

PEDRO OCTAVIO FOLONI SOUSA

Fatores controladores na geração de correntes de retorno: um estudo de caso para o litoral Norte de São Paulo

São Paulo
2022

PEDRO OCTAVIO FOLONI SOUSA

Fatores controladores na geração de correntes de retorno: um estudo de caso para o litoral Norte de São Paulo

Versão corrigida

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia

Área de concentração: Oceanografia Geológica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Siegle

São Paulo
2022

PEDRO OCTAVIO FOLONI SOUSA, Fatores controladores na geração de correntes de retorno: um estudo de caso para o litoral Norte de São Paulo. Dissertação (Mestrado) apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Geológica.

Aprovado em: 04/07/2022.

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A todos os colegas da turma XIII, em especial a Douglas Paschoaletti e Cristian Taboada, que me acompanharam de perto nessa jornada.

A todos os colegas do Laboratório de Dinâmica Costeira (LDC IOUSP) em especial ao Prof. Dr. Eduardo Siegle

Aos companheiros da HidroMares e do CHM, que de alguma forma me apoiaram, incentivaram ou ajudaram durante o processo

Em memória de Liege Lins Sousa e Isilda Maria Foloni

RESUMO

PEDRO OCTAVIO FOLONI SOUSA, Fatores controladores na geração de correntes de retorno: um estudo de caso para o litoral Norte de São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Correntes de retorno, Ubatuba, modelagem numérica

O estudo propõe uma visão holística a respeito da problemática apresentada pelas correntes de retorno em quatro praias de Ubatuba, litoral norte de São Paulo. Correntes de retorno são um dos principais perigos aos banhistas nos municípios costeiros em todo o mundo. Este estudo visou melhor compreender a formação e manutenção destes sistemas, tais como sua variabilidade frente às variações nas forçantes externas. Para tal foi empregada a técnica de modelagem numérica. O modelo Delft-3D foi utilizado para produzir diferentes cenários, a fim de relacionar parâmetros descritores de onda como, Altura significativa, Período, Direção de Swell, com o comportamento das correntes.

Observações foram tomadas a partir de análise de satélite e agregadas em mapas de Kernel, para determinar principais zonas de formação em cada uma das praias estudadas. As análises retrataram que os sistemas em questão são fortemente dependentes da batimetria e da direção de incidência das ondas, estes parâmetros se mostraram os mais eficientes em estimular o comportamento dos sistemas de retorno. A direção de Swell mais eficiente na geração de sistemas de correntes de retorno nas praias em questão é a direção Sudeste, seguida pela direção Leste e Sul. A altura de onda atua tanto de forma construtiva como destrutiva durante a evolução destes fluxos. O período de onda se mostrou o parâmetro menos relevante no comportamento dos sistemas. As análises mostraram a sua atuação como agente transformador dos sistemas, criando fusões e causando deflexão nas correntes de retorno, sem influenciar na geração de novos sistemas. Através da análise de sensibilidade conduzida com os diferentes experimentos numéricos, é possível identificar os principais fatores que controlam a ocorrência e padrão das correntes de retorno na região de interesse, identificando fatores que podem ser monitorados para o uso seguro do ambiente.

ABSTRACT

PEDRO OCTAVIO FOLONI SOUSA, **Controlling factors in the generation of rip currents: a case study for the Northern coast of São Paulo**. Dissertação (Mestrado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

RIP currents, Ubatuba, Numerical modelling

The study proposes a holistic view of the problem presented by rip currents on four beaches in Ubatuba, northern coast of São Paulo State. Rip currents are one of the main hazards to bathers in coastal municipalities around the world. This study aimed to better understand the formation and maintenance of these systems, such as their variability in the face of variations in external forcing. For this purpose, the numerical modeling technique was used. The Delft-3D model was used to produce different scenarios, in order to relate wave descriptor parameters such as Significant Height, Period, Swell Direction, with the behavior of the currents. Observations were taken from satellite analysis and aggregated into Kernel maps to determine main formation zones on each of the studied beaches. The analyzes portrayed that the systems in question are strongly dependent on the bathymetry and the direction of wave incidence, these parameters proved to be the most efficient in stimulating the behavior of the return systems. The most efficient Swell direction in generating rip current systems on the beaches in question is the Southeast direction, followed by the East and South directions. The wave height acts both constructively and destructively during the evolution of these flows. The wave period proved to be the least relevant parameter in the behavior of the systems. Wave period acts as a transforming agent of the currents creating fusions and causing its deflection, without generating new systems. Through the sensitivity analysis with the different numerical experiments, it is possible to identify the main factors that control the occurrence and patterns of rip currents, identifying processes that may be monitored for beach safety.

Lista de figuras:

Figura 1 Esquema representativo de um sistema de correntes de retorno, reforçando a ideia de interação entre forçantes hidrodinâmicas e morfologia, evidenciando a interdependência e ajuste dinâmico em um ambiente praiar. Tradução dos termos de cima para baixo: Força de onda, quebra de onda, maré, morfologia, fluxo de corrente de retorno, sistema de corrente de retorno, Tipo de corrente de retorno Imagem adaptada de (B. Castelle et al. 20)	3
Figura 2 Esboço esquemático de um sistema de retorno idealizado. Sendo FEEDER CURRENT correntes de alimentação, RIP CURRENT corrente de retorno e BEACH faixa praiar Adaptado de (Gilbert 1980). 4	4
Figura 3 Mapa de localização da área de estudo em escala local (painel esquerdo), regional (direito superior) e remota (direito inferior). Em destaque, no mapa local, as quatro praias de interesse para o estudo.	7
Figura 4 Imagem extraída do Google Earth, representando individualmente uma das praias, objeto de estudo a Praia das Toninhas.....	7
Figura 5 Imagem extraída do Google Earth, representando a Praia Grande.	8
Figura 6 Imagem extraída do Google Earth, representando a Praia do Tenório.	8
Figura 7 Imagem extraída do Google Earth, representando a Praia Vermelha do Centro.	9
Figura 8 Histograma direcional representativo das características sazonais das ondas incidentes sobre o litoral do estado de São Paulo. Esquerda altura significativa; Direita período de onda. Adaptado de Silva et al. (2014)	11
Figura 9 (a) Representação esquemática de uma corrente hidrodinamicamente controla, episódica com incidência de ondas predominantemente normal a linha de costa. (b) Exemplo de corrente episódica em Zuma, Califórnia. Adaptado de (B. Castelle et al. 2016).	19
Figura 10 (c) Representação esquemática de uma corrente hidrodinamicamente controla, de cisalhamento com incidência de ondas oblíquas a costa, e fortes correntes de alimentação. (d) Exemplo de corrente de cisalhamento em Newport Beach, Califórnia. Adaptado de (Ca	20
Figura 11 (a) Representação esquemática de uma corrente canalizada, com incidência de ondas predominantemente normal a linha de costa. (b) Exemplo de corrente canalizada em Marina, Califórnia. Adaptado de (Castelle et al. 2016).	21
Figura 12 (c) Representação esquemática de uma corrente focada com incidência de ondas normal à costa. (d) Exemplo de corrente de cisalhamento em Blacks Beach, California. Adaptado de (Castelle et al. 2016).	21
Figura 13 (a) Representação esquemática de uma corrente de sombra, com incidência de ondas a sota-vento do obstáculo. (b) Exemplo de corrente canalizada em Ponce inlet Jetty, Florida. Adaptado de (Castelle et al. 2016).....	22
Figura 14 (c) Representação esquemática de uma corrente de deflexão, com incidência de ondas a barlavento do obstáculo. (d) Exemplo de corrente de cisalhamento em Newport Beach, Califórnia. Adaptado de (B. Castelle et al. 2016).....	23
Figura 15 Esquemas e exemplos de correntes embaixadas ou celulares. (a, d) circulação normal com fluxo no centro do embaixamento. (b, e) regime circulatório, com fluxo de retorno em ambas extremidades. (c, f). Adaptado de (Castelle et al. 2016).	24
Figura 16 Fluxograma exemplificando a aplicação dos dados utilizados em cada método empregado no estudo.....	25
Figura 17 Imagem Google Earth, ilustrando zona de ruptura no raio de quebra de onda.	26
Figura 18 Imagem Google Earth. Ilustrando pluma sedimentar na "cabeça" da corrente.....	27
Figura 19 Imagem Google Earth. Ilustrando diferenciação entre região com espuma branda e região de espuma densa.....	27
Figura 20 Imagem Google Earth. Ilustrando a presença de um canal de retorno delimitado por bancos de areia.	28
Figura 21 Imagem Google Earth. Ilustrando presença de RIP nas adjacências de um córrego	28
Figura 22 Imagem ilustrando a linha de costa que compreende as praias analisadas, praias adjacentes, ilhotes e Ilha Anchieta. E a grade externa dos modelos.	31
Figura 23 Imagem ilustrando a linha de costa que compreende as praias analisadas e a grade intermediária dos modelos.....	32
Figura 24 Imagem ilustrando a linha de costa que compreende as praias analisadas e a grade interna dos	

modelos.	33
Figura 25 Histogramas direcionais de altura (esquerda) e período de onda (direita) criados a partir da série climatológica WaveWatch III.....	37
Figura 26 Histogramas direcionais de altura (esquerda) e período de onda (direita) criados a partir dos dados WaveWatch III, para os meses de verão.....	40
Figura 27 Histogramas direcionais de altura (esquerda) e período de onda (direita) criados a partir dos dados WaveWatch III, para os meses de Outono.	41
Figura 28 Histogramas direcionais de altura (esquerda) e período de onda (direita) criados a partir dos dados WaveWatch III, para os meses de Inverno.	44
Figura 29 Histogramas direcionais de altura (esquerda e período de onda (direita) criados a partir dos dados WWIII para os meses de Primavera.	46
Figura 30 Mapa indicativo de zonas de maior probabilidade de ocorrência de correntes de retorno. Praia das Toninhas.....	48
Figura 31 Mapa indicando zonas de maior probabilidade de ocorrência de correntes de retorno. Praia Grande	49
Figura 32 Mapa indicando zonas de maior probabilidade de ocorrência de correntes de retorno. Praia do Tenório	50
Figura 33 Mapa indicando zonas de maior probabilidade de ocorrência de correntes de retorno. Praia Vermelha do Centro.	51
Figura 34 Malha batimétrica, com valores topográficos criados a partir de uma interpolação simples dos dados de batimetria.....	53
Figura 35 Campo vetorial de correntes, resultado do modelo criado a partir do arquivo de batimetria interpolado.....	54
Figura 36 Malha batimétrica, com valores topográficos criados a partir da inserção de valores constantes e iguais a 2 na faixa praia.....	55
Figura 37 Campo vetorial de correntes, resultado do modelo criado a partir do segundo arquivo de batimetria.....	56
Figura 38 Malha batimétrica, com valores topográficos criados a partir da interpolação e posterior suavização dos dados de batimetria.....	57
Figura 39 Campo vetorial de correntes, resultado do modelo criado a partir do terceiro arquivo de batimetria.....	58
Figura 40 Mapa das regiões onde foram identificadas correntes de retorno, para cada cenário durante a maré enchente.....	59
Figura 41 Mapa das regiões onde foram identificadas correntes de retorno, para cada cenário durante a maré vazante.....	60
Figura 42 Campo de direção de propagação de ondas sobreposto a um mapa de altura significativa de onda.	62
Figura 43 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas do quadrante Sul.....	63
Figura 44 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas do quadrante Leste.....	64
Figura 45 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas do quadrante sudeste.....	65
Figura 46 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 1.25m.....	66
Figura 47 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 1.75m.....	67
Figura 48 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 2.25m.....	68
Figura 49 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 2.75m.....	69
Figura 50 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 3.25m.....	70
Figura 51 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 3.5m	71
Figura 52 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 4.5m	72
Figura 53 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 0.75m.....	73
Figura 54 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a	

1.25m.....	74
Figura 55 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 1.75m.....	75
Figura 56 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 2.25m.....	76
Figura 57 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 2.75m.....	77
Figura 58 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 3.25m.....	78
Figura 59 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 3.75m.....	79
Figura 60 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 4.5m.....	80
Figura 61 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 1.25m.....	81
Figura 62 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 1.75m.....	82
Figura 63 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 2.25m.....	83
Figura 64 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 2.75m.....	84
Figura 65 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 3.25m.....	85
Figura 66 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 3.75m.....	86
Figura 67 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 4.5m.....	87
Figura 68 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 7s.....	88
Figura 69 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 7s, sobreposto a um mapa de altura significativa de onda	89
Figura 70 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 11s.....	90
Figura 71 Composição de campos vetoriais de correntes, para o modelo forçado por ondas de Períodos iguais a 13,15,17 e 19 respectivamente	91
Figura 72 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 19s, sobreposto a um mapa de altura significativa de onda	92
Figura 73 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 7s.....	93
Figura 74 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 9s.....	94
Figura 75 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 11s.....	95
Figura 76 Composição de campos vetoriais de correntes, para o modelo forçado por ondas de Períodos iguais a 13,15,17 e 19 respectivamente	96
Figura 77 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 7s.....	97
Figura 78 Composição de campos vetoriais de correntes, para o modelo forçado por ondas de Períodos iguais a 9,11,13,15,17 e 19 respectivamente	98
Figura 79 Mapa de correntes durante a maré enchente forçado por um Swell de Sul.....	99
Figura 80 Mapa de correntes durante a maré vazante forçado por um Swell de Sul.....	100
Figura 81 Mapa de correntes durante a maré enchente forçado por um Swell de Sudeste	101
Figura 82 Mapa de correntes durante a maré vazante forçado por um Swell de Sudeste	102
Figura 83 Mapa de correntes durante a maré enchente forçado por um Swell de Leste	103
Figura 84 Mapa de correntes durante a maré vazante forçado por um Swell de Leste	104
Figura 85 Mapa de localização dos sistemas de corrente de retorno, para os cenários de ondas de sul, sudeste e leste (maré vazante).....	105
Figura 86 Mapa de localização dos sistemas de corrente de retorno, para os cenários de ondas de sul, sudeste e leste (maré enchente).....	106

Lista de tabelas:

Tabela 1 Resumo dos parâmetros de configuração dos modelos utilizados nas análises de sensibilidade os valores em vermelho representam os máximos observados a partir da análise climatológica (eventos extremos).	36
Tabela 2 Percentagens das classes de altura de onda (Hs) em relação a suas direções de propagação. Análise climatológica dos dados Wave Watch III (2005-2018).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 3 Percentagem das classes de período de onda (T) em relação a suas direções de propagação. Análise climatológica dos dados Wave Watch III (2005-2018).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 4 Percentagens das classes de altura de onda (Hs) em relação ao período (T). Análise climatológica dos dados Wave Watch III (2005-2018).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 5 Percentagens das classes de altura de onda (Hs) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Verão).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 6 Percentagens das classes de período de onda (T) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Verão).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 7 Percentagens das classes de altura de onda (Hs) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Outono).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 8 Percentagens das classes de período de onda (T) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Outono).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 9 Percentagens das classes de altura de onda (Hs) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Inverno).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 10 Percentagens das classes de período de onda (T) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Inverno).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 11 Percentagens das classes de altura de onda (Hs) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Primavera).	Erro! Indicador não definido.
Tabela 12 Percentagens das classes de período de onda (T) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Primavera).	Erro! Indicador não definido.

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Área de estudo	6
2	Objetivos	12
2.1	Objetivo principal:	12
2.2	Objetivos específicos:	12
3	Fundamentação Teórica	13
3.1	Ondas:	13
3.2	Estado Morfodinâmico:	16
3.2.1	<i>Estado dissipativo:</i>	16
3.2.2	<i>Estado reflexivo:</i>	16
3.2.3	<i>Estados intermediários:</i>	17
3.3	Correntes de Retorno:	18
3.3.1	<i>Correntes hidrodinamicamente controladas:</i>	19
3.3.2	<i>Correntes batimetricamente controladas:</i>	20
3.3.3	<i>Correntes de borda:</i>	21
3.3.4	<i>Correntes de embaiamento:</i>	23
3.3.5	<i>Modos de circulação:</i>	23
3.3.6	<i>Correntes de retorno mistas:</i>	24
4.	Materiais e métodos:	25
4.1	Diagnóstico de Correntes de Retorno através de imagens de satélite:	25
4.2	Parâmetros de circulação costeira:	29
4.3	Batimetria e topografia:	29
4.4	Modelagem numérica:	29
4.5	Domínio computacional (grade numérica):	30
4.5.1	<i>Domínio geral:</i>	30
4.5.2	<i>Domínio intermediário:</i>	31
4.5.3	<i>Domínio interno:</i>	32
4.6	Módulo Flow:	33
4.7	Módulo Wave:	34
4.8	Modelos numéricos:	35
5.	Resultados e discussão:	36
5.1	Análise climatológica de ondas:	36
5.1.1	<i>Análise sazonal:</i>	39
5.2	Diagnóstico visual de imagens de satélite, mapas de Kernel:	47
5.2.1	<i>Praia das Toninhas:</i>	47
5.2.2	<i>Praia Grande:</i>	48

<i>5.2.3 Praia do Tenório:</i>	<i>49</i>
<i>5.2.4 Praia Vermelha do Centro:</i>	<i>51</i>
5.3 Modelagem numérica:	51
<i>5.3.1 Análise de influência morfológica:</i>	<i>51</i>
<i>5.3.2 Análise de influência da direção de onda:</i>	<i>61</i>
<i>5.3.3 Análise de influência da altura de onda:</i>	<i>65</i>
<i>5.3.4 Análise sobre influência do período de onda:</i>	<i>87</i>
<i>5.3.4 Análise sobre influência do estado da maré:</i>	<i>98</i>
6. Conclusão	107
REFERÊNCIAS	109

1 Introdução

A região costeira brasileira é caracterizada por apresentar intensa urbanização, dado que 6 em cada 10 pessoas vivem em um raio de 60 km da orla litorânea (Pereira, Siegle, & Miranda 2010), cerca de 20% da população brasileira vive em municípios costeiros, contabilizando cerca de 40 milhões de habitantes.

Esta região está submetida a processos físicos, biológicos, químicos e geológicos sendo áreas sensíveis a impactos naturais e antrópicos. A zona costeira engloba a interface entre o continente e o mar, a linha de costa é o limite entre estes dois ambientes, contudo o termo costa é muito mais abrangente, sendo que, no qual estão inseridas regiões tanto acima quanto abaixo da linha d'água. A zona costeira é uma ampla zona de transição na qual o sistema marinho é influenciado pelo sistema terrestre e vice-versa (Carter & Guy Jr., 1988).

Os processos que operam nas seções da zona costeira são funções de fatores oceanográficos, climáticos, da topografia pré-existente e da natureza da feição. O efeito de ondas e correntes costeiras acarreta em deposição sedimentar em determinados sítios e erosão em outros, de maneira que a forma do ambiente seja modificada, este efeito por sua vez afeta a expressão hidrodinâmica na região de maneira que ambos os processos apresentam interdependência, como pode ser exemplificado na Figura 1. Morfodinâmica costeira provém uma base para a compreensão entre a interação de forças e topografia. Modelos morfodinâmicos, baseados em estudos empíricos de campo ou laboratoriais são suplementados por simulações virtuais que sintetizam essas relações de modo que se gere uma melhor compreensão acerca de como as costas operam (Cowell & Thom 1994).

Dentre a variedade de ambientes sedimentares destaca-se o ambiente praiial. Além de inúmeros serviços ecossistêmicos que esses ambientes têm a oferecer, as belas paisagens naturais são um atrativo turístico, que são a base econômica que sustenta muitos municípios litorâneos. A importância destes ambientes despertou o interesse de diversos ramos da ciência. Biólogos, geólogos, geógrafos, químicos, engenheiros e oceanógrafos vêm estudando extensivamente essas feições. As praias assim como as demais feições costeiras apresentam uma grande variedade de morfologias, que são dependentes da configuração geológica local, forçantes externas, e das fontes sedimentares (Davis Jr & Fitzgerald 2004). De acordo com Masselink & Short, 1993 as praias podem ser classificadas, segundo um parâmetro chamado Alcance Relativo de Maré (*Relative Tidal Range*).

Este parâmetro avalia a influência relativa entre ondas e maré em determinado sistema praial, categorizando 3 tipos de praias: Praias dominadas por onda, praias modificadas por maré e praias dominadas por maré.

As praias então são ambientes altamente dinâmicos e apresentam variabilidade morfológica em escala temporal que pode variar na ordem de segundos, relacionadas a oscilações de infragravidade, ou até centenas de anos atribuídas a oscilações do nível médio do mar. Em relação às oscilações de infragravidade, foco deste estudo, estão inseridas as correntes costeiras geradas por ondas. O comportamento destas correntes permitiu que se caracterizassem três tipos. Corrente de deriva litorânea, correntes de fundo, e correntes de retorno. Destas, a última representa o escopo deste trabalho.

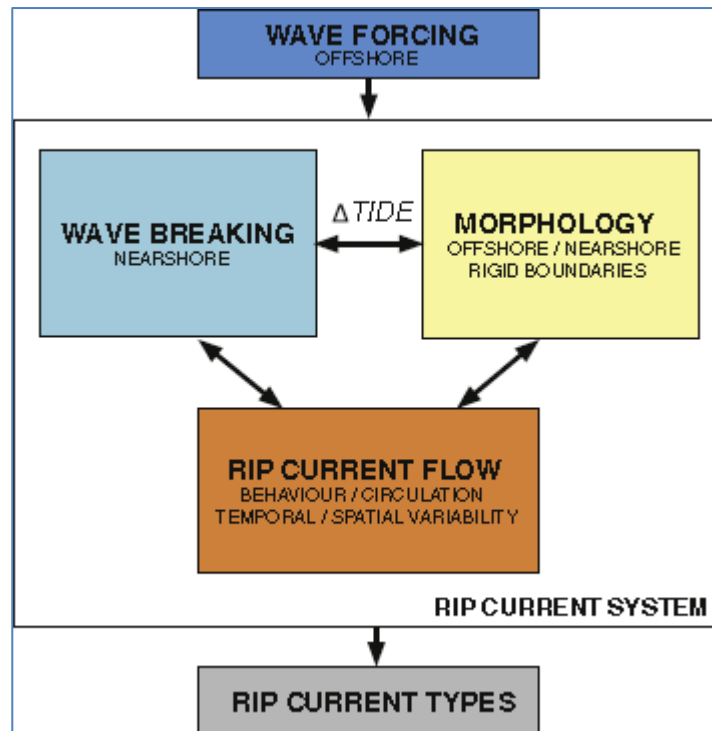


Figura 1 Esquema representativo de um sistema de correntes de retorno, reforçando a ideia de interação entre forçantes hidrodinâmicas e morfologia, evidenciando a interdependência e ajuste dinâmico em um ambiente praial. Tradução dos termos de cima para baixo: Força de onda, quebra de onda, maré, morfologia, fluxo de corrente de retorno, sistema de corrente de retorno, Tipo de corrente de retorno. Imagem adaptada de (B. Castelle et al. 20)

As correntes de retorno foram primeiramente descritas em 1941 por Shepard, Emery e La fond (Gilbert 1980). Contudo a complexidade dos sistemas nas quais estão inseridas, a variedade de agentes indutores e transformadores e seus efeitos faz deste tópico, objeto de estudo até os dias de hoje. A configuração clássica de um sistema de correntes de retorno assume conformação simétrica, na qual correntes de alimentação semelhantes, porém opostas convergem entre si, dando origem a uma corrente estreita, intensa que flui em direção ao mar (Gilbert 1980), como exemplificado na Figura 2.

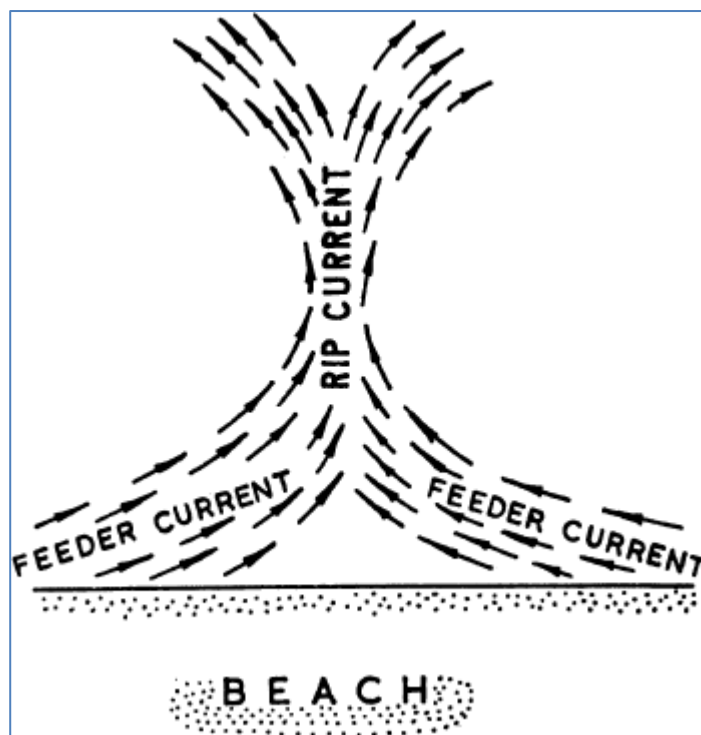


Figura 2 Esboço esquemático de um sistema de retorno idealizado. Sendo FEEDER CURRENT correntes de alimentação, RIP CURRENT corrente de retorno e BEACH faixa praial Adaptado de (Gilbert 1980).

