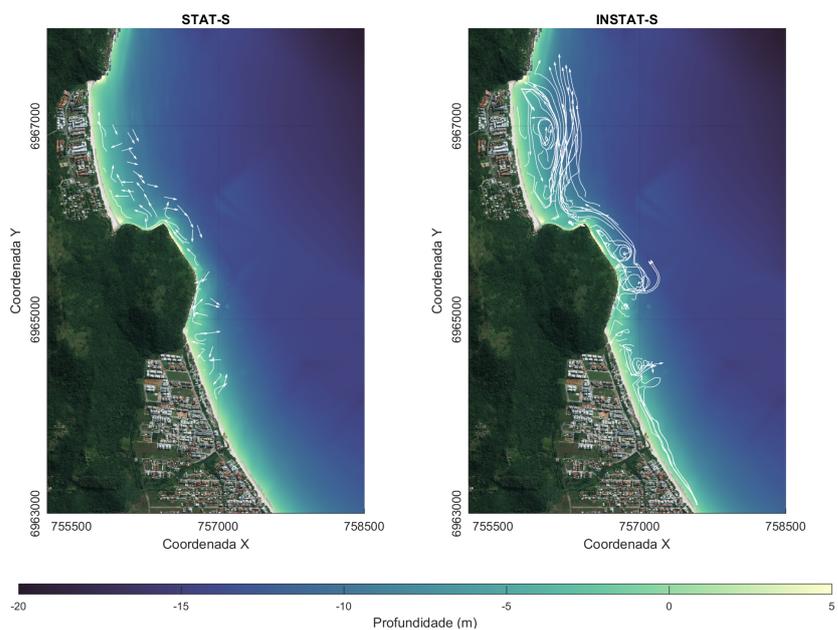


Figura 41 – *Drifters* no cenário médio de S nos modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

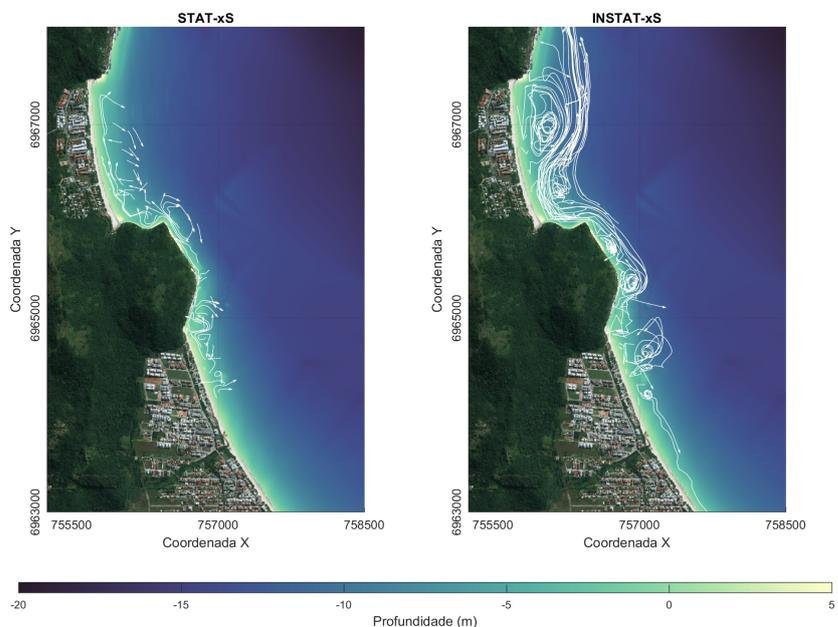


Figura 42 – *Drifters* no cenário extremo de S no modos STAT E INSTAT depois de 2 dias de simulação. Fonte da imagem: ESRI World Imagery. DATUM: WGS84. PROJEÇÃO: UTM 22S.

# Anexos

# ANEXO A – Megacorrentes

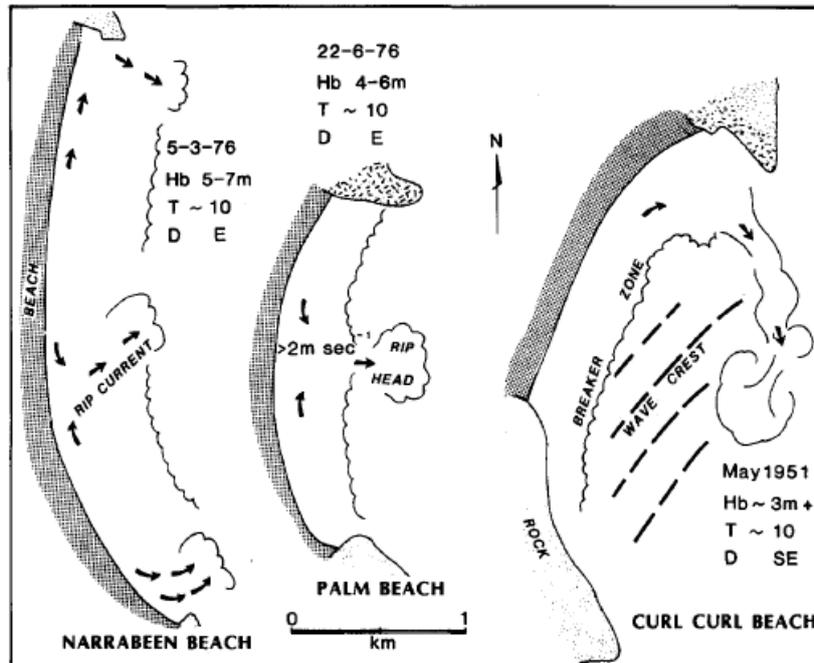


Fig.11. An example of mega rips (large-scale topographically arrested erosion rips) during D' state on three Sydney beaches. Source: Narrabeen from field data; Palm Beach from Wright et al. (1980); Curl Curl from aerial photograph.