Correntes de retorno são importantes agentes modeladores da morfologia praial, devido a sua alta relevância no transporte de sedimento, plâncton, poluentes, e até pessoas entre diferentes setores da praia. A origem destas correntes está relacionada à convergência de duas correntes de deriva litorânea ou ainda devido a convergência com um obstáculo sólido (Inman, Tait, & Nordstrom 1971). Correntes de retorno podem atingir velocidades superiores a 1.5 m/s representando um risco para os banhistas (Calliari et al. 2003). Correntes de retorno merecem atenção especial, sobretudo devido ao perigo que elas representam.

Em relação a segurança de praias, as correntes de retorno representam a principal ameaça a vida dos banhistas. 15% de os registros de óbitos por afogamento ocorridos nos Brasil ocorreram em áreas de praia, destes 15% mais de 90% estão associados às correntes de retorno (Secretaria de Segurança Pública PMSP, 2020). De acordo com as autoridades existem fatores agravantes nos casos de afogamentos, como abuso de bebidas alcoólicas pelos banhistas, população de baixa renda e educação, população de etnia rural e a falta de supervisão, sendo enquadrado como grupo de maior risco pessoas com idade inferior a 14 anos. Nos últimos 10 anos as estatísticas elaboradas pelo GBMar determinaram que 92% do total de afogados eram homens, 89% moravam longe da costa, 59% não sabiam nadar (Secretaria de Segurança Pública PMSP, 2020). Em uma iniciativa de redução das fatalidades nos municípios litorâneos do estado de São Paulo, surgiu em forma de esforço conjunto entre os governos estadual e municipais a Operação Praia Segura que se inicia com uma pré-operação, desencadeada a partir do mês de setembro de cada ano, através de campanhas educativas e de seleção e treinamento de

Guarda-Vidas temporários. Entre dezembro e março, época de maior ocorrência de acidentes, é quando a operação é oficialmente implementada. Dentre os principais esforços empregados, está a contratação de Guarda-vidas temporários para auxiliar o contingente de bombeiros efetivos, além do recurso profissional a operação conta com recursos materiais, ampliando a estrutura para salvamento e primeiros socorros. Segundo a mesma fonte de dados, dos municípios do litoral norte, Ubatuba é o município que apresenta as maiores ocorrências de salvamentos. Nesse sentido se mostra interessante um estudo abordando os principais mecanismos de formação e manutenção desses sistemas, sobretudo com enfoque em uma área com alto índice de acidentes fatais como é o caso do município de Ubatuba.

1.1 Área de estudo

A linha de costa de São Paulo tem aproximadamente 652 km de extensão, dos quais 430 km representam praias arenosas oceânicas, comportando aproximadamente 318 praias (Souza 2013). A geomorfologia do litoral de São Paulo é fortemente influenciada pela posição relativa do maciço cristalino da Serra do Mar. A proximidade da Serra com o oceano na porção norte do litoral resulta em uma linha de costa irregular marcada pela presença de ilhas e praias embaçadas de enseada (Mahiques et al. 2016) como exemplificado na Figura 3. Mahiques et al. (2016) agruparam o litoral paulista em 6 setores baseados em características geomorfológicas. O setor que representa a área de estudo é caracterizado pela ocorrência de ilhas e baías semifechadas com diferentes formatos e orientações. A morfodinâmica dessas praias abrange um espectro que contempla desde praias refletivas, intermediárias e até dissipativas (Souza 2013). A característica sedimentológica do setor é por via de regra heterogênea em textura e composição, e sua distribuição é influenciada principalmente pela ação das ondas e em menor grau pela baixa competência dos sistemas fluviais da região (Mahiques et al. 2016). Eventos geológicos decorrentes do soerguimento da Serra do Mar durante o Cretáceo redirecionou os sistemas de drenagem de modo que a contribuição fluvial que escoava para o oceano refletiu em baixo suprimento de sedimentos terrígenos para as bacias oceânicas, sendo assim a maior parte dos sedimentos que abastecem as praias são oriundos da própria plataforma (Mahiques et al. 2016). Neste setor as ondas incidem sobre as praias com diferentes ângulos resultando em padrões de transporte sedimentar localmente específicos, contudo, cada praia apresenta um comportamento morfodinâmico específico fazendo importante o estudo de cada praia separadamente (Mahiques et al. 2016).



Figura 3 Mapa de localização da área de estudo em escala local (painel esquerdo), regional (direito superior) e remota (direito inferior). Em destaque, no mapa local, as quatro praias de interesse para o estudo.

Em estudo realizado em 2013, no qual são avaliadas 87 praias do litoral paulista Souza et al. (2013) avaliam praia das Toninhas como sendo uma praia arenosa marcada pela presença de berma e cúspides, apresentando areia fina a média mal selecionada e de estado morfodinâmico predominante de praia reflexiva de baixa energia. Orientação no sentido NE com comprimento médio em torno de 1.5 km, conforme Figura 4.



Figura 4 Imagem extraída do Google Earth, representando individualmente uma das praias, objeto de estudo a Praia das Toninhas.

Praia Grande sendo uma praia arenosa com forte tendência a erosão costeira, sobretudo após a implementação da BR-101, com barras longitudinais suaves, perfil plano com presença de berma. Seu estado morfodinâmico é característico de praias dissipativas de alta energia, representada pela forte

presença de areias finas a médias com sedimento bem selecionado. A praia grande é orientada no sentido NNE apresenta comprimento médio da ordem de 1.8 km e largura média de 54.5 m, Figura 5.



Figura 5 Imagem extraída do Google Earth, representando a Praia Grande.

A praia do Tenório, Figura 6, ficou caracterizada pela presença de barras longitudinais em um perfil plano, com areias finas e médias bem selecionadas e estado morfodinâmico dissipativo de baixa energia. A praia do Tenório é orientada no sentido NE, apresenta um padrão assimétrico característico de praias em rotação. Seu comprimento médio é de 0,4 km.



Figura 6 Imagem extraída do Google Earth, representando a Praia do Tenório.

A Praia Vermelha do centro, Figura 7, apresenta berma e cúspides composta por areia média a grossa mal selecionada, e estado morfodinâmico característico de praia reflexivo de alta energia. A praia está orientada no sentido NE e apresenta comprimento médio da ordem de 0,2 km.

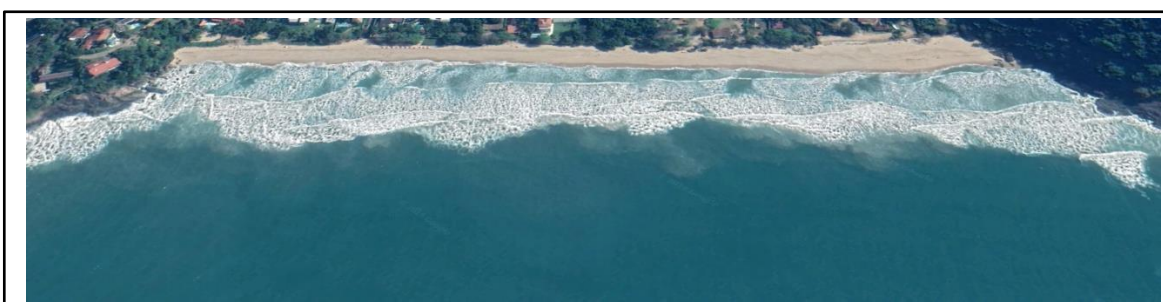


Figura 7 Imagem extraída do Google Earth, representando a Praia Vermelha do Centro.

A costa de São Paulo está inserida nas proximidades do limite subtropical e tropical. Variações nos regimes de ventos e chuvas estão atribuídos a oscilações na Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), o qual é responsável pela dominância de ventos de nordeste durante primavera e verão e pela penetração de frentes frias polares (Satyamurti et al., 1998). A circulação atmosférica no litoral sudeste brasileiro é influenciada pela Zona de Convergência Atlântico Sul (ZCAS) a qual é responsável pela incidência de ventos de noroeste esta célula determina a estacionariedade de frentes frias na região, o que intensifica eventos de nebulosidade e condensação. Outro fenômeno atmosférico que gerencia a circulação na região é o Anticiclone Tropical do Atlântico Sul (ATAS), este é um centro de alta pressão que promove a propagação de ventos do Nordeste. Além disso, há incursão de sistemas frontais ou frentes frias responsáveis pelos ventos de quadrante sul (Satyamurti et al., 1998). A Frente Polar Atlântica (FPA) resulta do choque entre sistemas polares e tropicais, esses eventos ocorrem o ano inteiro, mas em maior frequência durante o outono e inverno.

O clima úmido é controlado por massas tropicais e equatoriais, a proximidade da costa com a Serra do Mar acentua a pluviosidade na região por efeito orográfico mesmo durante o inverno (Monteiro 1973).

Os processos costeiros que atuam na plataforma sudeste do Brasil são moldados pela influência da ATAS e FPA. O primeiro é responsável pela formação de ondulações de nordeste e leste cuja energia é baixa comparada às ondas geradas pelas frentes polares (Pianca et al. 2010). As frentes polares são formadas por massas de ar frio em altas latitudes, apresentam alta pressão atmosférica. Estes sistemas frontais são responsáveis pela geração de ondas energéticas de quadrante sul e sudeste. O comportamento dinâmico derivado da evolução dos sistemas frontais aliados a orientação da linha de costa causa variações no direcionamento das ondas e das correntes costeiras por elas induzidas. De modo geral as ondas de sul prevalecem durante a maior parte do ano, exceto pela primavera quando as ondas de leste são mais recorrentes. As maiores ondas registradas ocorrem durante o outono e podem chegar a 6m de altura (Pianca et al. 2010). Silva e colaboradores exemplificam as condições sazonais de onda, do setor sul do litoral paulista, em forma de histogramas direcionais de acordo com a Figura 8. O regime de marés da plataforma sudeste é predominantemente do tipo micro maré semidura com desigualdade diária (Mesquita 1995). Estudo dos dados de marégrafos em Ubatuba mostra comportamento muito semelhante aos observados nos marégrafos de Santos e Cananéia, onde o registro maregráfico é o mais extenso do estado. De modo geral, as oscilações do nível do mar variam entre 1.2 m durante a sizígia e 0.25 m na quadratura. Sazonalmente a variação é da ordem de 20 a 30 cm de amplitude, sendo um pouco maior em Cananéia (Mesquita 1995).

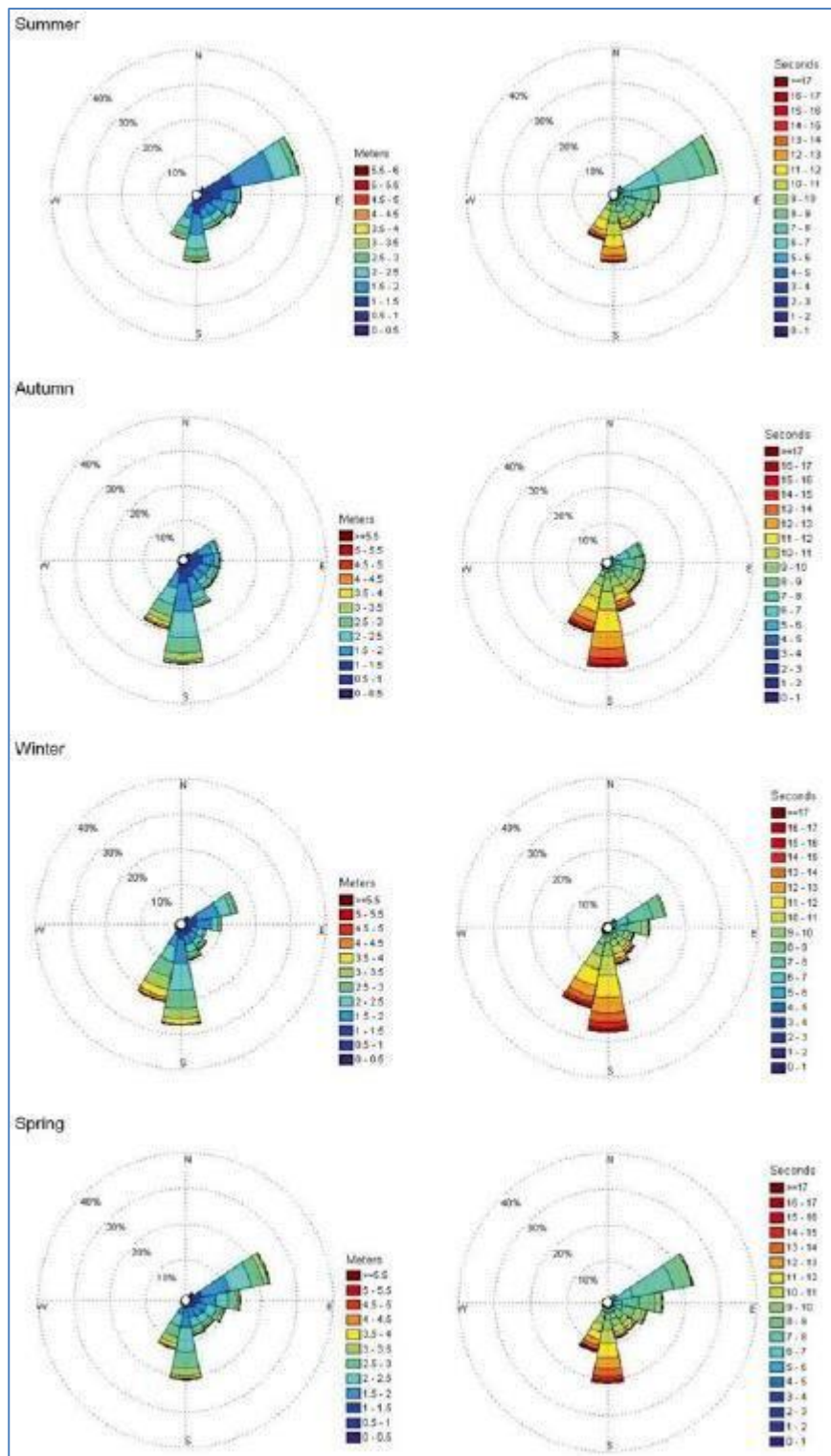


Figura 8 Histograma direcional representativo das características sazonais das ondas incidentes sobre o litoral do estado de São Paulo. Esquerda altura significativa; Direita período de onda. Adaptado de Silva et al. (2014)

2 Objetivos

2.1 Objetivo principal:

Analisar a variabilidade de sistemas de corrente de retorno, frente a mudanças dos parâmetros descritivos de onda (Altura, Período e direção) e topografia da faixa praial, através de experimentos numéricos.

2.2 Objetivos específicos:

- Avaliação da influência dos principais agentes modeladores de um sistema de correntes de retorno.
- Diagnóstico visual de correntes de retorno através de imagens de satélite.
- Caracterizar a hidrodinâmica da região através de modelagem numérica.
- Avaliar a evolução hidrodinâmica frente a variabilidade das forçantes externas.
- Avaliar comportamento dos sistemas de correntes de retorno frente a variações topográficas na faixa praial
- Avaliar a influência da maré sobre os sistemas de correntes de retorno.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Ondas:

Ondas são a principal fonte de energia, seja para erosão seja para a deposição, nas zonas costeiras. A compreensão deste fenômeno envolve uma série de descritores como altura de onda a qual expressa a elevação entre a crista e o cavado de uma onda, a altura de onda representa duas vezes sua amplitude

(A) pode ser medida em oceano aberto (H_0) ou no ponto de quebra (H_b). Contudo, a altura de onda é independente das outras variáveis que se inter-relacionam. O intervalo de tempo entre a passagem de dois pontos em mesma fase é chamado período (T). A distância horizontal entre estes pontos em perfis de onda sucessivos é chamada de comprimento de onda (L). A velocidade a qual as ondas se propagam é chamada de velocidade de fase ou celeridade (C). As ondas também podem ser descritas através da frequência, que é o inverso do período de onda e é medido em Hertz (Hz).

A maior parte das ondas que podem ser avistadas na superfície do oceano são geradas pelo vento. Um trem de ondas é formado quando ocorre cisalhamento entre o vento e a lâmina d'água superficial acarretando na transferência de energia para a superfície do mar, a superfície do mar se move na direção de propagação do vento (Howard H, 2012). Quanto maior for a velocidade do vento em relação a da onda, mais esbelta a onda se torna (esbeltez é definido como a razão entre a altura de onda e seu comprimento). Ondas podem ser classificadas como progressivas as quais se movem ao longo do oceano ou estacionárias que apresentam flutuações verticais, mas aparentemente não se propagam. Ondas estacionárias normalmente ocorrem quando a onda é refletida por uma barreira sólida e a feição refletida encontra com uma outra onda incidente de modo que a superfície da água se quebra em pontos nodais, onde a superfície do mar não apresenta flutuações e pontos anti-nodais os quais apresentam flutuações verticais (Davis & FitzGerald, 2004).

A energia de uma onda consiste em energia potencial baseada em forças estáticas e energia cinética baseada na movimentação da onda. A energia de onda está relacionada ao quadrado de sua altura. A energia de onda varia conforme a altura de onda aumenta, contudo, o escoamento de energia carregado por uma onda por unidade de comprimento também chamado de força de onda permanece relativamente constante.

As ondas incidentes observadas na costa adquirem características distintas do trem de ondas formados em mar aberto, dentre as razões que explicam isso as transformações associadas a interação das ondas com a topografia do assoalho marinho na plataforma continental interna, são das mais influentes. Essas interações se tornam cada vez mais significativas à medida que a altura da coluna d'água (h) decresce em relação à altura de onda (H). No momento em que a onda passa a sentir o fundo, se inicia a dissipação de energia e a onda passa a ser modificada, nesse contexto a massa de água passa

a se deslocar junto com a passagem da onda quando a altura da onda (H) é maior que três quartos de profundidade local, então se desenvolve um escoamento turbulento que resulta na rápida dissipação da energia associada a onda (Komar,1998).

Durante o processo de formação das ondas, a superfície do mar dentro da região de formação (pista) se torna bastante irregular, devido a presença de ondas com diversos comprimentos de períodos, as ondas menores vão sendo assimiladas pelas maiores de modo que se a pista de formação tiver comprimento suficiente ou se o vento soprar com intensidade e por duração suficientes a superfície atinge um estado de desenvolvimento completo no qual existe um equilíbrio entre a taxa de dissipação de energia e de assimilação, nesse estado as características das ondas se tornam constantes (Barnett & Sutherland Aj 1968). O grupo de onda que se propaga para fora da região de formação é então chamado de *swell* (marulho). O *swell* se caracteriza por apresentar um espectro curto de comprimentos e períodos de onda, pois durante a propagação as menores ondas desaparecem e as maiores ondas são formadas por assimilação. A velocidade de propagação das ondas e seu período estão relacionados com seu comprimento. As maiores ondas viajam consideravelmente mais rápido que as menores e à medida que o *swell* se propaga é maior a possibilidade de as ondas grandes absorverem as menores.

Teorias de ondas fornecem aproximações matemáticas a respeito da forma e movimento das ondas. A teoria de Airy, a teoria mais frequentemente adotada em estudos, confere um formato sinusoidal as ondas envolvendo movimentação harmônica simples, esta teoria não leva em consideração os termos de segunda ou maior ordem, termos os quais foram incorporados a teoria de Stokes (Davis & FitzGerald, 2004). Para a maioria dos propósitos a teoria de Airy também chamada teoria linear ou de ondas de pequena amplitude, provém uma boa aproximação das características das ondas. Ondas de mar profundo se transformam à medida que se movem para águas rasas. Velocidade de onda diminui à medida que ocorre interação com o assoalho marinho, o poder de onda é atenuado como resultado da transferência de energia para a mobilização do sedimento. As equações de águas rasas se aplicam quando a profundidade local é menor que 0.05 em relação ao comprimento de onda. Em águas rasas a profundidade local é o maior controlador da velocidade de ondas. À medida que a profundidade decresce o comprimento e velocidade de ondas ambos decaem, mas a altura de onda aumenta as ondas incidentes sobre regiões de águas rasas tendem a sofrer refração, as cristas se dobram tornando-se cada vez mais paralelas a orientação do fundo até que a orientação das cristas se torne praticamente paralela em relação a linha de costa (Davies, 1985. O ângulo que as ondas fazem em relação ao assoalho marinho podem ser descritos pela lei de Snell, que é a base para elaboração de técnicas de construção de diagramas de refração para direções e periodicidade de aproximação de ondas. Ondas de *swell* tendem a refratar mais do que as ondas geradas por campos de ventos locais, estas por sua vez desempenham um importante papel no transporte de sedimentos paralelo a costa. (Davis & FitzGerald, 2004).

As ondas quebram em profundidades próximas às suas respectivas alturas (Komar,1998). A medida que as ondas se aproximam de regiões cada vez mais rasas elas ganham esbeltes (H/L), pelo fato de que suas alturas aumentam e seus comprimentos diminuem. Quando esta razão atinge valores por volta de 0.147 a onda se torna instável e a tendência é de que ocorra a quebra. Nesse ponto crítico a velocidade orbital das partículas de água excede a velocidade da onda, e isso contribui para a quebra pois as partículas se desvinculam da órbita que caracteriza a forma da onda. De acordo com (Howard H, 2012) outra maneira de avaliar a quebra das ondas pode ser através da razão entre a altura da onda

(H) e profundidade local (h), valores em torno de 0.78 se associam a quebra de ondas. Em praias inclinadas, estudos, estimam valores em torno de 1.2 já para praias aplainadas valores em torno de 0.6. Esta abordagem é específica e leva em consideração muito no que diz respeito à morfologia. Outra abordagem mais generalista a respeito da quebra de ondas diz que ondas tendem a quebrar quando a raiz quadrada da média da altura de onda é equivalente a 42% da profundidade local (Thornton & Guza 1982). No ponto de quebra as podem assumir quatro formas: mergulhante (*plunging*), ascendente (*surging*), colapsante (*colapsing*), deslizante (*spilling*). Ondas deslizantes ocorrem nas praias onde o fundo é suavemente inclinado, a crista se quebra em um escoamento turbulento marcado por espuma e bolhas que se desloca para a frente da onda, geralmente essas ondas se quebram longe da face praial, transformando-se em um fluxo que atravessa a zona de surfe, a energia de onda vai se dissipando ao longo da zona de surfe onde é formada uma série de pontos de arrebentação indicativos da presença de barras. Ondas mergulhantes ocorrem geralmente em praias de fundo íngreme, no ponto de quebra a face da onda fica praticamente vertical enquanto a crista se curva para a quebra, tipicamente a dissipação de energia se concentra em uma região menor da zona de arrebentação. Ondas ascendentes ocorrem nas praias mais inclinadas, a crista e a face da onda são relativamente lisas com pouca espuma ou bolhas, a base desliza sobre a face praial e desintegra durante um processo de espreadimento. Ondas colapsantes é um tipo de quebra intermediário entre mergulhantes e ascendentes (Davis & Fitzgerald, 2004).

Quando uma onda atinge a costa sem quebrar existe uma grande possibilidade de que a energia de onda seja refletida de volta ao largo. Geralmente o fenômeno de reflexão ocorre quando ondas incidem sobre um obstáculo sólido vertical. Reflexão também costuma ocorrer em faces praias com declividades muito altas, das quais em muitos dos casos, são praias de areia grossa e/ou cascalho.

Outro tipo de onda relevante para este estudo são as ondas de borda. Ondas de borda correspondem a modos periódicos aprisionados decorrentes da dinâmica de ondas. Ondas de borda de pequena escala podem estar atreladas a mecanismos de instabilidade ligados a passagem de onda geradas por vento ou pela incidência de *swell* (Guza & Davis 1974). Ondas de borda também estão relacionadas a ondas de infragravidade, na zona costeira, e ainda podem controlar o espaçamento longitudinal de correntes de retorno conforme (Bowen & Inman 1971).

3.2 Estado Morfodinâmico:

Estado modal ou estado morfodinâmico representa a expressão morfológica da praia em resposta às forçantes externas e características sedimentares, (Wright & Short 2006) definem estado modal como assembleias de formas deposicionais relacionadas à assinatura dos processos hidrodinâmicos. Praias tendem a apresentar estágios modais predominantes quando expostas durante um longo período de tempo à forçantes relativamente constantes (Wright & Short 2006). Diversos modelos foram propostos a fim de prever estados praias embasados em parâmetros sedimentares e de ondas (Short & Masselink 1993).

Wright e Short (2006) categorizam 6 estados praias dos quais dois extremos e quatro intermediários com base em expressões morfológicas e dinâmicas características. Quantitativamente (Huntley & Bowen 2015) discriminam cada estado modal com base em um coeficiente, chamado parâmetro de escalonamento de surfe (ϵ), sendo $\epsilon = a_b \omega^2 / (g \tan^2 \beta)$. Onde a_b representa a amplitude de quebra das ondas, ω frequência de ondas incidentes em radianos, g a aceleração da gravidade e β a declividade praias. Este parâmetro está mais relacionado com o tipo de quebra de onda que por sua vez relaciona-se com o estado praias.

3.2.1 Estado dissipativo:

No estado dissipativo a zona de surfe se apresenta larga, com baixo gradiente topográfico e elevado estoque de areia, que se acumula na forma de bancos longitudinais paralelos à linha de costa. A elevada energia das ondas incidentes é transformada em "wave setup" (sobre elevação do nível médio da água causada pela ação de ondas – transporte costa-adentro) e em fluxos de corrente de retorno (transporte costa-afora). Essa energia também pode ser transferida para a zona próxima à costa, como ondas de infragravidade (período $> 30'$), como as ondas de borda (edge waves) e estacionárias (standing waves), que podem alterar os processos sedimentares normais atuantes na praia, como as relações entre erosão e deposição e deriva litorânea (Souza, 2013), e parecem ser responsáveis, junto com outros mecanismos, pela formação das barras de deriva litorânea. Os valores de ϵ são superiores a 20, podendo chegar a 20 (Wright & Short, 2006), caracterizando a zona de surfe com quebra de ondas em regime mergulhante.

3.2.2 Estado reflexivo:

No estado reflexivo, a zona de surfe é caracterizada por ser estreita a inexistente e ter elevado gradiente. O estoque de areia da praia se encontra em sua porção emersa ou subaérea. A energia das ondas incidentes pode ser aprisionada por refração/reflexão, formando ondas de borda, de longo período, as quais podem gerar cúspides praias e correntes de retorno (Guza & Inman, 1975). Os valores para os parâmetros relacionados ao clima de ondas são: $\epsilon < 2,5$ e $< 1,5$ (Wright & Short, 1984), correspondendo a regime de quebra colapsante ou tubular.

3.2.3 Estados intermediários:

Nos estados intermediários as praias apresentam características entre os estágios acima, ora tendendo para um extremo ou para o outro tipo. Estes casos apresentam maior complexidade de processos e morfológica, e ϵ varia significativamente ao longo do perfil ou longitudinalmente (Wright & Short 2006). Dentre alguns estados característicos correspondentes a estágios intermediários podemos destacar:

3.2.3.1 Bancos com cava longitudinal:

Bancos com cava longitudinal se desenvolvem por sequência acrescionária a partir de um estado dissipativo, o banco é o agente principal na indução de quebra das ondas. A face praial mais íngreme tem comportamento localmente refletivo com ϵ próximo a 2. Efeitos de *run-up* decorrentes da quebra de ondas são relativamente altos e a presença de cúspides é comum. As ondas incidentes dominam a dinâmica na zona de surfe, mas oscilações sub-harmônicas e de infragravidade se intensificam em regiões mais rasas enquanto que as oscilações sub-harmônicas são mais pronunciadas nas adjacências aos fluxos de retorno.

3.2.3.2 Bancos de praia rítmicos:

Bancos de praia rítmicos, bastante similar ao caso de bancos e cavas longitudinais, se distinguem pela manifestação ondulações rítmicas longitudinais dos bancos e da porção praial subaérea (Wright and Short 2006).

3.2.3.3 Terraço de baixa mar:

Terraço de baixa-maré caracteriza-se por apresentar acumulação de sedimento logo abaixo da linha do nível de baixa-mar, adjacente a uma face praial íngreme. Tem comportamento modulado pela maré, se comportando de maneira refletiva durante a maré alta, e dissipativa na maré baixa (Wright and Short 2006).

3.2.3.4 Banco transversal e corrente de retorno:

Banco transversal e corrente de retorno caracteriza-se por apresentar bancos transversais relativamente dissipativos alternados com canais de retorno profundos, de caráter refletivo. A ocorrência destes canais de retorno induz forte correnteza. O mecanismo dominante destas feições é a circulação de retorno persistente e intensa (Wright & Short 2006). Masselink & Short (1993) e Masselink & Turner (1999) ampliaram esses conceitos e passaram a considerar também os efeitos relativos das ondas e marés na morfologia das praias. Assim, combinando os modelos pré-existentes com o conceito de Davis e Hayes sobre variação relativa das marés, estabeleceram o Parâmetro de Variação Relativa da Maré (Relative Tide Range - RTR), dado pela expressão: $RTR = MSR/H_b$, onde MSR é a variação da maré de sizígia (metros) e H_b a altura significativa das ondas na arrebentação (metros). Altos valores de RTR indicam o domínio de marés e baixos valores expressam a dominância de ondas. De acordo com esses

autores, com o aumento do RTR, praias refletivas gradam para praias de terraço de maré baixa com ou sem correntes retorno (rip currents); praias intermediárias com bancos gradam para praias com morfologia de correntes de retorno/bancos no nível de maré baixa; praias dissipativas com bancos submersos gradam para praias dissipativas sem barras; e praias dissipativas sem bancos ou correntes de retorno gradam para praias ultra dissipativas ($RTR > 7$). Quando RTR é > 15 a praia inicia a transição para uma planície de maré ($RTR \gg 15$).

3.3 Correntes de Retorno:

Correntes de retorno são fenômenos relacionados à convergência entre duas correntes de deriva litorânea, ou devido a convergência sobre um obstáculo físico. Sua ocorrência é indicada por um aumento na turbulência, interrupções nas linhas de quebra de onda, ou por plumas de sedimento sendo carregadas ao largo (MacMahan, Brown, & Thornton 2009). O espaçamento destas aumenta com aumento da altura das ondas podendo também se relacionar com a largura da zona de surfe (Brander & Short 2001). Correntes de retorno geralmente se formam em resposta a variações longitudinais na altura das ondas. As variações longitudinais por sua vez ocorrem quando a refração dos raios de onda resulta em convergência ou ainda devido a controle topográfico, nesse caso as correntes se estabelecem sobre cânions ou próximas a promontórios (Castelle et al. 2016)

As correntes de retorno podem ser divididas em três grandes grupos. Correntes controladas pela hidrodinâmica, correntes controladas pela batimetria e correntes de borda. (Castelle et al. 2016). As correntes controladas pela hidrodinâmica ocorrem em praias de batimetria regular e são subdivididas em dois tipos. Correntes geradas por instabilidade no cisalhamento das correntes de deriva. E correntes episódicas que são ocasionadas devido a passagem de vórtices na zona de surfe (Feddersen 2013).

Corrente controlada pela batimetria, nesses casos ocorre variação longitudinal na altura de quebra de onda devido a bancos de areia na zona de surfe. Os canais de retorno se posicionam entre os bancos. Há ainda ocorrência de canais de retorno gerados por variação na batimetria ao largo as correntes consequentes são então denominadas correntes de retorno focado (Fransson 2015).

As correntes de borda são um tipo que se formam ao longo de promontórios sólidos e podem ser divididas em correntes de deflexão quando ocorre desvio, pelo promontório, de intensas correntes longitudinais. E correntes rasas que se localizam na sombra da estrutura rígida (Castelle & Coco 2012). Em alguns casos, ondas incidentes podem interagir com ondas de borda as quais são aprisionadas em zonas próximas à linha de costa. As ondas de borda apresentam máxima oscilação superficial em seus anti-nós apresentando o mesmo período das ondas incidentes. Como consequência os anti-nós que coincidem com a cristas de onda incidente apresentam elevação máxima da superfície marinha ao passo que quando coincide com os nós a elevação é mínima. Esta configuração promove o desenvolvimento de uma célula de circulação na qual o fluxo de água é direcionado contrariamente ao gradiente de

pressão, com a existência de correntes de retorno atravessando a zona de quebra através dos pontos de mínima elevação superficial (Komar, 1998).

Com base em estudo recente de Castelle et al. (2016) abaixo está descritos os principais tipos de correntes de retorno que sumarizam o estado-da-arte sobre seu funcionamento.

3.3.1 Correntes hidrodinamicamente controladas:

Ocorrem em praias longitudinalmente uniformes, a existência deste tipo de corrente está atrelada a mecanismos puramente hidrodinâmico, sendo ausente qualquer tipo de controle morfológico. O mecanismo gerador são as variações de vorticidade decorrentes da quebra das ondas, resultantes da propagação direcional natural do campo de ondas (Cavaleri & Polo 2006).

3.3.1.1 Correntes episódicas:

Dentre as correntes puramente hidrodinâmicas podemos destacar as correntes episódicas. Correntes episódicas são pulsos de água que fluem para o largo associado a vórtices transientes da zona de surfe. A ocorrência destas correntes varia espacial e temporalmente. Contudo possuem ciclo de vida relativamente curto da ordem de 2 a 5 minutos, e são preferencialmente relacionadas à incidência de ondas normais à costa de tipo de quebra mergulhante (Castelle et al. 2014). Na figura a seguir temos uma esquematização e imagem do sistema em questão.

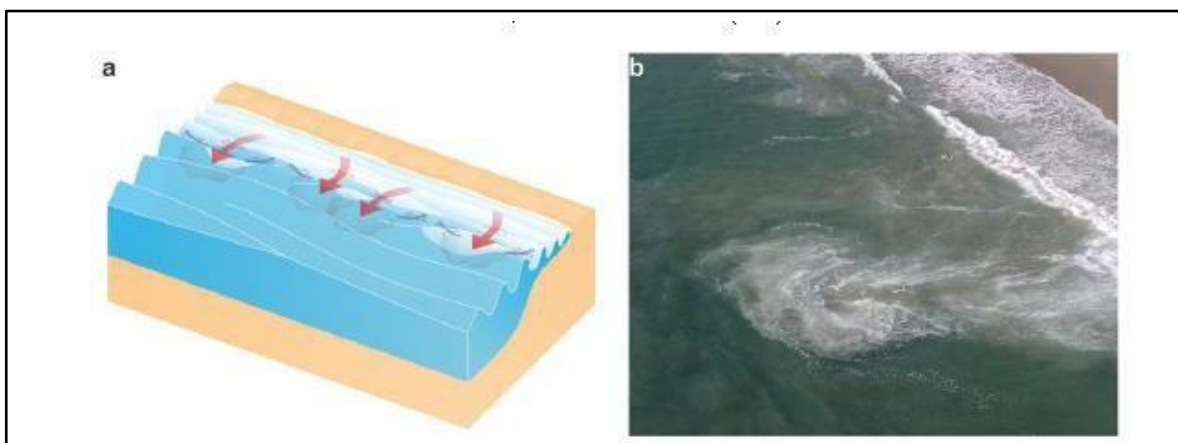


Figura 9 (a) Representação esquemática de uma corrente hidrodinamicamente controlada, episódica com incidência de ondas predominantemente normal a linha de costa. (b) Exemplo de corrente episódica em Zuma, Califórnia. Adaptado de (B. Castelle et al. 2016).

3.3.1.2 Correntes de instabilidade por cisalhamento:

Outro tipo de corrente de retorno que fecha o grupo das correntes hidrodinamicamente controladas são as correntes de instabilidade de cisalhamento. Este tipo de corrente está atrelado à vorticidade gerada em decorrência do cisalhamento das correntes de alimentação (longitudinais)

(Ozkan-Haller & Kirby, 1999.). Ondas que incidem obliquamente à costa dirigem correntes de deriva litorânea, estas correntes sofrem processos de instabilidade visto que sofrem cisalhamento na direção perpendicular à costa, este processo de instabilidade desenvolve a formação de vórtices progressivos (Ozkan-Haller & Kirby, 1999). A estas instabilidades estão associados fluxos estreitos e intensos que fluem para fora da costa. Correntes de cisalhamento são um tipo menos comum e só ocorrem em praias longitudinalmente uniformes quando expostas a ondas de swell de incidência altamente oblíqua (Castelle et al.2014).

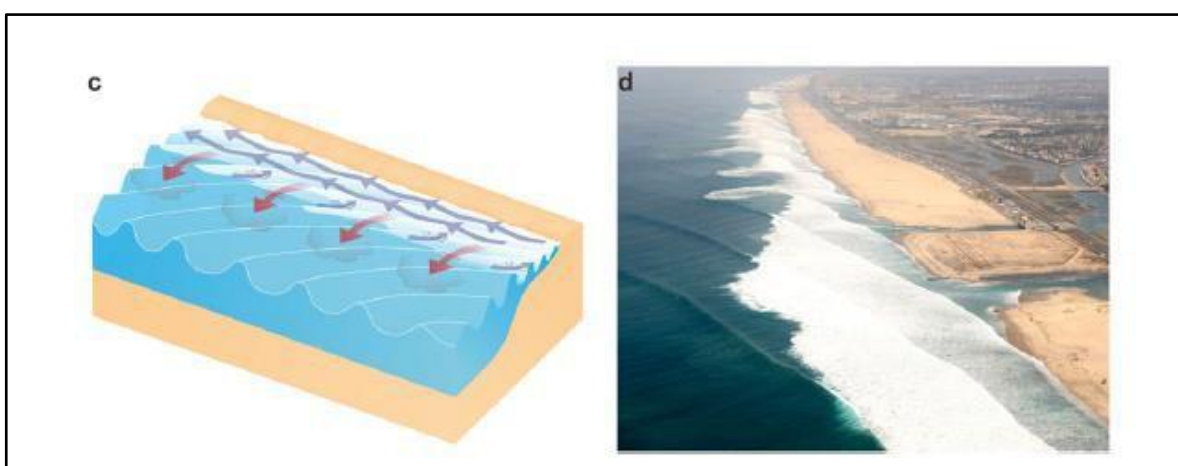


Figura 10 (c) Representação esquemática de uma corrente hidrodinamicamente controlada, de cisalhamento com incidência de ondas oblíquas a costa, e fortes correntes de alimentação. (d) Exemplo de corrente de cisalhamento em Newport Beach, Califórnia. Adaptado de (Ca

3.3.2 Correntes batimetricamente controladas:

O controle morfológico induz dois tipos de resposta hidrodinâmica de modo que esta categoria é subdividida em dois tipos de corrente.

3.3.2.1 Correntes canalizadas:

São o tipo de correntes mais amplamente estudado devido a sua natureza previsível e relativa facilidade de medição. Estas correntes se associam a estados praias intermediários (Wright & Short 2006) e ocupam canais profundos da zona de surfe localizados entre barras de arenosas geralmente em profundidades inferiores a 10m (Short 2007). Correntes canalizadas são dirigidas pela variação longitudinal da dissipação da energia de quebra de onda devido a variações longitudinais na altura de onda (Bruneau et al. 2011). Estas correntes apresentam relativa estacionariedade espacial, (da ordem de dias a meses) e maior persistência da forçante devido à quebra de ondas. Em praias de sedimento móvel essas correntes são formadas sob condições de incidência de ondas, normal a costa. A velocidade de fluxo dessas correntes sofre modulação pela maré podendo se intensificar e desintensificar durante um ciclo de maré.

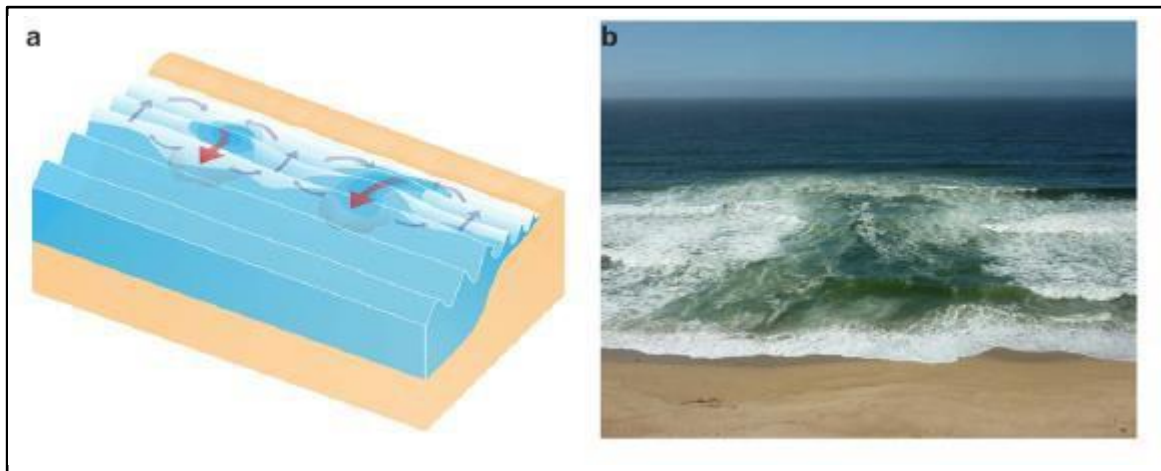


Figura 11 (a) Representação esquemática de uma corrente canalizada, com incidência de ondas predominantemente normal a linha de costa. (b) Exemplo de corrente canalizada em Marina, Califórnia. Adaptado de (Castelle et al. 2016).

3.3.2.2 Correntes focadas:

Como as correntes canalizadas estas também são forçadas pela morfologia de fundo, contudo neste caso o forçamento é originado em áreas mais profundas, fora da zona de surfe. Sob regime de ondas cuja incidência é oblíqua, processos de refração causados por estruturas submersas resultam na variação longitudinal da altura de quebra de onda que por sua vez gera fluxos são defletidos para fora da costa como correntes de retorno (Fransson 2015). Em contraste com as correntes canalizadas as correntes focadas não necessariamente ocorrerão em canais onde a quebra de ondas é menos intensa.



Figura 12 (c) Representação esquemática de uma corrente focada com incidência de ondas normal à costa. (d) Exemplo de corrente de cisalhamento em Blacks Beach, Califórnia. Adaptado de (Castelle et al. 2016).

3.3.3 Correntes de borda:

Em praias caracterizadas por apresentarem barreiras físicas como quebra marés, espigões, pontais e promontórios rochosos é frequente a ocorrência de correntes de borda. Estes obstáculos físicos

naturais ou antropogênicos exercem controle lateral da batimetria que induzem a formação de correntes de retorno. Dois mecanismos podem ser discriminados na geração destes fluxos, dependendo de que lado do obstáculo a incidência de ondas oblíquas ocorre.

3.3.3.1 Correntes de sombra:

Caso a incidência das ondas ocorra a sotavento do obstáculo, será criado um jato que flui paralelamente ao obstáculo, devido a variação na altura de onda e na dissipação da energia dessa onda devido ao efeito de sombra causado pela barreira. A este fluxo é dado o nome de corrente de sombra. As correntes de sombra são controladas pela geometria da área de sombra sendo então o formato e comprimento do obstáculo elementos cruciais para o desenvolvimento destas correntes (Castelle et al, 2014).

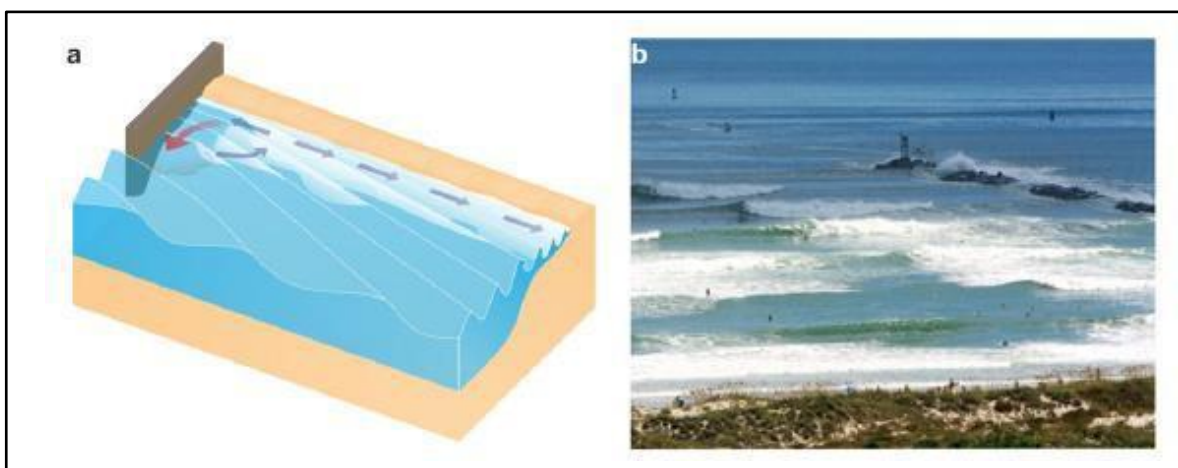


Figura 13 (a) Representação esquemática de uma corrente de sombra, com incidência de ondas a sota-vento do obstáculo. (b) Exemplo de corrente canalizada em Ponce inlet Jetty, Florida. Adaptado de (Castelle et al. 2016).

3.3.3.2 Correntes de deflexão:

Se a incidência das ondas ocorre a barlavento do obstáculo são geradas correntes chamadas de correntes de deflexão. Nesse caso o mecanismo de formação decorre da deflexão para o largo de correntes de deriva que fluem contra o obstáculo, sendo então obrigadas a contorná-lo fluindo em direção ao oceano aberto (Castelle & Coco 2012).

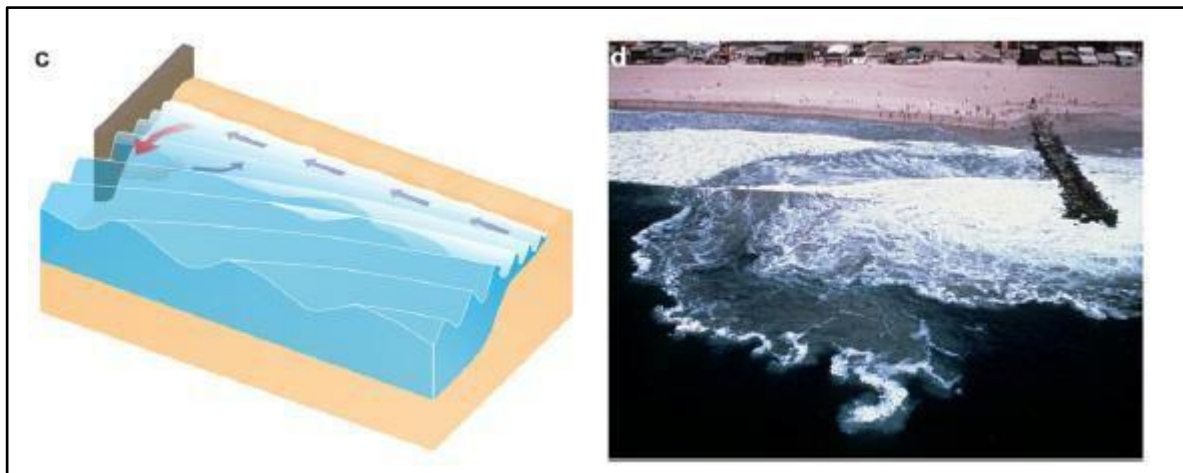


Figura 14 (c) Representação esquemática de uma corrente de deflexão, com incidência de ondas a barlavento do obstáculo. (d) Exemplo de corrente de cisalhamento em Newport Beach, Califórnia. Adaptado de (B. Castelle et al. 2016).

3.3.4 Correntes de embaimento:

Correntes de embaimento. São sistemas gerados em praias compartimentadas por promontórios físicos, naturais ou antropogênicos. Essas correntes ocorrem quando a extensão praial é pequena em relação a largura da zona de surfe. Nesses casos, correntes de retorno celular ocorrem quando promontórios rígidos dominam a circulação do interior da baía. Estas correntes geralmente ocorrem no centro ou nas extremidades do embaimento, sendo dependentes do formato e comprimento das barreiras fronteiriças, curvatura da praia e condições de onda (Castelle et al. 2012). Os mecanismos de indução desses fluxos são a combinação de deflexão, canalização e sombreamento. Os modos de circulação desses sistemas são fortemente dependentes da geometria do embaimento. Short e Masselink (1993) sintetizaram a hidrodinâmica típica de praias embaçadas em 2 modos principais e um modo intermediário.

3.3.5 Modos de circulação:

Os modos de circulação representam o resultado da interação entre morfologia e os sistemas de corrente de retorno, são o reflexo hidrodinâmico dessa interação. Caracterizando, então, a circulação do ambiente praial de um modo geral.

Modo de circulação normal ou regime de saída como proposto por Castelle et al. (2016). Este modo representa um comportamento semelhante ao encontrado em praias abertas, caracterizada por alto número de canais de retorno.

Outro modo é o de circulação celular ou de comportamento circulatório. Nesse caso a feição morfológica tem influência dominante na circulação, e as correntes se posicionam contra um ou os dois promontórios, ou no centro da baía. (Castelle et al. 2016).

O terceiro modo, chamado transicional, reflete características dos dois modos anteriores, nesse caso intermediário, o crescente aumento da extensão praiial se balanceia com a influência do promontório na promoção da circulação costeira. Não existe um limite consensual para enquadrar uma praia como sendo de regime de circulação transicional, contudo Castelle & Coco (2012) arbitrariamente estipularam um critério baseado no número de correntes. As praias que apresentam quatro ou mais correntes de retorno sem contar com as correntes de borda seriam enquadradas como circulação normal, ao passo que praias com duas e três correntes além das correntes de borda seriam praias transicionais, e praias com uma ou nenhuma corrente de retorno além dos retornos de borda seriam enquadradas em regime circulatório.