Figura 43 – Exemplo de megacorrentes (erosão em grande escala interrompida topograficamente) em três praias de Sydney. Fonte: Narrabeen de dados de campo; Palm Beach de [Wright, Cowell e Coffey \(1980\)](#); Curl Curl de imagens aéreas. Extraído de: [Short \(1985\)](#).

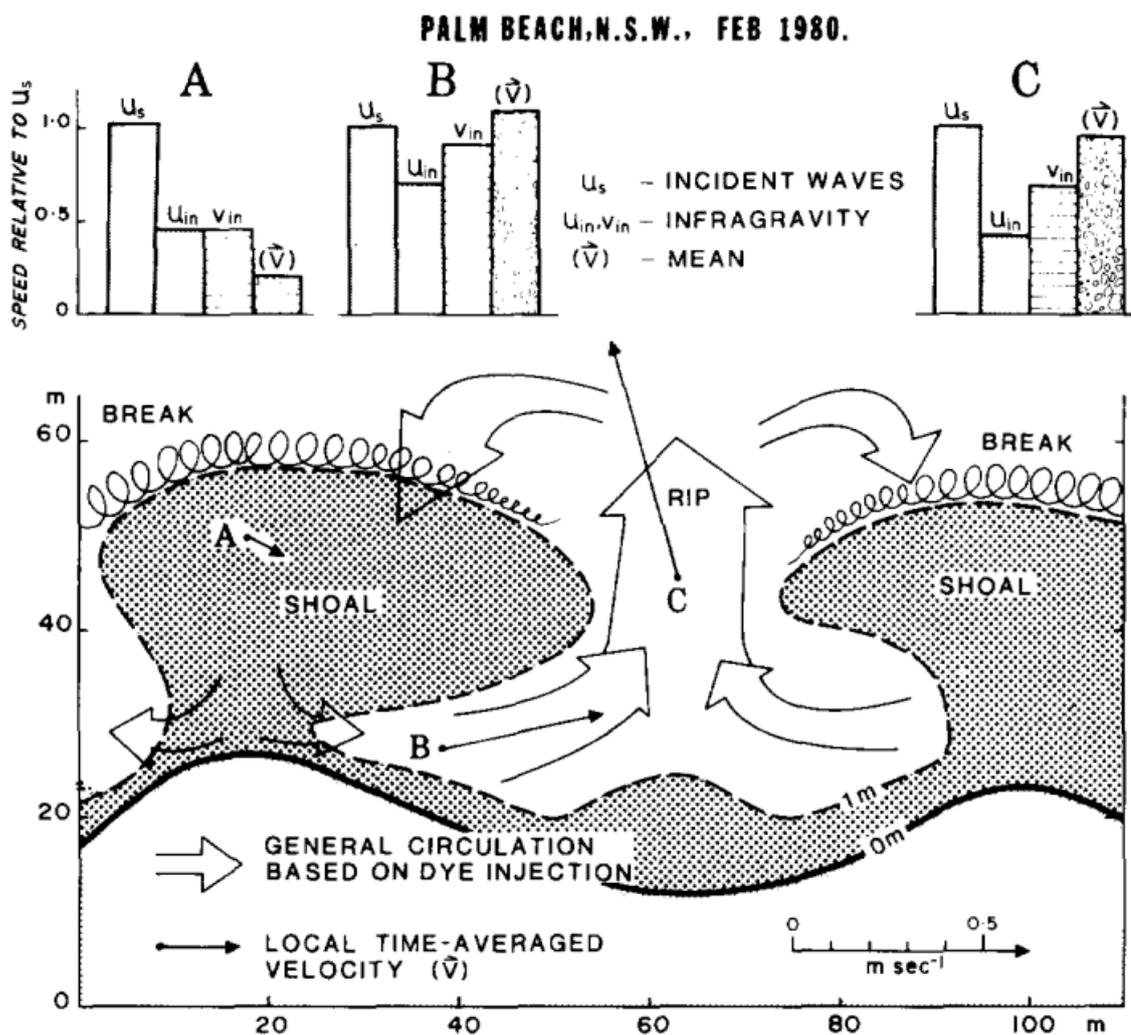


Figura 44 – Assinatura do processo associado com a topografia de banco e corrente transversal (Palm Beach, N.S.W, Fevereiro de 1980). Note as correntes fortes e as correntes alimentadoras. Extraído de: [Wright e Short \(1984\)](#).