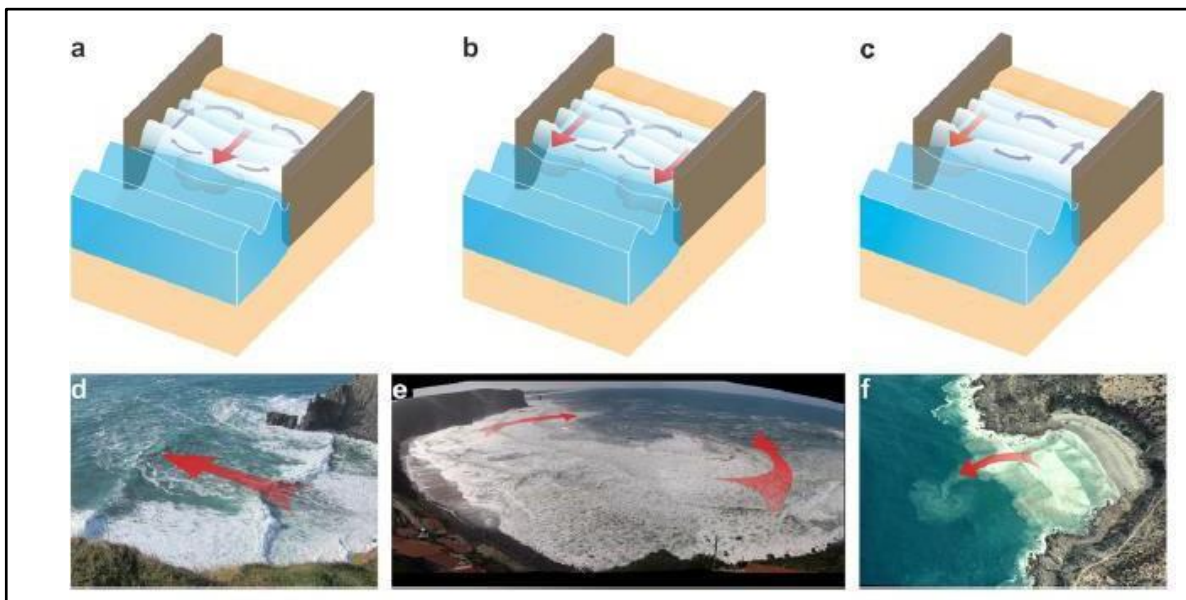


Figura 15 Esquemas e exemplos de correntes embaixadas ou celulares. (a, d) circulação normal com fluxo no centro do embaimento. (b, e) regime circulatório, com fluxo de retorno em ambas extremidades. (c, f). Adaptado de (Castelle et al. 2016).

3.3.6 Correntes de retorno mistas:

Na realidade as correntes de retorno se formam através de uma interação complexa entre os mecanismos de forçamento, sendo então mais evidente a presença de tipos mistos que incorporam características de 2 tipos fundamentais distintos. Por exemplo, em praias onde a zona de surfe apresenta pequena variabilidade batimétrica o sistema de correntes de retorno pode incorporar elementos de correntes episódicas e de correntes canalizadas (Castelle et al, 2014). Outros exemplos são correntes de barra interna recorrentes em praias com barras duplas (Price & Ruessink 2011) estas correntes misturam características de correntes canalizadas e focadas de modo que a variabilidade na altura de quebra de onda é causada tanto pela variação batimétrica longitudinal devido a barra interna, quanto pela refração

e potencial indução de quebra devido a influência da barra externa (Scott, Masselink, & Russell 2011). Por via de regra em praias arenosas a maior parte das correntes de retorno são tipos híbridos da mistura entre correntes de borda e canalizadas (Short, 1992).

4. Materiais e métodos:

Para a compreensão e caracterização do ambiente de estudo, conjuntos de dados distintos foram utilizados no desenvolvimento desta metodologia. Imagens de satélite foram analisadas e utilizadas na elaboração de mapas de Kernel, indicando zonas de maior probabilidade de formação de correntes de retorno. Série histórica de dados de ondas foi analisada e os padrões mais evidentes foram expostos em forma de gráficos e tabelas. Através da modelagem numérica diferentes cenários foram analisados a partir da expressão hidrodinâmica evidenciada em mapas vetoriais de corrente de retorno. O fluxograma a seguir exemplifica os conjuntos de dados utilizados e sua finalidade.

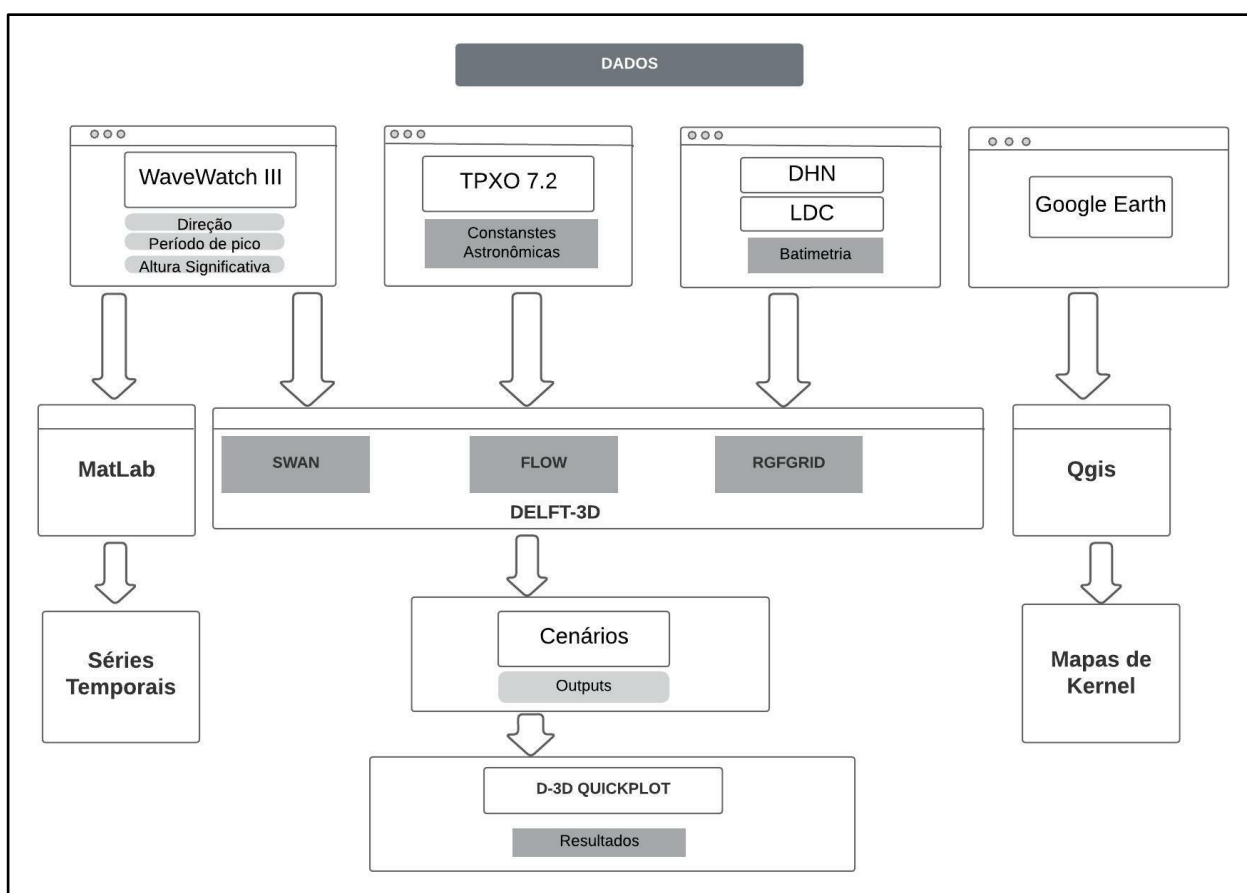


Figura 16 Fluxograma exemplificando a aplicação dos dados utilizados em cada método empregado no estudo.

4.1 Diagnóstico de Correntes de Retorno através de imagens de satélite:

Algumas características visuais nos permitem inferir a localização de correntes de retorno a partir de imagens aéreas. O analista deve procurar características como zonas de ruptura no raio de quebra das ondas (Figura 17), manchas de sedimento (Figura 18), maior rugosidade na superfície do

mar, regiões de abrandamento de espuma, ou preferencialmente, regiões sem espuma na zona de quebra de ondas (Figura 19) e feições semelhantes a cúspides na faixa praial (Figura 20), todas essas características são proxies de ocorrência de algum sistema de retorno. Em alguns casos as características supracitadas são bastante evidentes. No entanto, às vezes uma análise mais crítica é necessária. Por exemplo, a noção da direção da deriva potencial pode ser um indicativo de uma corrente de retorno de borda, ou a presença de pequenos rios ou córregos em épocas mais chuvosas pode indicar a presença de um canal de retorno nas proximidades (Figura 21).



Figura 17 Imagem Google Earth, ilustrando zona de ruptura no raio de quebra de onda.



Figura 18 Imagem Google Earth. Ilustrando pluma sedimentar na "cabeça" da corrente.



Figura 19 Imagem Google Earth. Ilustrando diferenciação entre região com espuma branda e região de espuma densa.



Figura 20 Imagem Google Earth. Ilustrando a presença de um canal de retorno delimitado por bancos de areia.



Figura 21 Imagem Google Earth. Ilustrando presença de RIP nas adjacências de um córrego

De forma a abranger uma variedade de condições, foram analisadas 21 imagens de satélite obtidas a partir do *Google Earth Pro*, compreendendo o período entre 2003 e 2019. A partir da análise individual de cada uma das imagens, foi criado um arquivo contendo informações sobre a localização espacial dos indicativos da presença de correntes de retorno, com o programa QGIS. Posteriormente, os resultados foram agregados em mapas de Kernel.

4.2 Parâmetros de circulação costeira:

Os parâmetros de ondas, Altura significativa, Período e direção, foram obtidos através de séries históricas extraídas do modelo global *Wave Watch III*. O conjunto de dados obtidos foi tratado e analisado em MATLAB®. A série temporal gerada em um ponto geográfico de latitude 23° Sul, 45° Oeste, compreende um período amostral de 14 anos, 2005 a 2018. foi então usado para inicialização dos modelos numéricos.

4.3 Batimetria e topografia:

A malha batimétrica utilizada é produto de dados digitalizados de cartas náuticas e folhas de bordo (DHN), disponíveis no Laboratório de Dinâmica Costeira (LDC-IOUSP).

Nos programas de pré-processamento do modelo numérico *Delft-3D* (Quickin), esse conjunto esparsos de valores batimétricos foi interpolado dentro do domínio computacional através do método de interpolação triangular. Esse método é mais adequado para conjunto de dados que apresentem resolução igual ou menor que a resolução da grade numérica (Deltares, 2014).

Para a representação topográfica, três arquivos foram criados a partir dos dados batimétricos existentes. Cada um desses arquivos envolve determinado grau de complexidade suas especificidades são apresentadas no Capítulo 5.

4.4 Modelagem numérica:

As simulações hidrodinâmicas serão realizadas através do modelo numérico *Delft-3D*. O modelo, *open source* desenvolvido pela Deltares, é um pacote hidrodinâmico composto por três módulos *FLOW*, *WAVE* e *WAQ* (qualidade da água). Esse sistema possui ferramentas de pré-processamento *RGFGRID* (sistema gerador de grade) e *QUICKIN* (sistema gerador de batimetria), ferramentas de pós-processamento *GPP* e *QUICKPLOT* e o sistema de processamento propriamente dito (Deltares, 2014). O modelo numérico criado para o propósito do estudo foi elaborado através do *software Delft DashBoard*, um programa *open-source* é uma interface gráfica com funcionalidades para editar e visualizar dados de entrada para modelos hidrodinâmicos, esta interface se conecta com bancos de dados globais de domínio público, que facilitam ainda mais a obtenção de dados de inicialização de modelo. O *software* ainda conta com um acervo de ferramentas de pré e pós processamento, como a ferramenta de *Nesting*, utilizada neste estudo para efetuar a transposição das condições de contorno de uma grade de menor resolução espacial para uma grade mais refinada, focada nas praias que são objeto foco do estudo.

4.5 Domínio computacional (grade numérica):

Para discretizar as equações tridimensionais de águas rasas, as variáveis são arranjadas de uma maneira especial na grade. Este arranjo específico das variáveis é chamado de grade C de Arakawa, na qual os pontos de nível de água (pontos de pressão) são definidos no centro da célula, e os componentes da velocidade são perpendiculares às faces da célula da grade onde elas estão situadas (Deltares, 2014.). Essa grade tende a facilitar a representação dos termos de gradiente de elevação e divergente de velocidade em contrapartida dificulta a representação do termo de Coriolis, sendo assim muito adequada para estudos em regiões de pequena escala. Para atender as necessidades do estudo foram criadas três grades distintas, posteriormente aninhadas através da ferramenta Nesting. A técnica de aninhamento de grades consiste na transposição de condicionantes hidrodinâmicas e de contorno de um modelo maior, para um domínio computacional menor e mais refinado, com intuito de reduzir o esforço computacional garantindo ainda, a coerência dos resultados. A opção pelo aninhamento foi levada em consideração, sobretudo, pela presença da ilha Anchieta, que exerce forte influência sobre as condicionantes hidrodinâmicas da região. Além do conjunto de grades supracitados o domínio é composto por uma malha batimétrica, o conjunto de dados batimétricos foi concedido pelo Laboratório de Dinâmica Costeira (LDC-IOUSP). Este conjunto compreende praticamente toda a plataforma continental interna do litoral paulista, o procedimento de interpolação triangular foi realizado para definir a malha batimétrica no interior dos contornos das grades. Ambas as grades possuem ortogonalidade igual a zero para praticamente todo o domínio, A ortogonalidade entre as células garante a precisão dos cálculos. Esta propriedade diz respeito ao valor do cosseno de uma célula de grade centrada (Deltares, 2014). O erro na direção do termo de pressão é proporcional ao desvio entre zero e os valores de cosseno das células de grade. É aconselhado manter os valores de ortogonalidade próximos de 0,02 na região de interesse, podendo variar até 0,05 em regiões menos importantes do domínio.

4.5.1 Domínio geral:

O domínio geral é composto por uma grade numérica de menor resolução que compreende uma ampla área geográfica, englobando ilhas e acidentes geográficos que podem exercer influência sobre condições hidrodinâmicas em escala local. A grade foi confeccionada em sistema geográfico projetado UTM. A projeção UTM consiste em um sistema referencial métrico definido em 60 zonas, cada zona representando um fuso diferente. A zona UTM correspondente a região de estudo é o fuso 23 S. Esse sistema facilita a interpolação das coordenadas. É uma grade regular, retangular, composta por 153 x 204 (x,y) células de 90 x 90 m (Figura 22).

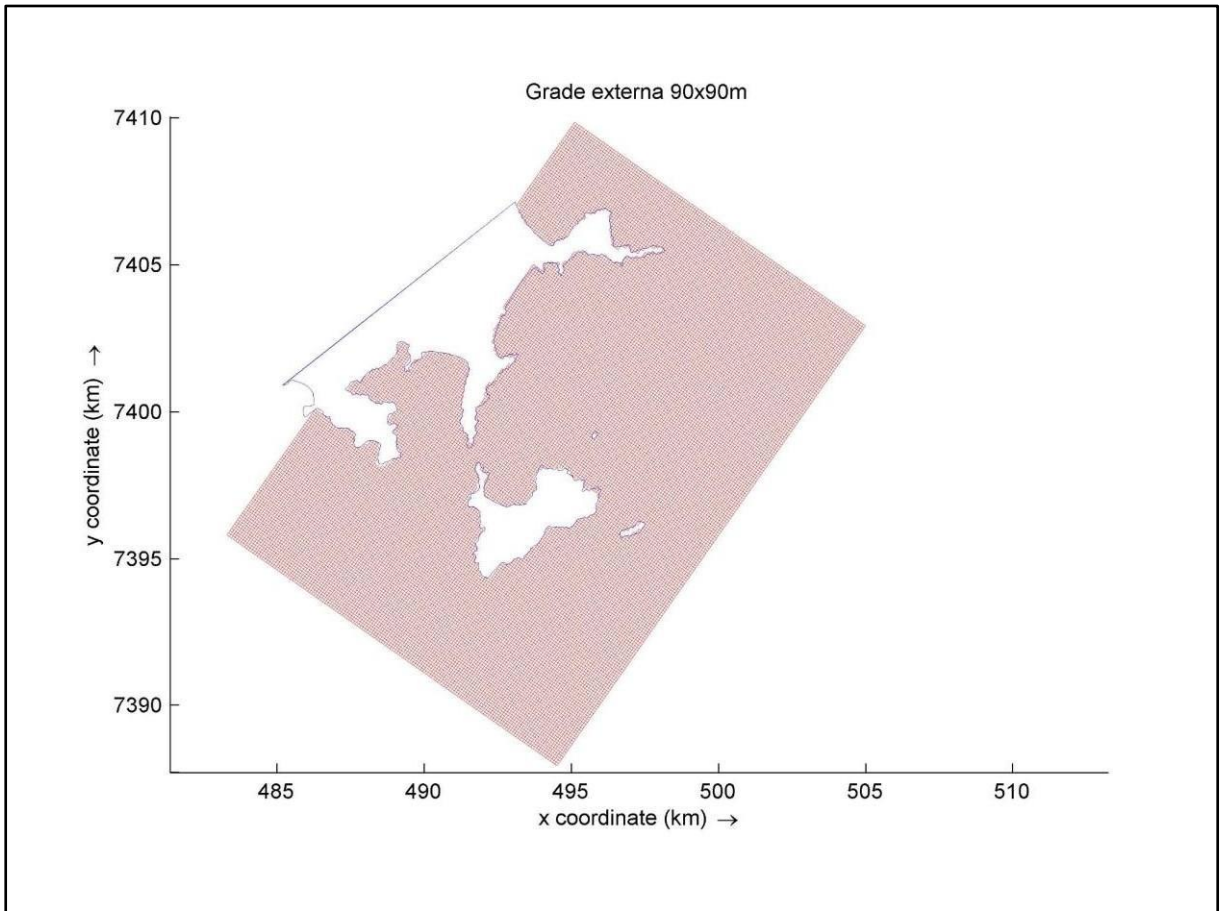


Figura 22 Imagem ilustrando a linha de costa que compreende as praias analisadas, praias adjacentes, ilhotes e Ilha Anchieta. E a grade externa dos modelos.

4.5.2 Domínio intermediário:

O domínio intermediário foi feito a partir de um recorte da grade maior e posterior processo de refinamento, após o refinamento a resolução espacial aumenta para 30x30m, contemplando 80 x 183 células nas direções x e y respectivamente, figura 23.

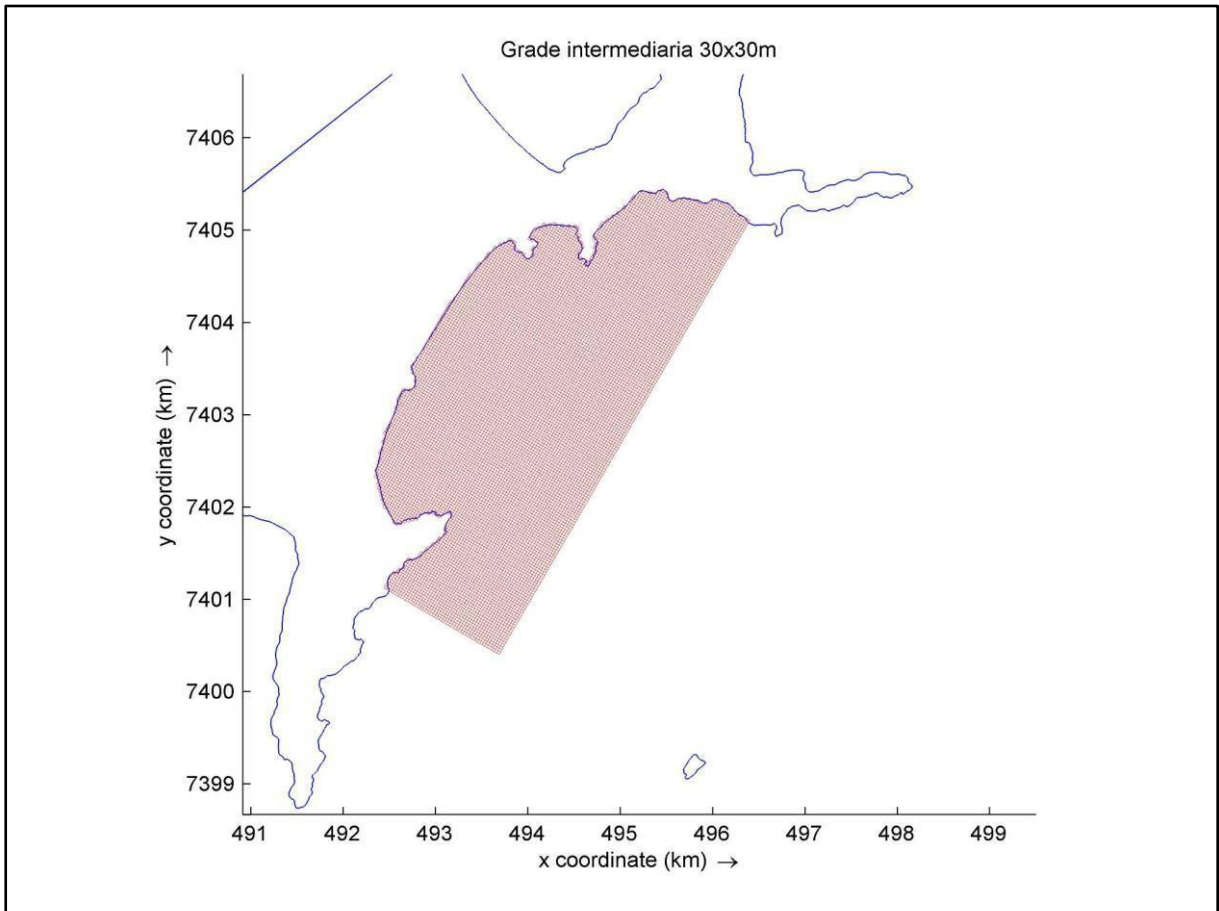


Figura 23 Imagem ilustrando a linha de costa que compreende as praias analisadas e a grade intermediaria dos modelos.

4.5.3 Domínio interno:

O domínio interno foi feito a partir de recorte da grade intermediária e posterior processo de refinamento, após o refinamento a resolução espacial aumenta para 10 por 10 m 161 x 458 células nas direções x e y respectivamente, Figura 24.

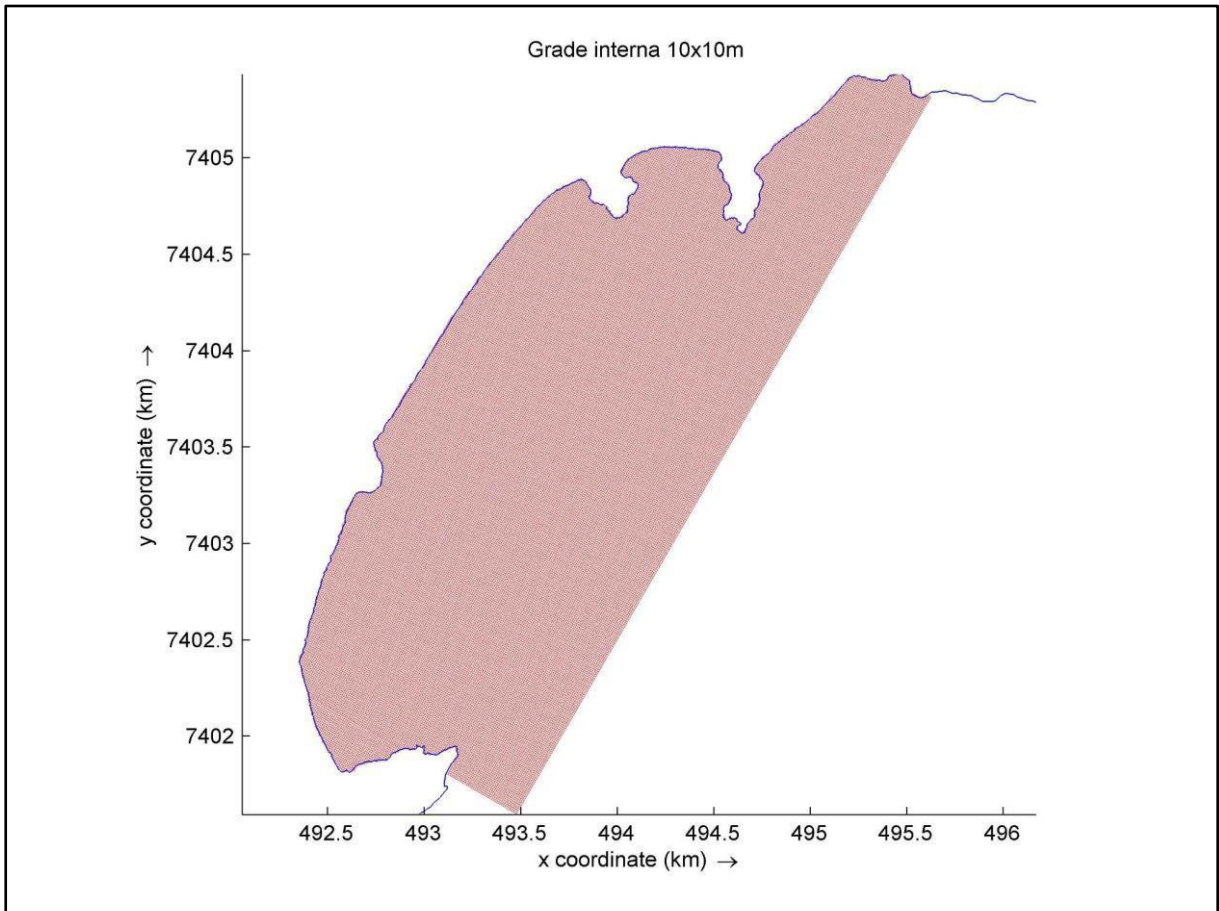


Figura 24 Imagem ilustrando a linha de costa que compreende as praias analisadas e a grade interna dos modelos.

4.6 Módulo Flow:

O *Delft3D-Flow* é capaz de simular fluxos não estacionários em duas ou três dimensões, fenômenos de transporte resultantes de marés, descarga fluvial e efeitos meteorológicos. O modelo simula os processos hidrodinâmicos resolvendo as equações de Navier-Stokes levando em conta aproximações para águas rasas, cujas premissas principais são a aproximação hidrostática, de *Boussinesq*, a equação da continuidade e as equações de transporte para constituintes conservativos (Deltares, 2014).

A fim de garantir uma boa formulação matemática do problema, com uma solução consistente, um conjunto de condições iniciais e de contorno deve ser especificado. Os contornos do domínio do modelo consistem de linhas ao longo da interface terra/água que são chamados de contornos fechados e partes através do campo de fluxo que são chamados contornos abertos (Deltares, 2014).

O modelo numérico aplicado é um modelo hidrodinâmico bidimensional ajustado para representar as condições hidrodinâmicas induzidas pela maré astronômica e pela ação das ondas. Para a simulação do modelo hidrodinâmico foi utilizada variação do nível do mar na grade externa, constantes astronômicas foram obtidas do modelo global *TPXO 7.2 Global Inverse Tidal Model*. A título de critério, cada um dos 3 contornos abertos do modelo foi subdividido em 10 sessões para aumentar a fidelidade dos resultados. O resultado deste modelo foi aplicado como condições de contorno para a grade intermediária e interna do sistema de aninhamento.

Para compreender a interação entre as ondas incidentes e as correntes por elas geradas, foi feito um acoplamento dinâmico entre o módulo *Flow* e o módulo de ondas *Delft3D-Wave*. Este sistema permite utilizarmos os resultados do módulo *Delft3D-Wave* como forçante para as equações do módulo *Delft3D-flow*. A interação entre os dois módulos acontece a cada passo de tempo pré-determinado pelo usuário. No presente estudo esta comunicação foi realizada a cada 30 minutos (resolução temporal dos dados de ondas).

4.7 Módulo Wave:

O módulo *Wave* será utilizado para simular a propagação aleatória de ondas curtas geradas pelo vento em águas costeiras. O modelo numérico de terceira geração simula evolução de ondas geradas pelo vento em regiões costeiras, para batimetrias profundas, intermediárias e rasas. Baseado na equação do balanço de ação. O modelo replica a refração causada pela batimetria e correntes. Esquemas de discretização totalmente implícitos foram implementados para garantir robustez computacional e redução no esforço computacional.

Com esse módulo é possível calcular a geração e propagação de ondas geradas pelo vento, a interação e dissipação não linear de onda para dada batimetria, o campo de ventos, o nível da água e o campo de correntes em águas de profundidades intermediárias a rasas (Holthuijsen, Booij, and Herbers 1989). O modelo *SWAN* (Simulation Waves Nearshore) baseia-se na equação espectral discreta do balanço de energia da onda e é utilizado como base de cálculos para o módulo de ondas do *Delft3d* (Ris and Booij 1999).

4.8 Modelos numéricos:

Parte dos conjuntos de dados trabalhados foram utilizados na confecção dos modelos numéricos. As constantes astronómicas extraídas do *TPXO*, foram utilizadas na inicialização do modelo hidrodinâmico *flow*, ao passo que o módulo de ondas *SWAN*, foi inicializado com condições extraídas do *WWIII* conforme fluxograma (figura 16). A tabela 1 exemplifica os parâmetros utilizados em cada cenário. Com o objetivo de avaliar a influência relativa das diferentes condições forçantes de correntes de retorno, experimentos numéricos foram elaborados de forma a testar a sensibilidade das correntes de retorno a esses parâmetros. Assim, foram testados parâmetros relacionados a variações morfológicas e das forçantes das ondas modeladoras das correntes de retorno (Altura, Período e Direção) e também fatores relacionados à fase de maré. A Tabela 1 resume os experimentos analisados. Os experimentos realizados, utilizam condições morfológicas e ambientais existentes nas praias de interesse. No entanto, os cenários definidos para as simulações não foram validados com dados obtidos *in situ*. De qualquer forma, como o objetivo do trabalho é a análise comparativa entre as condições existentes, os resultados permitem avaliar a importância relativa de cada condição analisada no padrão e distribuição de correntes de retorno na área de interesse.

Tabela 1 Resumo dos parâmetros de configuração dos modelos utilizados nas análises de sensibilidade os valores em vermelho representam os máximos observados a partir da análise climatológica (eventos extremos).

Análise I (morfologia)			Análise III (altura significativa)			Análise IV (Período)		
Condição de contorno		Topografia	Hs (m)	T (s)	Dir	Hs (m)	T (s)	Dir
WWIII	Batimetria interpolada		0.75	9	Sul	1.5	7	Sul
			1.25	9	Sul	1.5	9	Sul
WWIII	Topografia plana (Z=2)		1.75	9	Sul	1.5	11	Sul
			2.25	9	Sul	1.5	13	Sul
WWIII	Topografia em gradiente 0<Z<2		2.75	9	Sul	1.5	15	Sul
			3.25	9	Sul	1.5	17	Sul
			3.75	9	Sul	1.5	19	Sul
			4.5	9	Sul	1.5	7	Sudeste
Análise II (Direção)			0.75	9	Sudeste	1.5	9	Sudeste
			1.25	9	Sudeste	1.5	11	Sudeste
Hs (m)	T (s)	Dir	1.75	9	Sudeste	1.5	13	Sudeste
1.25	9	Sul	2.25	9	Sudeste	1.5	15	Sudeste
1.25	9	Sudeste	2.75	9	Sudeste	1.5	17	Sudeste
1.25	9	Leste	3.25	9	Sudeste	1.5	19	Sudeste
			3.75	9	Sudeste	1.5	7	Leste
			4.5	9	Sudeste	1.5	9	Leste
			0.75	9	Leste	1.5	11	Leste
			1.25	9	Leste	1.5	13	Leste
			1.75	9	Leste	1.5	15	Leste
			2.25	9	Leste	1.5	17	Leste
			2.75	9	Leste	1.5	19	Leste
			3.25	9	Leste			
			3.75	9	Leste			
			4.5	9	Leste			

5. Resultados e discussão:

Nesta seção abordamos e discutimos os principais resultados obtidos em subtópicos seguindo uma ordem apresentada na tabela 1.

5.1 Análise climatológica de ondas:

As interpretações realizadas a partir dos dados do modelo global *WaveWatch III*, os dados foram agrupados em classes de Altura (Hs) e Período (T) correlacionados com suas respectivas direções de incidência. As análises foram conduzidas em etapas, primeiramente toda a série temporal foi interpretada, para então análises sazonais serem levadas em consideração. Em todas as análises realizadas tanto na climatológica quanto nas sazonais 3 direções merecem destaque, por serem as mais expressivas e colaborarem por mais de 90% das incidências, são elas, Sul, Leste e Sudeste seguindo essa

ordem de importância. Para a criação dos modelos numéricos foram tomadas como significativas, as classes com percentagem de ocorrência superior a 5%.

Figura 25 mostra que a região sofre a incidência majoritária de ondas vindas de sul, leste e sudeste, este panorama representa bem a região estando em conformidade com o que foi descrito por Silva et al, 2014 (Figura 8).

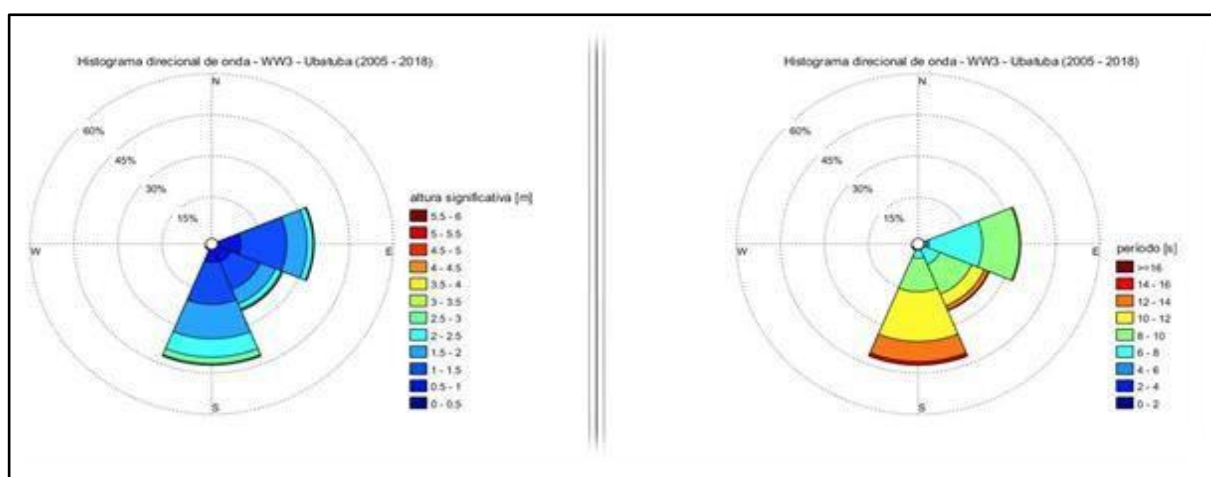


Figura 25 Histogramas direcionais de altura (esquerda) e período de onda (direita) criados a partir da série climatológica WaveWatch III.

A Tabela 2 mostra a percentagem das alturas em relação a direção, estando destacadas em vermelho, as percentagens de ocorrência superiores a 5%. Ao longo do período amostrado evidencia-se a predominância de ondas do quadrante sul, contabilizando 42,157% do total de incidências, seguidas pelo quadrante leste representando 32,979% e as ondas de Sudeste com 24,338% das ocorrências registradas, representando 99,474% do total das ondas analisadas. Em relação às alturas, as predominâncias foram de 42,24% para ondas entre 1.0-1.5m, 25,379% para ondas entre 1.5-2.0m, 17,237% para ondas no intervalo entre 0.5-1.0m e 10,955% para as ondas entre 2.0-2.5m, representando, do total 95,1% das alturas amostradas.

Tabela 2 Percentagens das classes de altura de onda (Hs) em relação a suas direções de propagação. Análise climatológica dos dados Wave Watch III (2005-2018).

		Direção								
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total
Hs	0-0.5m	0	0	0.098389	0.024597	0.024597	0	0	0	0.147583
	0.5-1.0m	0	0.004919	7.694011	4.963719	4.543107	0.027057	0.00246	0.00246	17.23773
	1.0-1.5m	0.00246	0.00246	15.75944	10.91871	15.38064	0.150043	0.024597	0.00246	42.24081
	1.5m-2.0m	0	0	7.024966	5.625384	12.5618	0.159882	0.007379	0	25.37941
	2.0-2.5m	0	0	2.014512	2.105522	6.742098	0.093469	0	0	10.9556
	2.5-3.0m	0	0	0.305006	0.519001	2.353954	0.024597	0	0	3.202558
	3.0-3.5m	0	0	0.063953	0.140204	0.464887	0.019678	0	0	0.688722
	3.5-4.0m	0	0	0.017218	0.019678	0.078711	0	0	0	0.115607
	4.0-4.5m	0	0	0.00246	0.022137	0.007379	0	0	0	0.031976
Total		0.00246	0.007379	32.97995	24.33895	42.15718	0.474726	0.034436	0.004919	100

Em relação aos períodos de onda, é observado que 36,56% das ondas para o intervalo amostrado, apresentam períodos de 8.0-10s, sendo, 12,57% ondas oriundas do quadrante leste, 12,21% do quadrante sul e 11,736% do Sudeste. Ondas de períodos entre 6.0-8.0s representam 27,2% do total amostrado, sendo que 18,31% são ondas do quadrante leste, e 5,83% do quadrante sudeste. 23,22% são ondas cujos períodos variam entre 10-12s dos quais as ondas de sul contribuem com 18,164% da percentagem, os 9% restantes que somados representam 96% do total de períodos amostrados, contam com 7,323%, desta percentagem, de ondas vindos de sul, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 Percentagem das classes de período de onda (T) em relação a suas direções de propagação. Análise climatológica dos dados Wave Watch III (2005-2018).

		Direção								
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total
T	0-2s	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2-4s	0.00246	0.00492	0.02706	0.00492	0.00492	0.034439	0.00738	0.00492	0.091019
	4-6s	0	0.00246	1.635876	0.189417	0.282896	0.233697	0.02706	0	2.371405
	6-8s	0	0	18.31197	5.830115	2.900298	0.159898	0	0	27.20228
	8-10s	0	0	12.57042	11.73649	12.21126	0.046739	0	0	36.56491
	10-12s	0	0	0.437874	4.622273	18.16437	0	0	0	23.22452
	12-14s	0	0	0	1.677696	7.323313	0	0	0	9.001009
	14-16s	0	0	0	0.265676	1.129124	0	0	0	1.3948
	16-18s	0	0	0	0.01476	0.135298	0	0	0	0.150058
Total		0.00246	0.00738	32.9832	24.34134	42.15148	0.474773	0.034439	0.00492	100

A Tabela 4 apresenta a relação entre altura e período de onda. Desta análise, podemos concluir que ondas com período inferior a 6 s e superior a 14 s não contabilizam porcentagem expressiva no clima de ondas da região, o mesmo vale para alturas inferiores a 0.5 m e superiores a 2.5 m. As ondas mais recorrentes apresentam períodos entre 8.0-10s e alturas entre 1.0-1.5 m, contribuindo com 17,27 % do total amostrado, a segunda maior influência envolve ondas com períodos de 6.0-8.0s e alturas entre 1.0-1.5 m, contribuindo com 12,22 % do total. A menor contribuição, dentro do intervalo expressivo estipulado (<5 %) vem das ondas com períodos de 8.0-10 s e alturas variando entre 0.5-1.0 m.

Tabela 4 Percentagens das classes de altura de onda (Hs) em relação ao período (T). Análise climatológica dos dados Wave Watch III (2005-2018).

		T									
		0-2s	2-4s	4-6s	6-8s	8-10s	10-12s	12-14s	14-16s	16-18s	Total
Hs	0-0.5m	0	0.00246	0.00492	0.098399	0.0246	0.0123	0	0.00492	0	0.147598
	0.5-1.0m	0	0.046739	0.334555	8.078522	5.47834	2.302526	0.752749	0.196797	0.044279	17.23451
	1.0-1.5m	0	0.041819	1.138963	12.22848	17.27633	8.395857	2.607562	0.474773	0.076259	42.24004
	1.5m-2.0m	0	0	0.797028	4.838749	9.451182	7.212615	2.75024	0.322255	0.00984	25.38191
	2.0-2.5m	0	0	0.095939	1.781014	3.185653	3.918723	1.744115	0.223857	0.00738	10.95668
	2.5-3.0m	0	0	0	0.150058	0.917567	1.148803	0.841308	0.137758	0.00738	3.202873
	3.0-3.5m	0	0	0	0.0246	0.182037	0.194337	0.255836	0.02706	0.00492	0.68879
	3.5-4.0m	0	0	0	0.00246	0.044279	0.034439	0.03198	0.00246	0	0.115618
	4.0-4.5m	0	0	0	0	0.00492	0.00492	0.01722	0.00492	0	0.03198
	Total	0	0.091019	2.371405	27.20228	36.56491	23.22452	9.001009	1.3948	0.150058	100

5.1.1 Análise sazonal:

Uma vez compreendido o comportamento da série temporal do clima de ondas como um todo, os dados foram agrupados de modo que se pudesse avaliar características sazonais específicas. Os dados correspondentes aos meses de dezembro, janeiro e fevereiro correspondem ao verão, março, abril e maio, Outono. Junho, julho e agosto, Inverno e setembro, outubro e novembro pertencem à Primavera.

5.1.1.1 Verão:

Durante os meses de verão existe uma distribuição equilibrada nas direções das ondas, quando as ondas dos quadrantes Sul e Leste colaboram com 37,9 % e 37,62 % respectivamente. O setor Sudeste, terceiro mais expressivo, colabora com 24 % do total. A Figura 26 representa um resumo das condições de altura e período. As Tabelas 5 e 6 fornecem um demonstrativo em termos numéricos. Ondas com alturas entre 1.0-1.5 m são as mais recorrentes e colaboram com 41,6 % do total de ondas analisadas.

Em relação ao período, as maiores influências recaem sobre ondas cujos períodos se encontram entre 8.0-10 s e 6.0-8.0 s 33,4 % e 30 %, respectivamente.

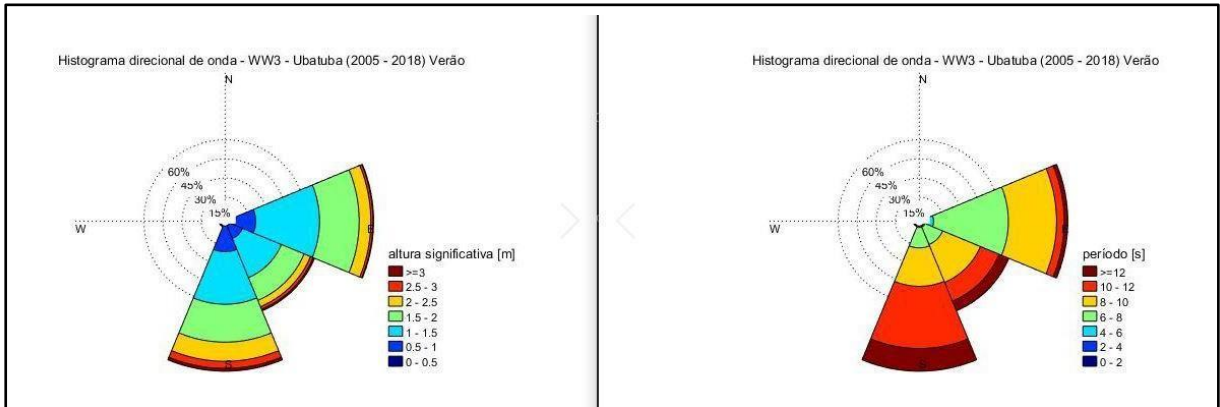


Figura 26 Histogramas direcionais de altura (esquerda) e período de onda (direita) criados a partir dos dados WaveWatch III, para os meses de verão.

Tabela 5 Percentagens das classes de altura de onda (Hs) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Verão).

		Direção							
Verão		NE	E	SE	S	SW	W	TOTAL (%)	
Hs	0-0.5m	0	0.011416	0.022831	0	0	0	0.034247	
	0.5-1.0m	0.022831	6.712329	3.618721	6.712329	0	0	17.06621	
	1.0-1.5m	0	16.73516	11.03881	13.73288	0.045662	0.034247	41.58676	
	1.5m-2.0m	0	10.3653	6.438356	9.89726	0.068493	0	26.76941	
	2.0-2.5m	0	3.047945	1.803653	5.011416	0.171233	0	10.03425	
	2.5-3.0m	0	0.570776	0.742009	1.849315	0.034247	0	3.196347	
	3.0-3.5m	0	0.159817	0.285388	0.6621	0	0	1.107306	
	3.5-4.0m	0	0	0.10274	0.068493	0	0	0.171233	
	4.0-4.5m	0	0	0.022831	0.011416	0	0	0.034247	
TOTAL (%)		0.022831	37.60274	24.07534	37.94521	0.319635	0.034247	100	

Tabela 6 Percentagens das classes de período de onda (T) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Verão).

		Direção							
Verão		NE	E	SE	S	SW	W	TOTAL (%)	
T	2-4s	0.011423	0.03427	0	0.045693	0	0.011423	0.10281	
	4-6s	0	2.433173	0.354124	0.365547	0.057117	0.011423	3.221385	
	6-8s	0	19.59104	4.98058	5.300434	0.13708	0	30.00914	
	8-10s	0	12.6228	10.70368	10.05255	0.011423	0	33.39045	
	10-12s	0	1.976239	5.311857	16.26685	0.079963	0	23.63491	
	12-14s	0	0.799634	2.376057	5.300434	0.03427	0	8.510395	
	14-16s	0.011423	0.17135	0.365547	0.571167	0	0.011423	1.130912	
TOTAL (%)		0.022847	37.62851	24.09184	37.90267	0.319854	0.03427	100	

5.1.1.2 Outono:

Para o outono, temos uma leve predominância de ondas do quadrante sul sobre os demais, 41 %, representando a incursão de frentes frias, que começam a ganhar mais destaque a partir desta época do ano. Durante esta época, ondas de sudeste se destacam, representando 31,27 % do total analisado. Em terceiro as ondas de leste contribuem com 26,75 % do total. Em relação às alturas de onda, permanecem as ondas com 1.0-1.5 m tendo a maior incidência, 38,3 % do total, a contribuição de ondas com alturas superiores a essa faixa começa a ganhar mais destaque a partir desta época, atingindo um ápice no inverno. Analogamente para período de onda, observamos um crescente para períodos superiores a 10 s, contudo a faixa de maior predominância continua sendo aquela compreendida entre 8.0-10 s, conforme mostra a figura 27 e Tabelas 7 e 8.

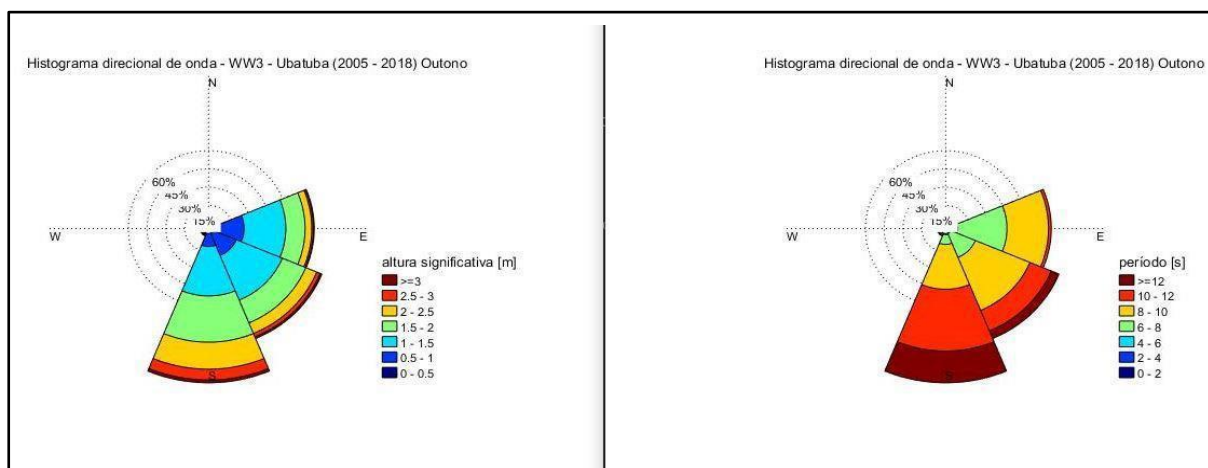


Figura 27 Histogramas direcionais de altura (esquerda) e período de onda (direita) criados a partir dos dados WaveWatch III, para os meses de Outono.

Tabela 7 Percentagens das classes de altura de onda (Hs) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Outono).

	Direção									
	Outono	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)
Hs	0-0.5m	0	0	0.136986	0.022831	0.011416	0	0	0	0.171233
	0.5-1.0m	0	0.011416	7.922374	6.598174	3.561644	0.079909	0.011416	0.011416	18.19635
	1.0-1.5m	0.011416	0.011416	11.13014	13.26484	13.56164	0.319635	0.011416	0.011416	38.32192
	1.5m-2.0m	0	0	5.125571	6.73516	12.71689	0.239726	0	0	24.81735
	2.0-2.5m	0	0	1.780822	3.1621	7.408676	0.148402	0	0	12.5
	2.5-3.0m	0	0	0.43379	0.993151	2.968037	0.057078	0	0	4.452055
	3.0-3.5m	0	0	0.136986	0.308219	0.696347	0.034247	0	0	1.175799
	3.5-4.0m	0	0	0.079909	0.091324	0.079909	0	0	0	0.251142
	4.0-4.5m	0	0	0.011416	0.10274	0	0	0	0	0.114155
TOTAL (%)	0.011416	0.022831	26.75799	31.27854	41.00457	0.878995	0.022831	0.022831	100	

Tabela 8 Percentagens das classes de período de onda (T) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Outono).

		Direção								
	Outono	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)
T	2-4s	0.011421	0.011421	0.022841	0	0.011421	0.091366	0.011421	0.022841	0.182732
	4-6s	0	0.011421	1.861581	0.114207	0.30836	0.399726	0.011421	0	2.706715
	6-8s	0	0	13.08817	7.080859	2.661032	0.30836	0	0	23.13842
	8-10s	0	0	11.04386	15.72636	12.32298	0.079945	0	0	39.17314
	10-12s	0	0	0.753769	6.110096	16.99406	0	0	0	23.85793
	12-14s	0	0	0	2.078575	7.674737	0	0	0	9.753312
	14-16s	0	0	0	0.182732	1.005025	0	0	0	1.187757
	TOTAL (%)	0.011421	0.022841	26.77021	31.29283	40.97762	0.879397	0.022841	0.022841	100

5.1.1.3 Inverno:

Os meses de inverno tiveram representação bem característica, com ondas mais intensas e períodos mais elevados dominando boa parte das incidências, a Figura 28 resume o comportamento geral. Neste caso temos uma dominância das ondas do quadrante sul, representando 45 % do total. Da tabela 9 observamos ainda, a predominância de ondas cujas alturas variam entre 1.0 e 1.5m (40,34 %), mas com contribuições cada vez mais expressivas de ondas maiores, 26 % para ondas entre 1.5-2.0 e 13,58 % para ondas de 2.0-2.5 m. Em função da influência de ventos remotos em ondas relacionadas à passagem de frentes frias, o período de onda também é maior nessa época. Ondas com períodos entre 10-12 s representam cerca de um quarto da distribuição, 24 %. Ainda assim, cerca de 40 % é representado por ondas cujo período oscila entre 8 e 10 s, conforme tabela 10.

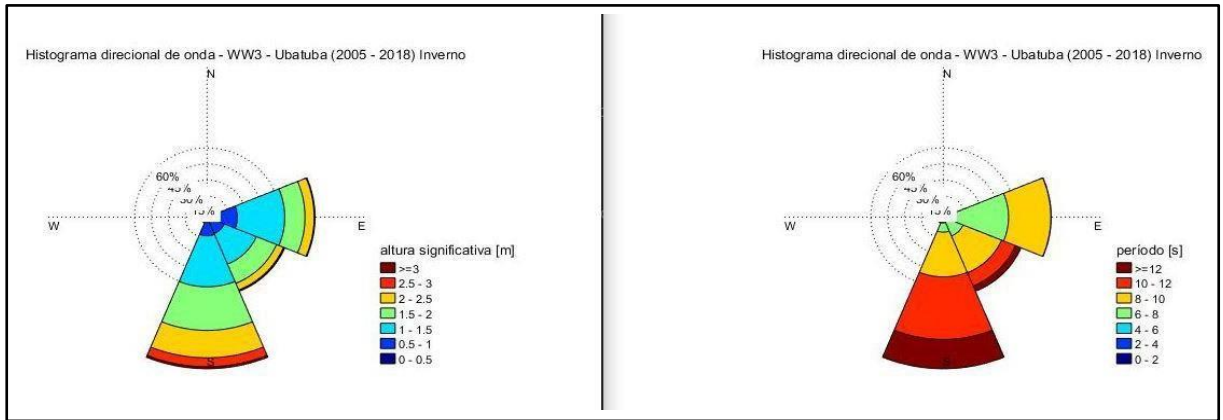


Figura 28 Histogramas direcionais de altura (esquerda) e período de onda (direita) criados a partir dos dados WaveWatch III, para os meses de Inverno.

Tabela 9 Percentagens das classes de altura de onda (Hs) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Inverno).

	Inverno	Direção					TOTAL (%)
		E	SE	S	SW	W	
Hs	0-0.5m	0.034247	0.034247	0.022831	0	0	0.091324
	0.5-1.0m	7.442922	3.961187	4.257991	0	0	15.6621
	1.0-1.5m	14.05251	10.2968	15.879	0.10274	0.011416	40.34247
	1.5m-2.0m	6.004566	6.438356	13.56164	0.148402	0	26.15297
	2.0-2.5m	2.716895	2.260274	8.515982	0.091324	0	13.58447
	2.5-3.0m	0.262557	0.33105	2.785388	0.045662	0	3.424658
	3.0-3.5m	0	0.091324	0.502283	0.034247	0	0.627854
	3.5-4.0m	0	0	0.114155	0	0	0.114155
TOTAL (%)	30.5137	23.41324	45.63927	0.422374	0.011416	100	

Tabela 10 Percentagens das classes de período de onda (T) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Inverno).

	Inverno	Direção					TOTAL (%)
		E	SE	S	SW	W	
T	2-4s	0	0	0	0.034337	0	0.034337
	4-6s	1.007211	0.091565	0.297585	0.148792	0.011446	1.556598
	6-8s	16.88223	4.738469	2.861394	0.148792	0	24.63088
	8-10s	12.59013	12.407	13.94071	0.091565	0	39.02942
	10-12s	0.114456	4.429438	19.52615	0	0	24.07005
	12-14s	0	1.568044	7.496852	0	0	9.064896
	14-16s	0	0.240357	1.373469	0	0	1.613826
	TOTAL (%)	30.59403	23.47488	45.49617	0.423486	0.011446	100

5.1.1.4 Primavera:

Durante os meses de primavera, há um aumento na representatividade do quadrante leste (38,8 %), em contrapartida uma redução nas ondas vindas de sudeste (18,57 %). Ondas do quadrante Sul são as mais frequentes, com 42 % do total de ondas analisadas. Em relação às alturas, manteve-se a dominância das ondas de 1 a 1.5 m (47,53 %). Nessa época a influência de ondas com períodos baixos, entre 6 e 8 s, aumentou para 30,38%. Os períodos dominantes continuam sendo entre 8 e 10 s (Figura 29 e Tabelas 11 e 12).

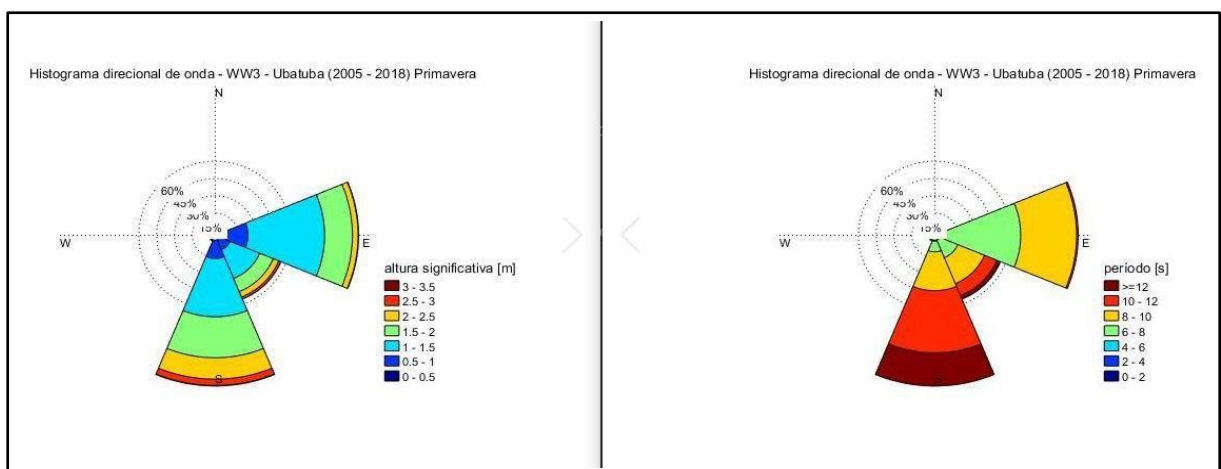


Figura 29 Histogramas direcionais de altura (esquerda e período de onda (direita) criados a partir dos dados WWIII para os meses de Primavera.

Tabela 11 Percentagens das classes de altura de onda (Hs) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Primavera).

		Direção					
		Primavera E	SE	S	SW	W	TOTAL (%)
Hs	0-0.5m	0.125571	0	0	0	0	0.125571
	0.5-1.0m	7.682648	3.127854	5.262557	0.034247	0	16.10731
	1.0-1.5m	21.48402	8.995434	16.88356	0.125571	0.045662	47.53425
	1.5m-2.0m	7.785388	4.109589	11.82648	0.136986	0.022831	23.88128
	2.0-2.5m	1.598174	1.689498	6.187215	0.057078	0	9.531963
	2.5-3.0m	0.148402	0.650685	1.826484	0.011416	0	2.636986
	3.0-3.5m	0	0	0.159817	0.022831	0	0.182648
TOTAL (%)		38.8242	18.57306	42.14612	0.388128	0.068493	100

Tabela 12 Percentagens das classes de período de onda (T) em relação a suas direções de propagação. Análise sazonal dos dados Wave Watch III (Primavera).

	Primavera	Direção					TOTAL (%)
		E	SE	S	SW	W	
T	0-2s	0	0	0	0	0	0
	2-4s	0.022896	0	0.011448	0.022896	0.011448	0.068689
	4-6s	1.053234	0.114482	0.286205	0.240412	0.057241	1.751574
	6-8s	21.69433	5.495135	3.102461	0.091586	0	30.38351
	8-10s	15.71837	8.139668	11.23068	0.034345	0	35.12307
	10-12s	0.44648	3.74356	18.01946	0	0	22.2095
	12-14s	0	1.041786	7.842015	0	0	8.883801
	14-16s	0	0.091586	1.488266	0	0	1.579851
	TOTAL (%)	38.93532	18.62622	41.98054	0.389239	0.068689	100

5.2 Diagnóstico visual de imagens de satélite, mapas de Kernel:

Séries históricas de imagens de satélite obtidas a partir do programa Google Earth Pro (2003 a 2019), permitiram a avaliação da ocorrência e distribuição de correntes de retorno na área de interesse (Figuras 30 a 33). Foi extraída uma composição, de todas as imagens, das feições indicativas de correntes de retorno para a confecção dos mapas de Kernel. Nos mapas a intensificação das cores representa probabilidade de ocorrência, ou seja, as regiões de cores mais quentes indicam regiões mais prováveis para a ocorrência de correntes de retorno.

A estimativa visual é passível de erros seja superestimação ou subestimação do número, posicionamento e dimensão das correntes de retorno. É um método muito subjetivo e com baixa reprodutibilidade. O resultado final é muito dependente da capacidade técnica do analista em inferir o que deve ou não ser considerado corrente de retorno. As imagens representam um retrato instantâneo da condição da praia. No entanto, apesar das limitações, na ausência de dados medidos in situ, o método se mostra útil na descrição geral do padrão e distribuição das correntes de retorno. O mapa de Kernel pode ser considerado uma análise confiável na identificação de padrões bem determinados. Ainda assim é recomendável que venha acompanhado de outras técnicas, ou fontes de informação para dar suporte a veracidade da informação.

5.2.1 Praia das Toninhas:

A praia das Toninhas concentrou as correntes no centro e no canto direito da praia. Apesar de sua longa extensão o total de indícios de correntes de retorno analisados foi de 74, supõe-se dois fatores para explicar esse número, relativamente baixo. Primeiro, a grande extensão do promontório no canto esquerdo promove uma forte zona de sombra no setor, que pode ser melhor visualizado nas Figuras 3 e 30, isso torna a região menos ativa. O segundo fator é de que o canto esquerdo é direcionado para Leste

diferente das outras praias analisadas em que a linha de costa está voltada para Sul e Sudeste. A composição histórica das imagens de satélite pode ter subestimado esta sazonalidade. No entanto, a média para esta praia foi de 2.75 indícios de corrente, mediana igual a 2 e desvio padrão de 1.4. O máximo e o mínimo valor registrados foram de 6 e 1 corrente respectivamente.

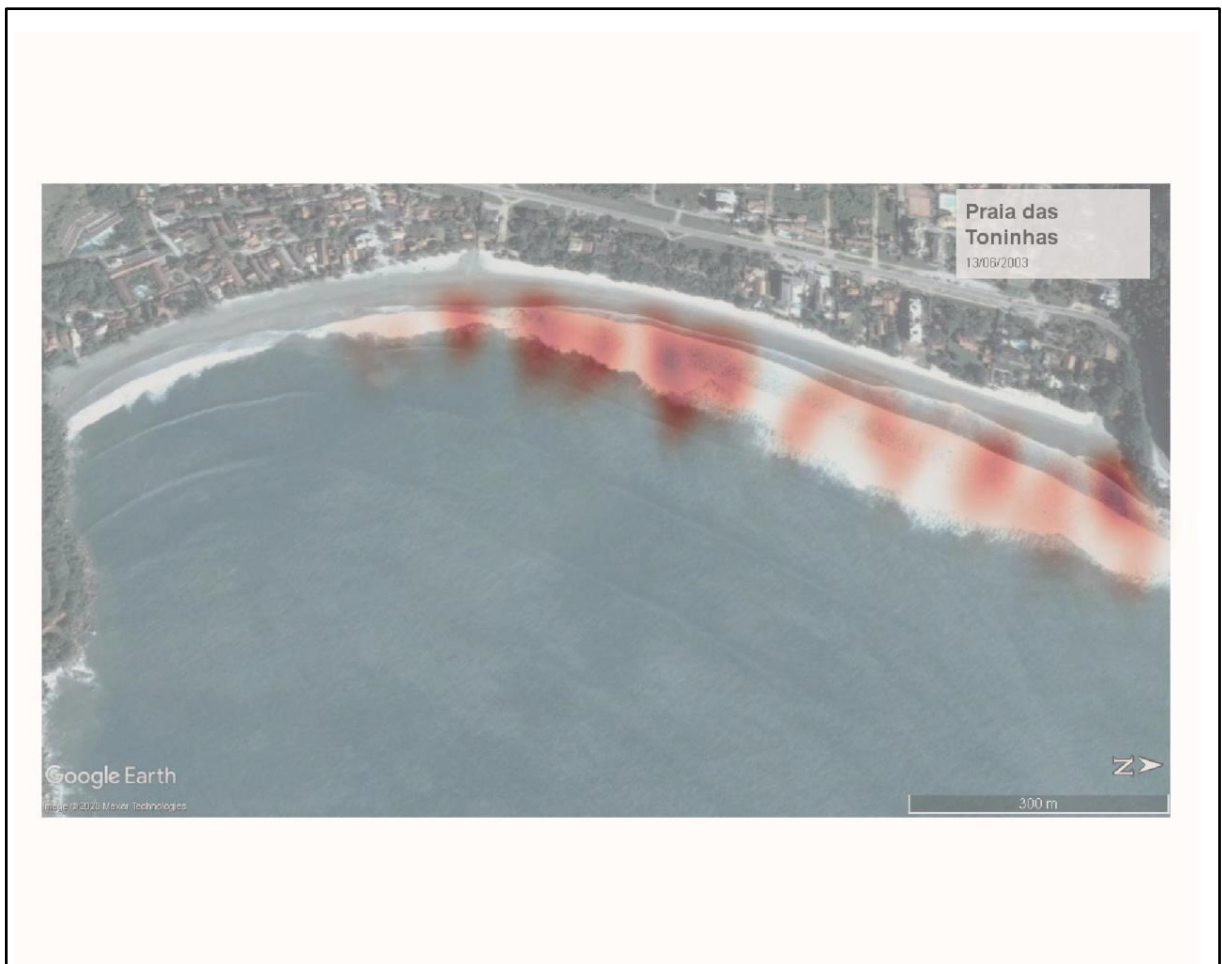


Figura 30 Mapa indicativo de zonas de maior probabilidade de ocorrência de correntes de retorno. Praia das Toninhas.

5.2.2 Praia Grande:

Praia Grande, como esperado, por ser a mais extensa entre as praias estudadas, foi a que apresentou maior número de zonas com alta probabilidade de ocorrência de correntes de retorno. Duas correntes de borda em cada uma das extremidades da praia foram bem determinadas. No canto esquerdo a presença de um córrego marcou bem a presença de uma corrente de retorno na região (Figura 31). Foram contabilizadas 105 feições características no decorrer da análise das 21 imagens. A média para o período foi de 3.85 correntes, mediana igual a 4 e desvio padrão de 2.18. Foi registrado um máximo de 10 correntes e um mínimo de apenas uma corrente em determinadas datas.

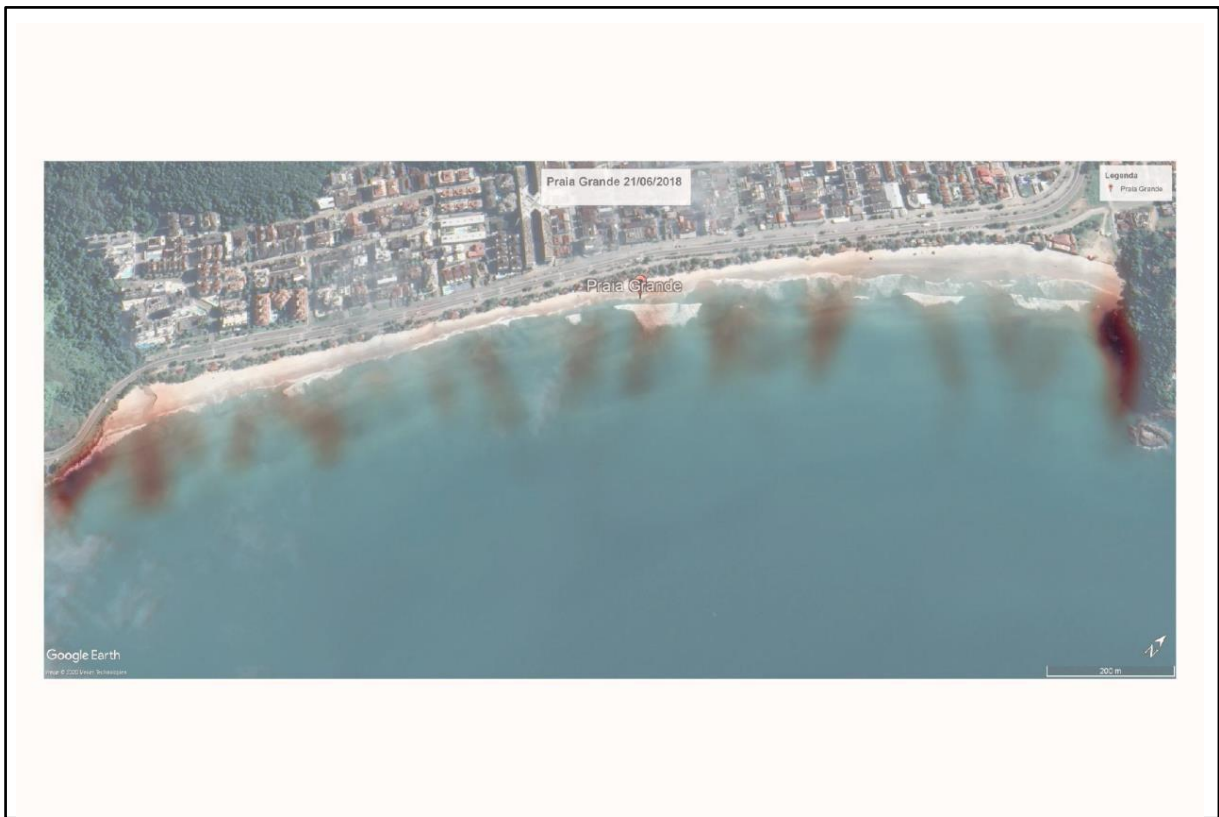


Figura 31 Mapa indicando zonas de maior probabilidade de ocorrência de correntes de retorno. Praia Grande

5.2.3 Praia do Tenório:

A praia do Tenório se comportou como uma típica “praia confinada” ou praia de baía, com a presença bem determinada de uma única corrente de retorno de borda, na extremidade esquerda, ou sul, contornando o costão rochoso (Figura 32). Eventualmente em alguns casos outras correntes foram encontradas, contudo foram pouco expressivas, um máximo de 3 e um mínimo de 1 corrente foram registrados. A contagem total das feições encontradas foi de 33 indícios de corrente de retorno, a média para o período foi 1.7, a mediana igual a 2 e o desvio padrão igual a 0.72.

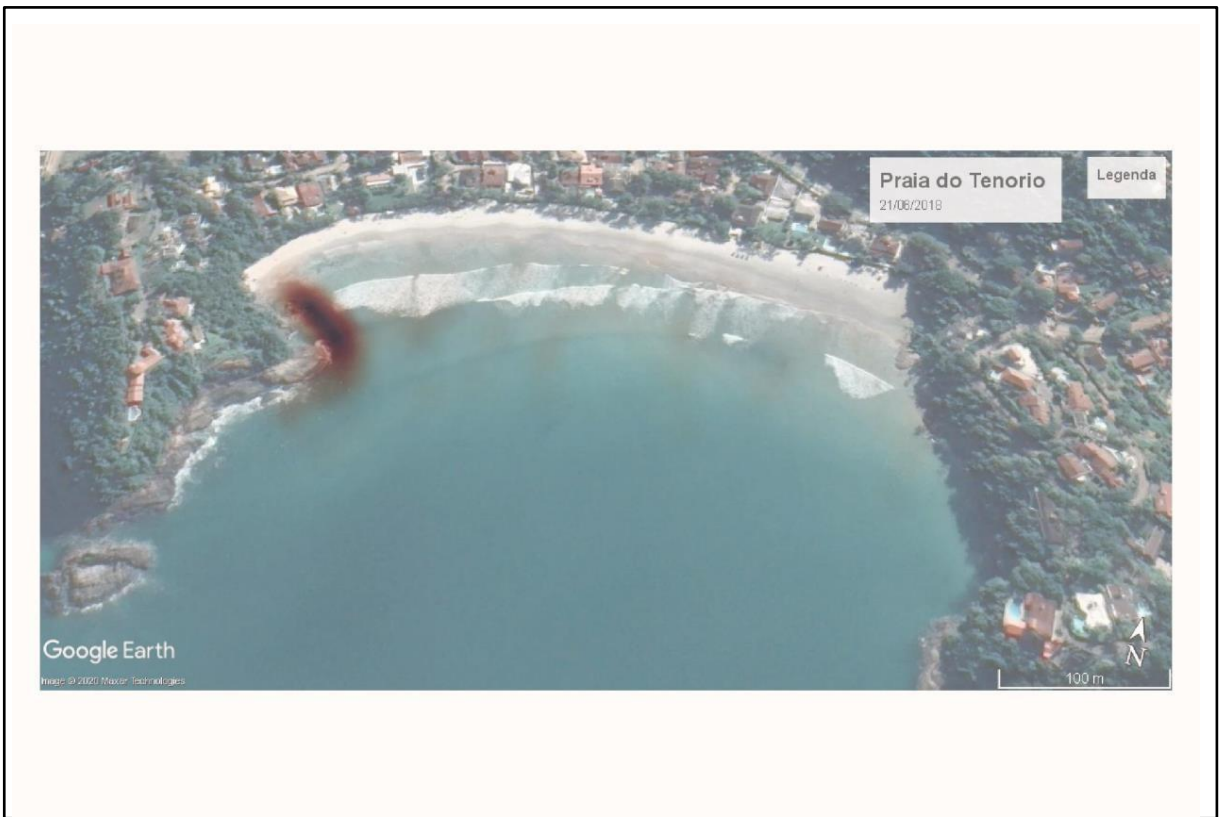


Figura 32 Mapa indicando zonas de maior probabilidade de ocorrência de correntes de retorno. Praia do Tenório

5.2.4 Praia Vermelha do Centro:

A praia Vermelha do Centro também apresentou alta probabilidade de ocorrência de correntes de borda em ambas as extremidades. Na extremidade direita verificou-se forte influência do córrego sobre o sistema de correntes de retorno, aumentando o potencial de formação de correntes naquele setor (Figura 33). O total de indícios contabilizaram 71 evidências, a média e mediana para o período foi de 3 correntes e desvio padrão igual a 1.58. Foi registrado um máximo de 6 e um mínimo de 1 corrente durante o período analisado.



Figura 33 Mapa indicando zonas de maior probabilidade de ocorrência de correntes de retorno. Praia Vermelha do Centro.

5.3 Modelagem numérica:

Nesta seção discutiremos os resultados encontrados através da técnica de modelagem numérica. Especificidades dos modelos e análises realizadas serão abordadas no decorrer deste tópico.

5.3.1 Análise de influência morfológica:

Essas análises têm o propósito de avaliar a influência da morfologia praiial sobre a formação dos sistemas de retorno. Para tal, três cenários morfológicos foram preparados e inseridos na região da faixa praiial. O primeiro cenário representa a morfologia a partir da interpolação dos valores batimétricos da zona de surfe para a faixa praiial (Figura 34). Esse cenário exclui porções emersas da praia. Este primeiro

cenário é protagonizado pela deriva litorânea, essencialmente unidirecional, em raros momentos ocorre convergência e geração de sistemas intermitentes. O modelo representa algumas correntes de contorno topográfico, que se formam nas adjacências de obstáculos físicos, como promontórios rochosos. A formação destes sistemas está associada ao fluxo gerado pela deriva litorânea, que ao encontrar uma barreira física, é direcionada para fora da costa, gerando uma corrente de retorno (Figura 35). Os poucos sistemas formados são fortemente influenciados pela maré, que direciona os sistemas conforme seu estado, figuras 40 e 41.

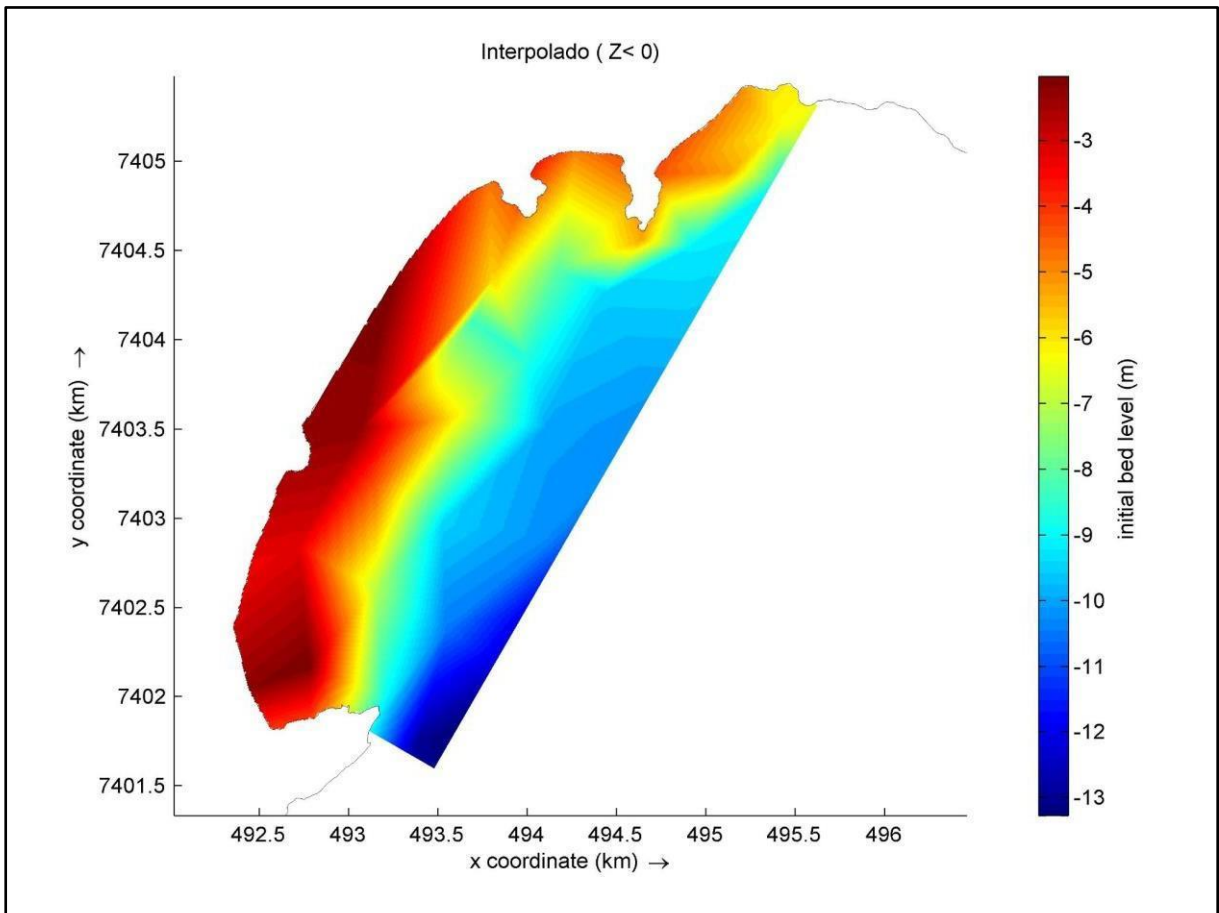


Figura 34 Malha batimétrica, com valores topográficos criados a partir de uma interpolação simples dos dados de batimetria.

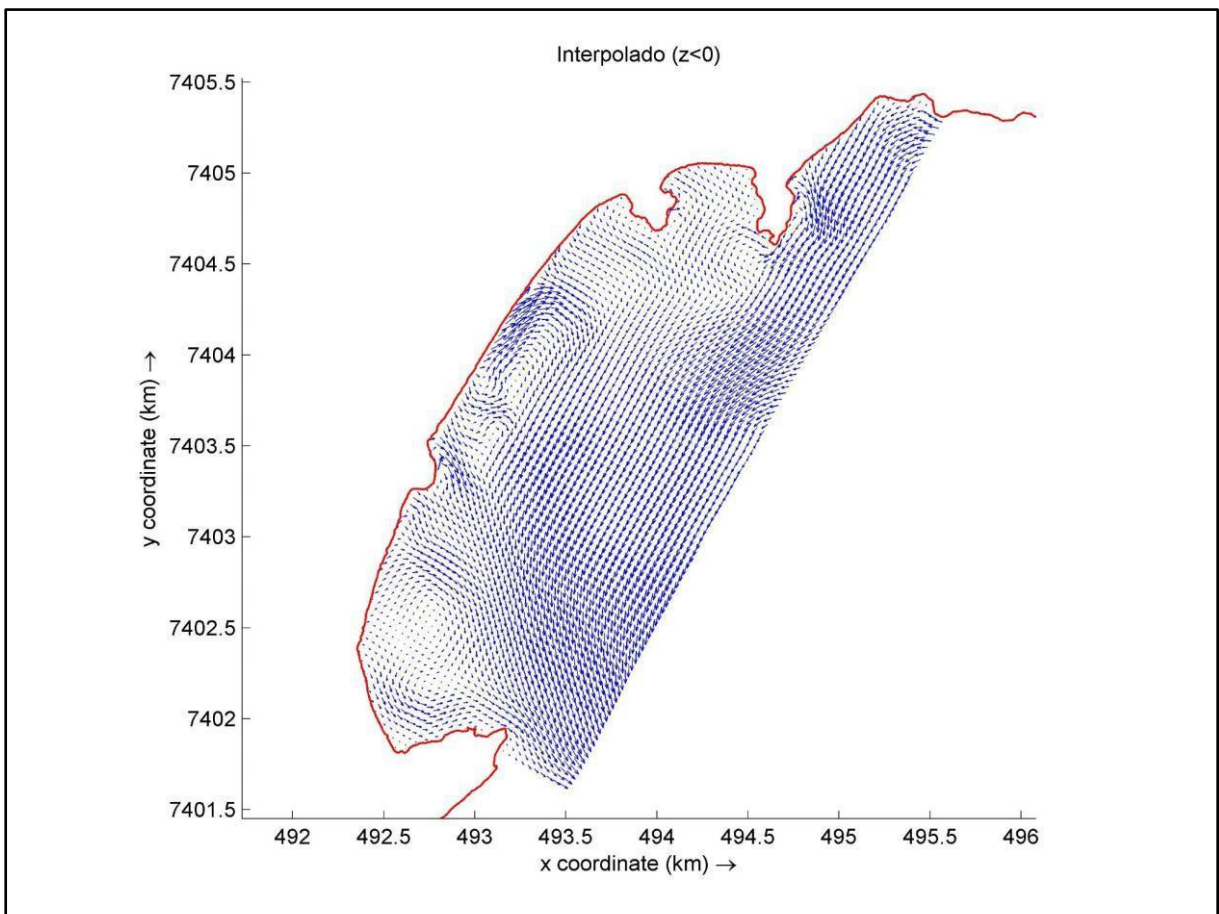


Figura 35 Campo vetorial de correntes, resultado do modelo criado a partir do arquivo de batimetria interpolado

O segundo cenário morfológico considera valores topográficos constantes na faixa de areia, com elevações inseridas de 2 m (Figura 36). O segundo cenário pouco difere do primeiro, as elevações de 2 m acabaram atuando como se o contorno terrestre (células secas) avançasse em direção ao oceano (Figura 37).

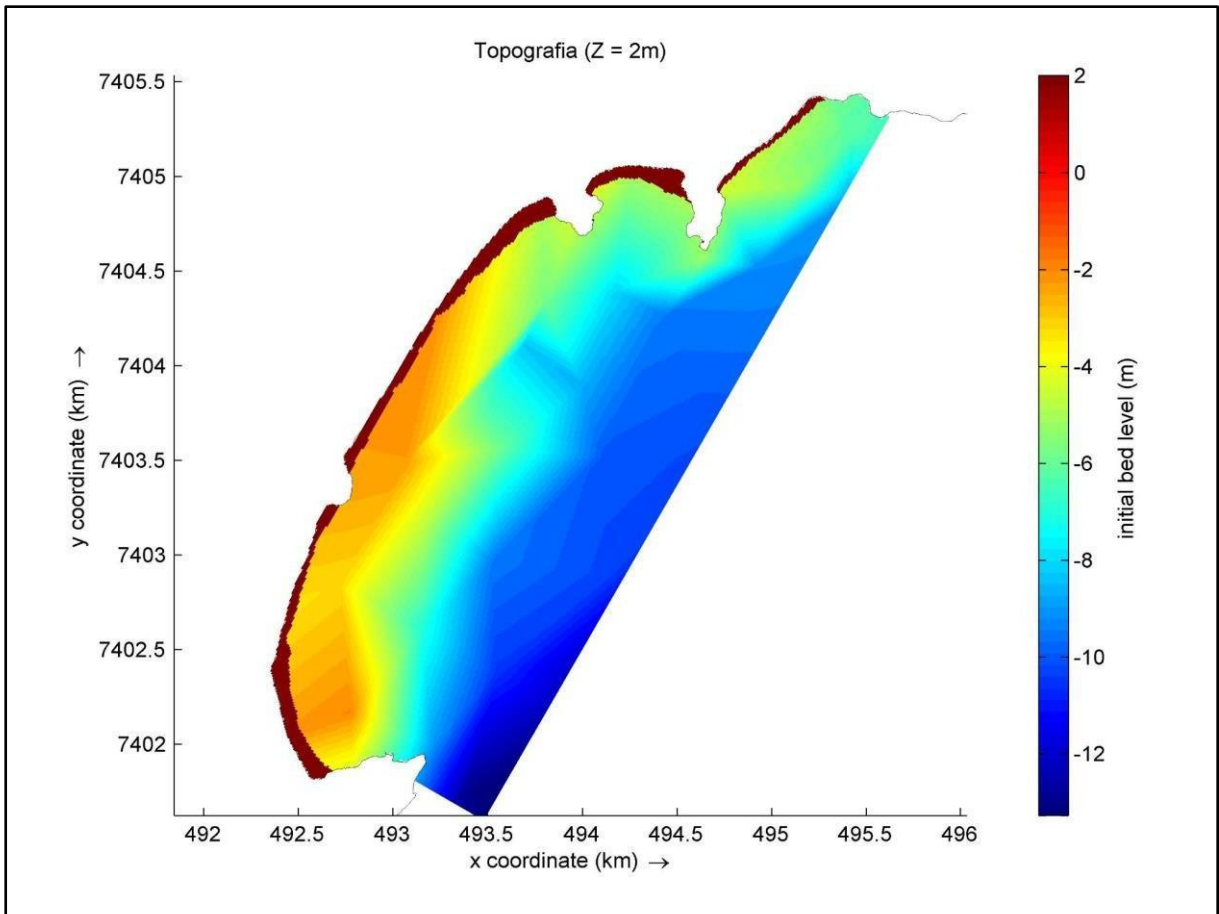


Figura 36 Malha batimétrica, com valores topográficos criados a partir da inserção de valores constantes e iguais a 2 na faixa praial.

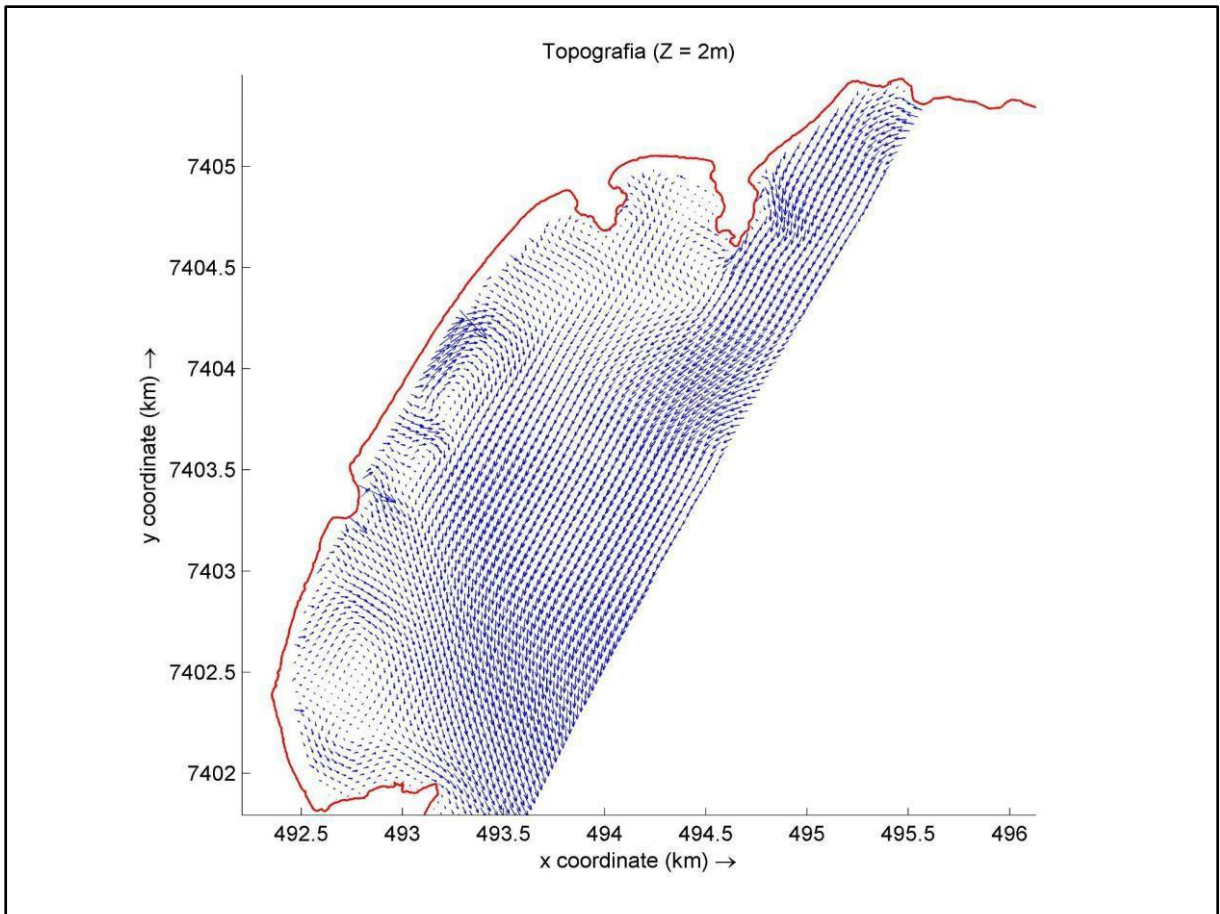


Figura 37 Campo vetorial de correntes, resultado do modelo criado a partir do segundo arquivo de batimetria.

O terceiro cenário morfológico apresenta condições mais realistas, a partir da topografia plana, com elevações de 2 metros foi aplicado um método de suavização com o intuito de se criar um gradiente topográfico entre zona de surfe e faixa praial, (figura 38). Neste cenário observamos um sistema bem definido originado pela convergência de correntes de deriva litorânea, na porção central da Praia Grande e outro menos intenso um pouco ao sul deste primeiro. Correntes de contorno margeando os promontórios que compartimentam as praias do Tenório e Vermelha do Centro, Praia Grande e Toninhas e uma mais sutil na ponta sul da Praia das Toninhas (Figura 39).

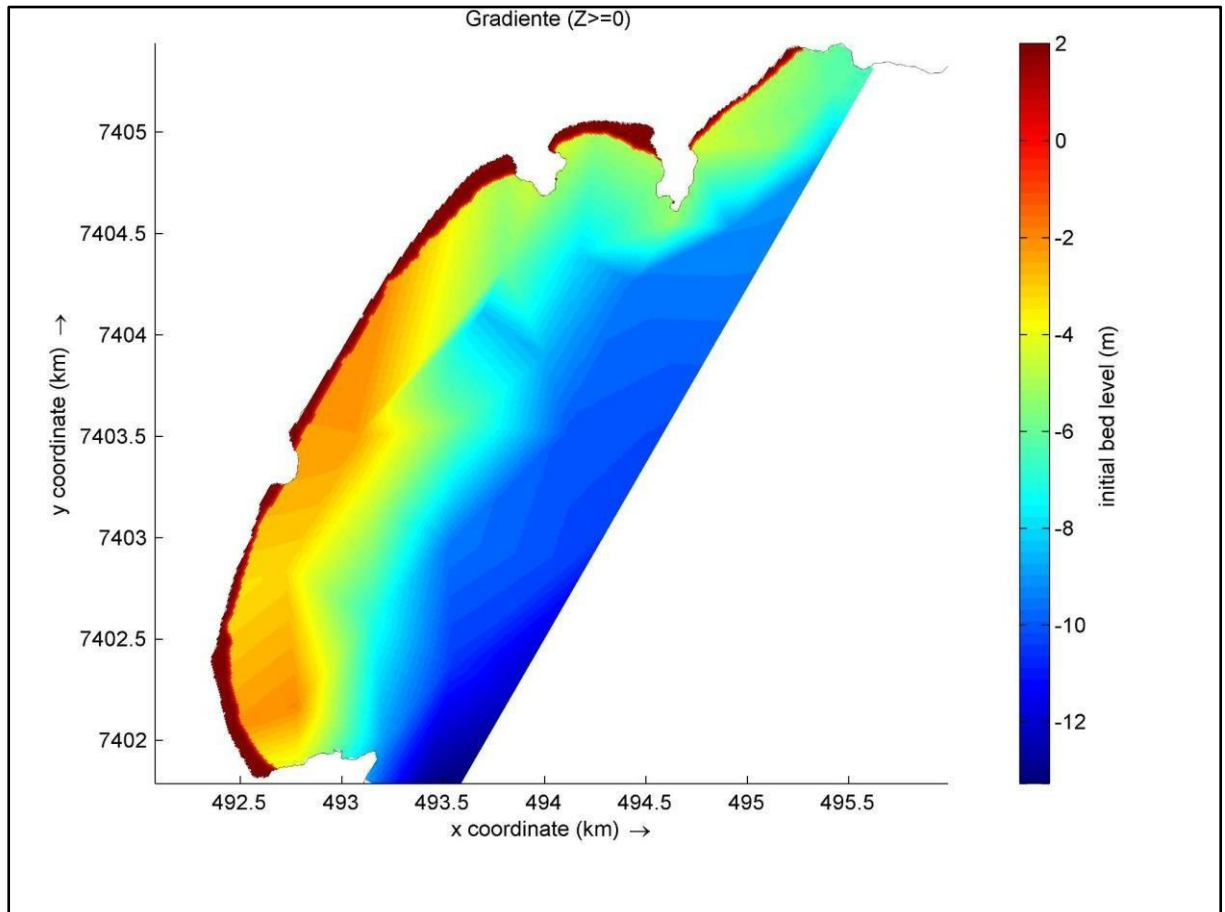


Figura 38 Malha batimétrica, com valores topográficos criados a partir da interpolação e posterior suavização dos dados de batimetria.

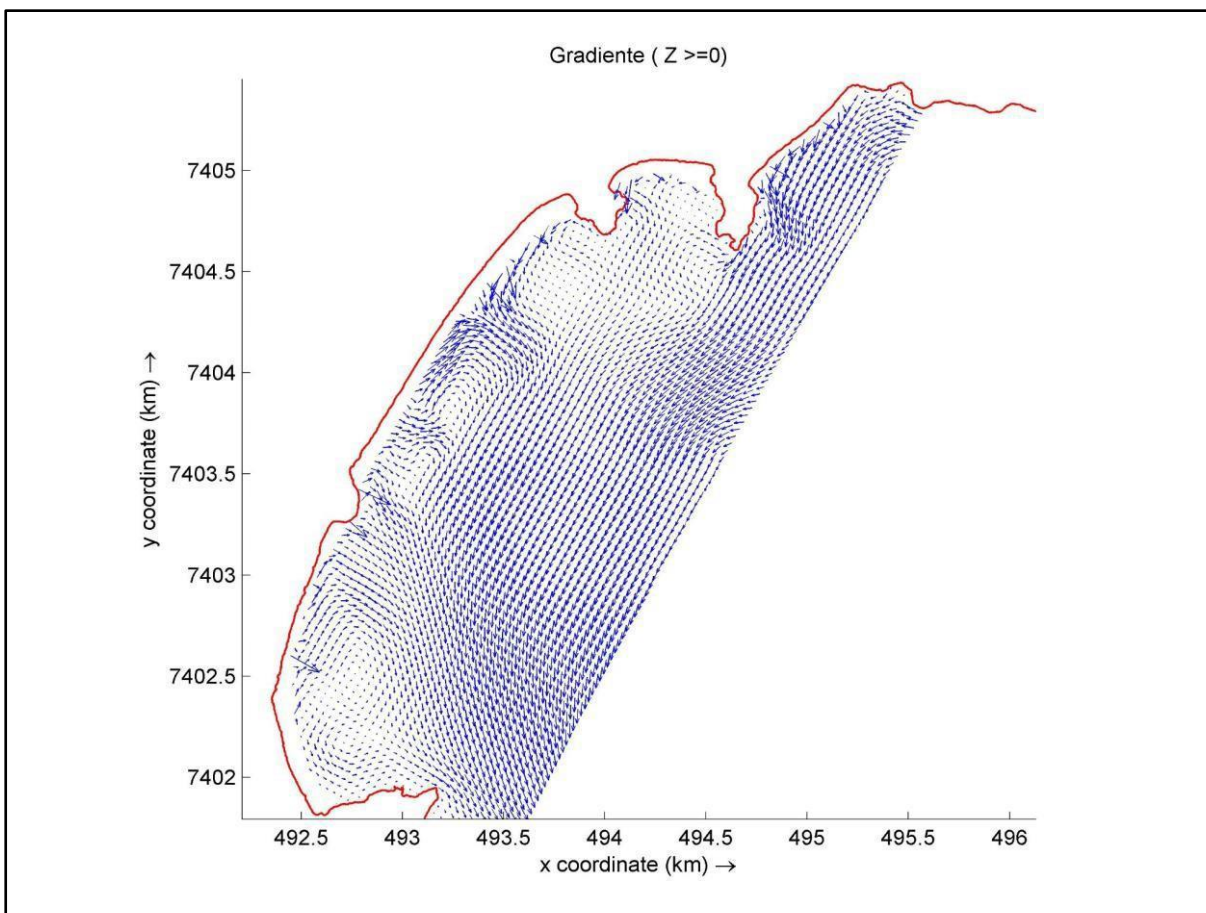


Figura 39 Campo vetorial de correntes, resultado do modelo criado a partir do terceiro arquivo de batimetria.

As figuras 40 e 41 mostram os sistemas identificados em cada um dos cenários da análise, em condição de maré enchente e vazante respectivamente. Durante a maré enchente os sistemas são defletidos para nordeste e a corrente de retorno da praia do Tenório, margeia o costão que faz limite com a praia vermelha do centro (figura 40). Na condição de maré vazante, a corrente de retorno do Tenório se encontra margeando os limites entre Praia Grande e Tenório, e na praia das Toninhas uma corrente de retorno de borda se forma no costão sul. À medida que a complexidade topográfica aumenta, sistemas mais bem definidos e em maior número são contabilizados. Para o cenário batimétrico menos complexo (batimetria interpolada) foram contabilizados 6 sistemas de correntes na maré enchente e na vazante. O cenário intermediário (Topografia plana) contabilizou 5 sistemas durante a maré enchente e 7 sistemas na maré vazante. O cenário mais complexo computou 6 sistemas na maré enchente e 8 durante a maré vazante. Vale ressaltar que em condição de maré enchente o cenário batimétrico menos complexo registrou a presença de um sistema a mais na Praia Grande, em relação aos demais cenários.

Ocorreu que nos outros cenários houve a fusão entre os Sistemas dessa região em um único sistema mais intenso. Os resultados reforçam a ideia da interdependência entre fatores morfológicos e hidrodinâmicos na formação e manutenção dos sistemas de retorno, uma vez que observamos sistemas

mais bem definidos à medida que o grau de complexidade da malha batimétrica aumenta.

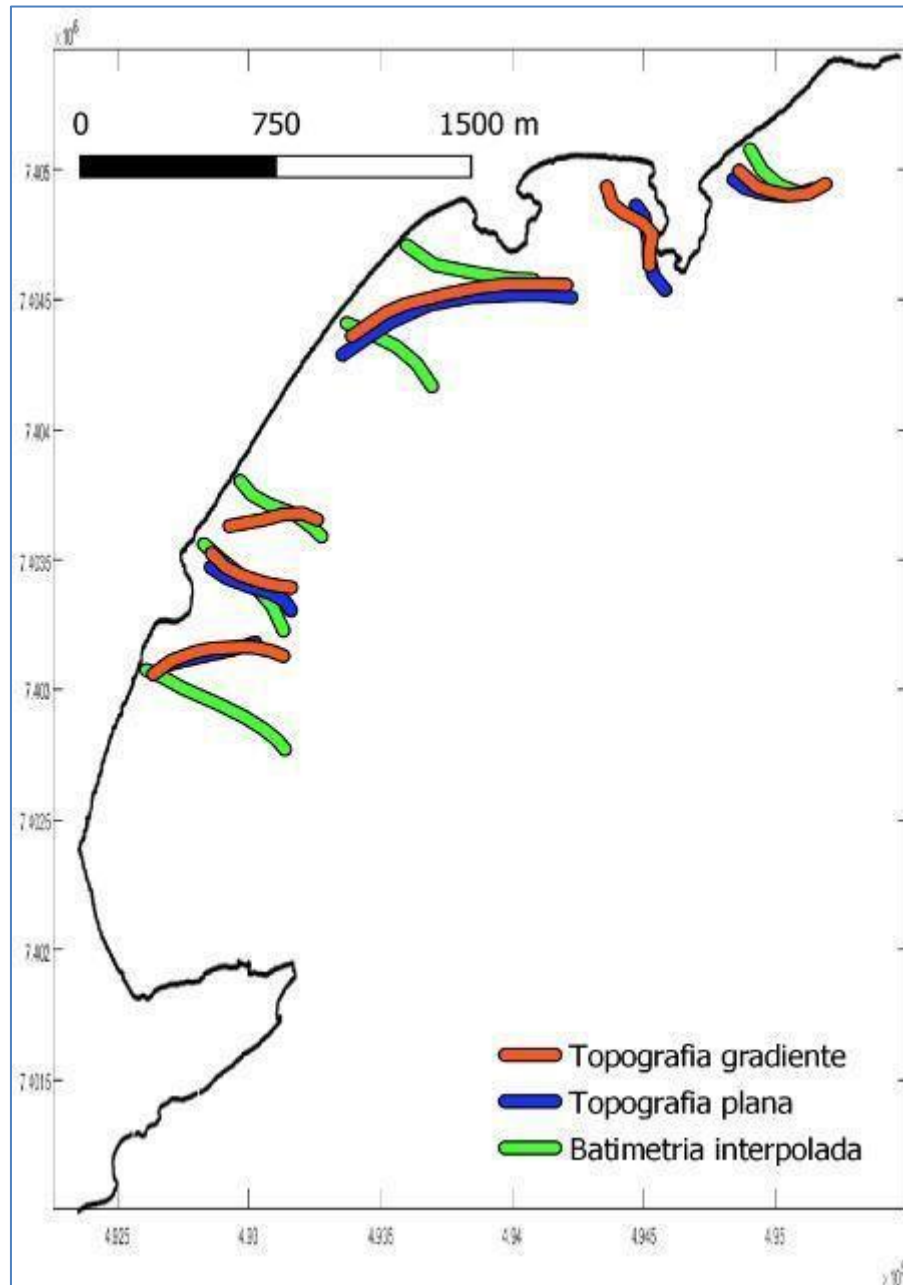


Figura 40 Mapa das regiões onde foram identificadas correntes de retorno, para cada cenário durante a maré enchente.

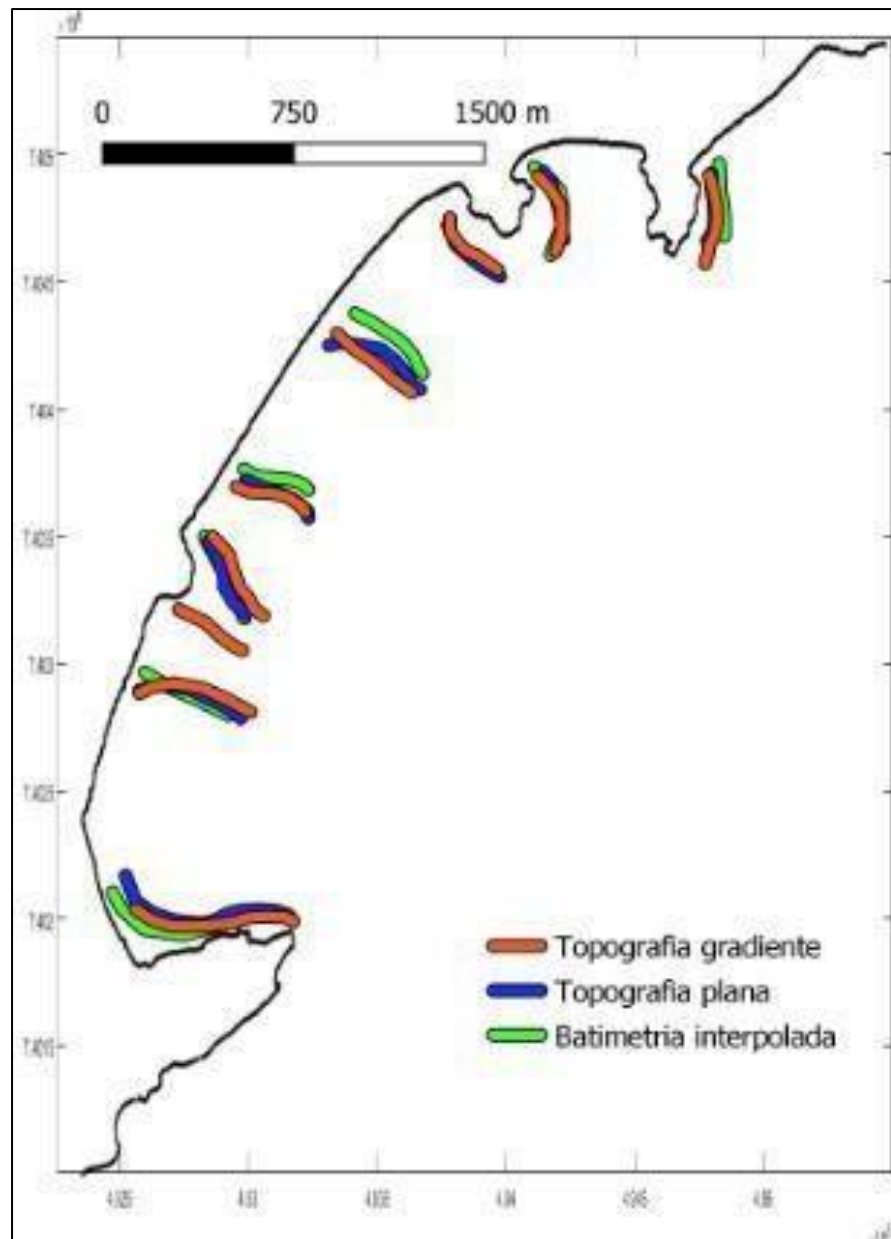


Figura 41 Mapa das regiões onde foram identificadas correntes de retorno, para cada cenário durante a maré vazante

5.3.2 Análise de influência da direção de onda:

Nesta etapa das análises, queremos compreender como os modelos irão responder perante a variações nos parâmetros descritivos de onda. Para melhor condução dos testes optou-se pela confecção de modelos empregando a batimetria mais complexa, cujos resultados se aproximaram melhor da realidade esperada.

Para a análise da influência da direção de incidência das ondas, altura significativa de 1.25 m e período de 9 s foram aplicados em três cenários de direção de incidência. Os cenários reproduzem frentes vindas de Sul, Leste e Sudeste.

Os resultados mostram que, de modo geral, ondas de Sul não geram sistemas expressivos de correntes de retorno. Em adição ao ângulo da onda mais inclinado em relação a linha de costa, outro possível motivo é a zona de sombra causada pela Ilha Anchieta, que barra a passagem destas ondas, fazendo com que ondas difratadas alcancem a região, principalmente em sua porção sul (Figura 42). A porção norte, menos influenciada pela ilha, recebe ondas com maior altura, mas ainda assim com pouca efetividade na formação das correntes de retorno, para estas condições de Altura e Período de onda (Figura 43).

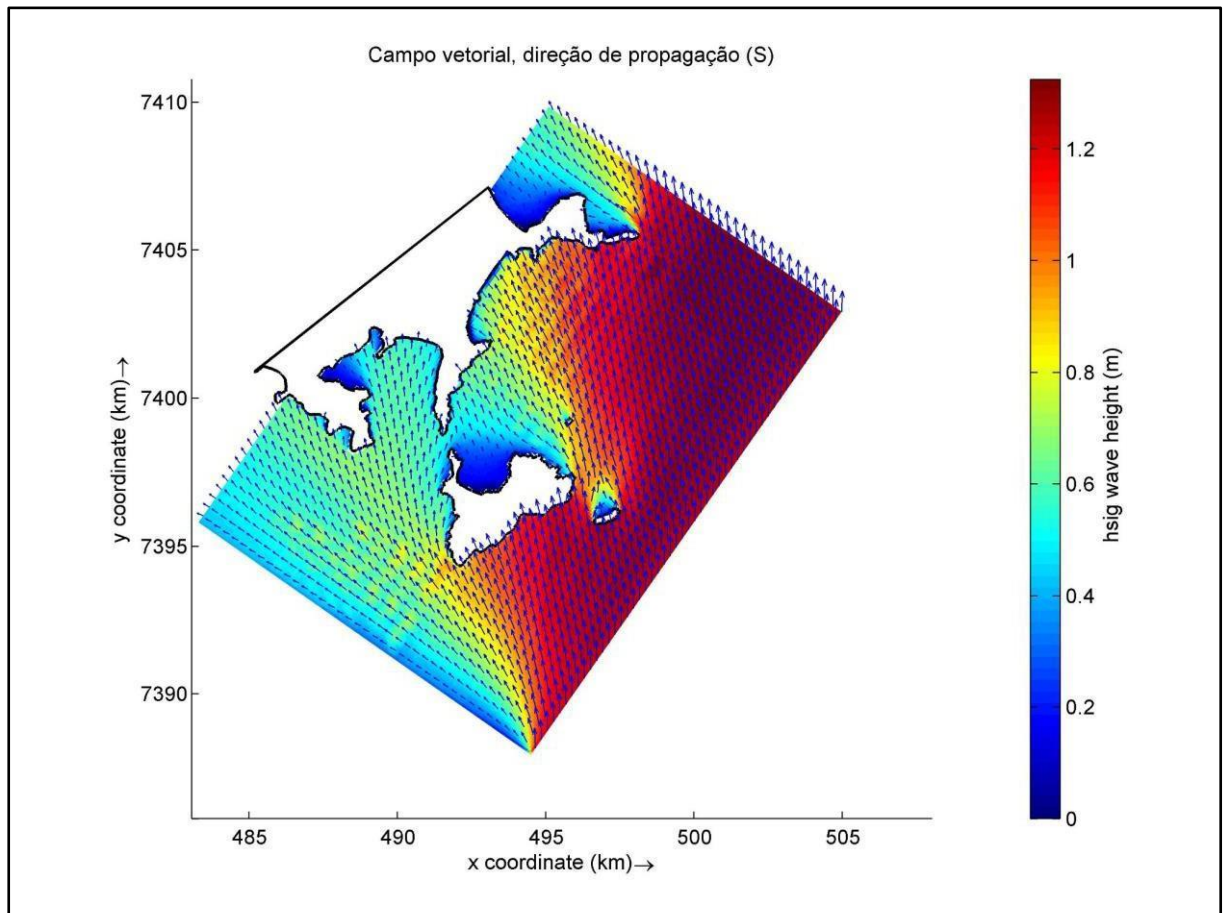


Figura 42 Campo de direção de propagação de ondas sobreposto a um mapa de altura significativa de onda.

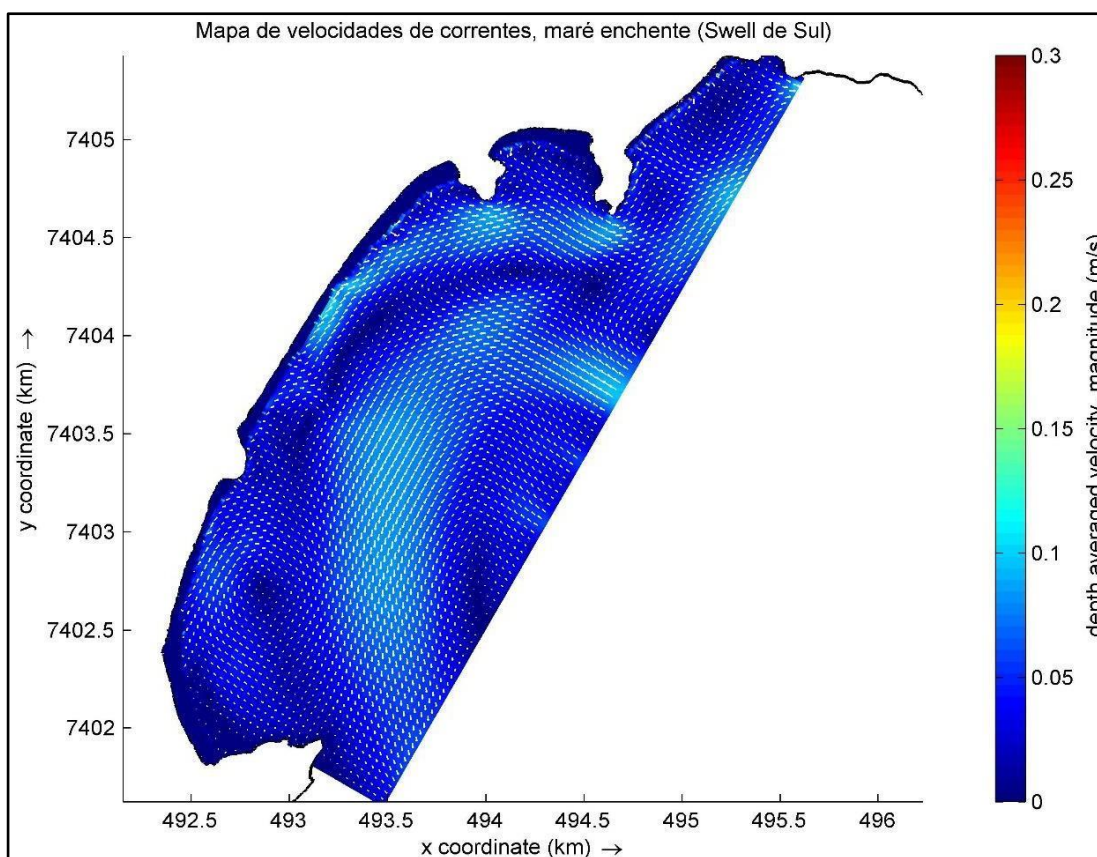


Figura 43 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas do quadrante Sul.

As ondas de Leste foram as que produziram os sistemas mais intensos, sobretudo na praia das Toninhas, praia em que a orientação da linha de costa favorece a chegada destas ondas, ainda assim conduzem muito bem sistemas na Praia Grande, sobretudo na porção central da praia (Figura 44). Com base na figura 44, podemos observar a formação de dois tipos de sistemas distintos, com circulação normal, na porção mais central da praia e em regime de circulação celular na porção meridional da praia das Toninhas.

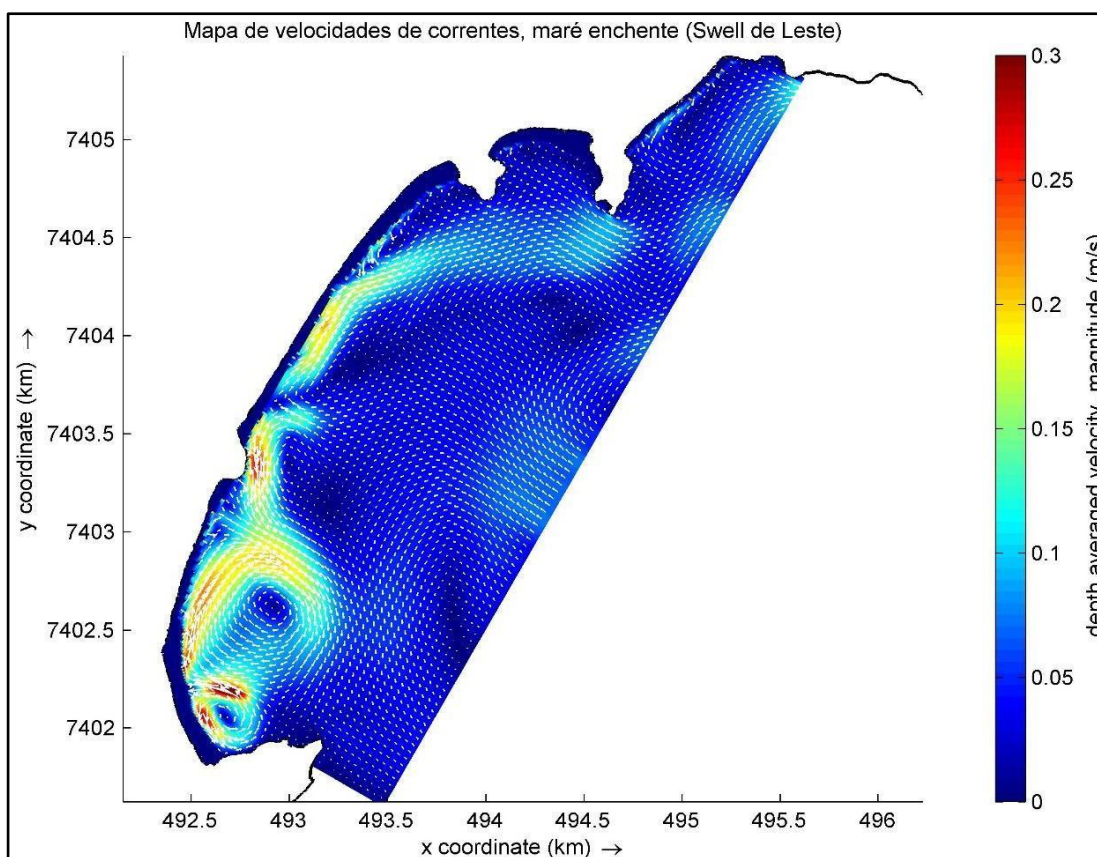


Figura 44 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas do quadrante Leste.

Ondas de Sudeste resultaram em maior número de sistemas em relação aos demais, pelo fato de que a orientação da linha de costa facilita a propagação destas ondas na maioria das praias da região (Figura 45). Este tipo de onda é mais eficiente em conduzir correntes de retorno nas praias ao norte da região (Tenório e Vermelha do centro).

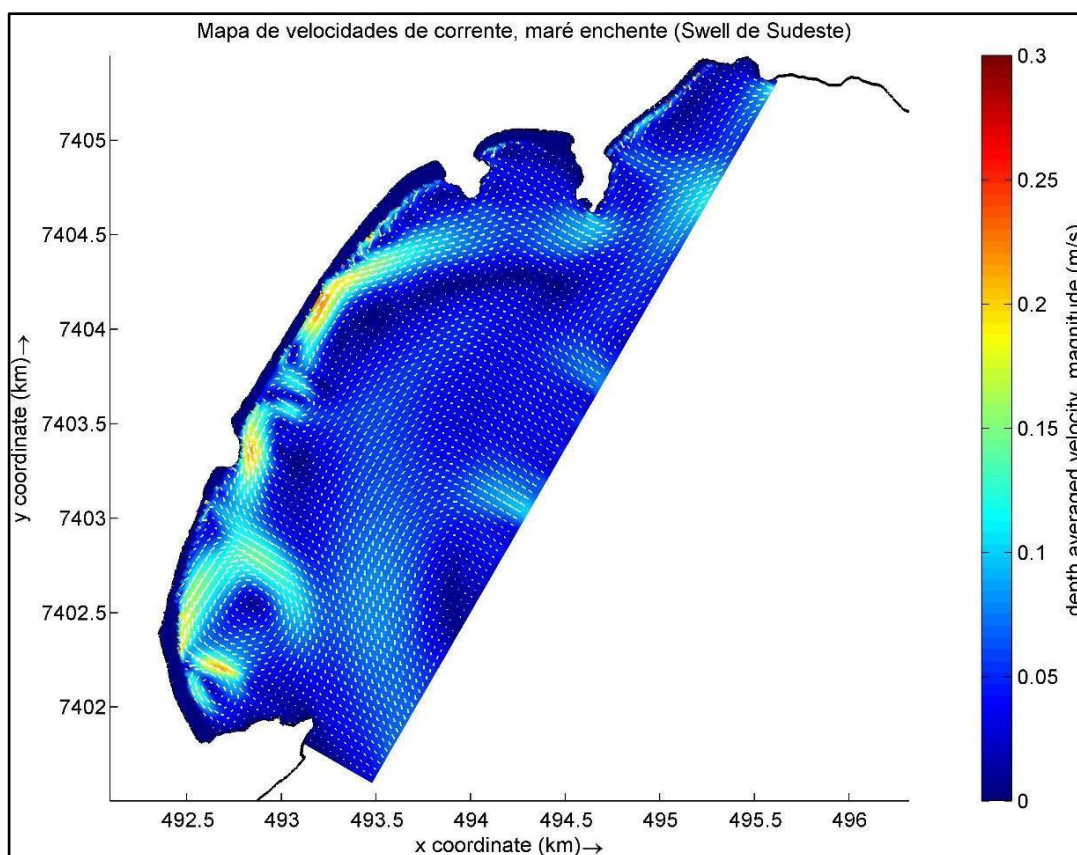


Figura 45 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas do quadrante sudeste.

5.3.3 Análise de influência da altura de onda:

Para examinar a influência da altura de onda sobre a formação de correntes de retorno, foram criados diferentes modelos, em que se mantinham constantes o período e a direção, forçando uma variação de 0.5 m de altura entre cada cenário. No total, foram analisados 24 cenários, 8 para cada direção de onda. A altura empregada corresponde aos valores médios de cada classe de altura de onda (Tabela 2), a partir da análise climatológica dos dados extraídos do *WWIII*. A Tabela 1 resume as configurações utilizadas.

5.3.3.1 Quadrante Sul:

Ondas com período de 9 s e direção de 180° foram as premissas para as simulações que se seguiram. Um total de 8 cenários foram criados para as análises, com diferentes alturas computadas (Tabela 1). Ondas de sul inferiores a 1.25 m, não foram eficazes na condução de sistemas bem definidos, conforme já discutido na seção 5.3.2 destas análises de sensibilidade (Análise da influência de direção de onda). Existe um contra fluxo suave que se distribui de maneira relativamente homogênea por toda a extensão da praia. Apesar de apresentar sistemas incipientes e pouco desenvolvidos, esta classe de altura de onda merece atenção especial por representar 15,38% do total de ondas analisadas com os dados do *Wave Watch III* (Tabela 2).

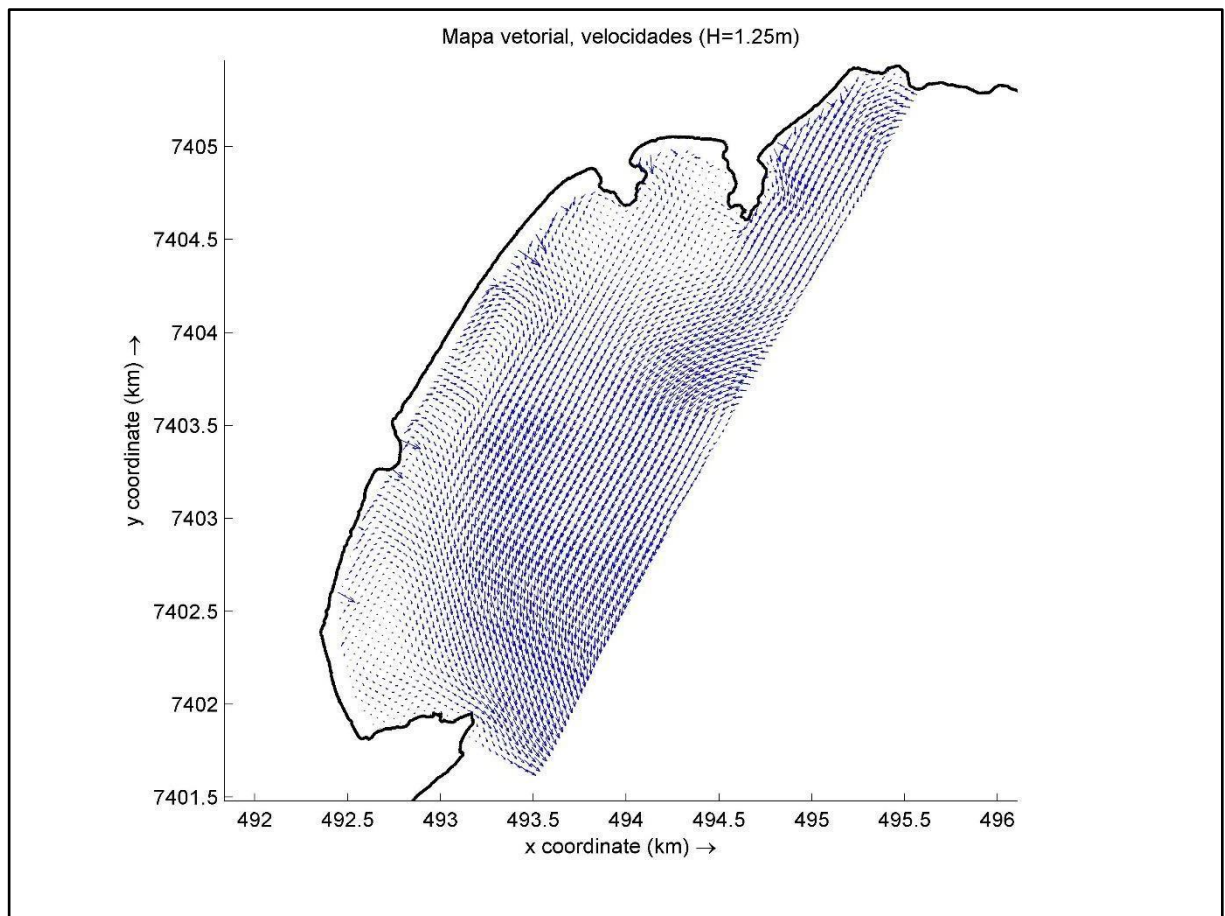


Figura 46 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 1.25m.

Altura de ondas significativas a partir de 1.75 m, as definições dos sistemas ficam mais evidentes, sendo possível identificar três sistemas na Praia Grande, compreendidos entre a região central e sul da praia. Nota-se a presença de correntes de controle topográfico nos limites dos setores praias da Vermelha do centro/Tenório, Tenório/Praia Grande e Praia Grande/Toninhas (Figura 47). A praia das Toninhas sofre pouca influência de ondas de Sul com esta altura definida. Do total de dados analisados, esta classe de ondas entre 1,5 e 2,0 m representa importantes 12,56 % (Tabela 2).

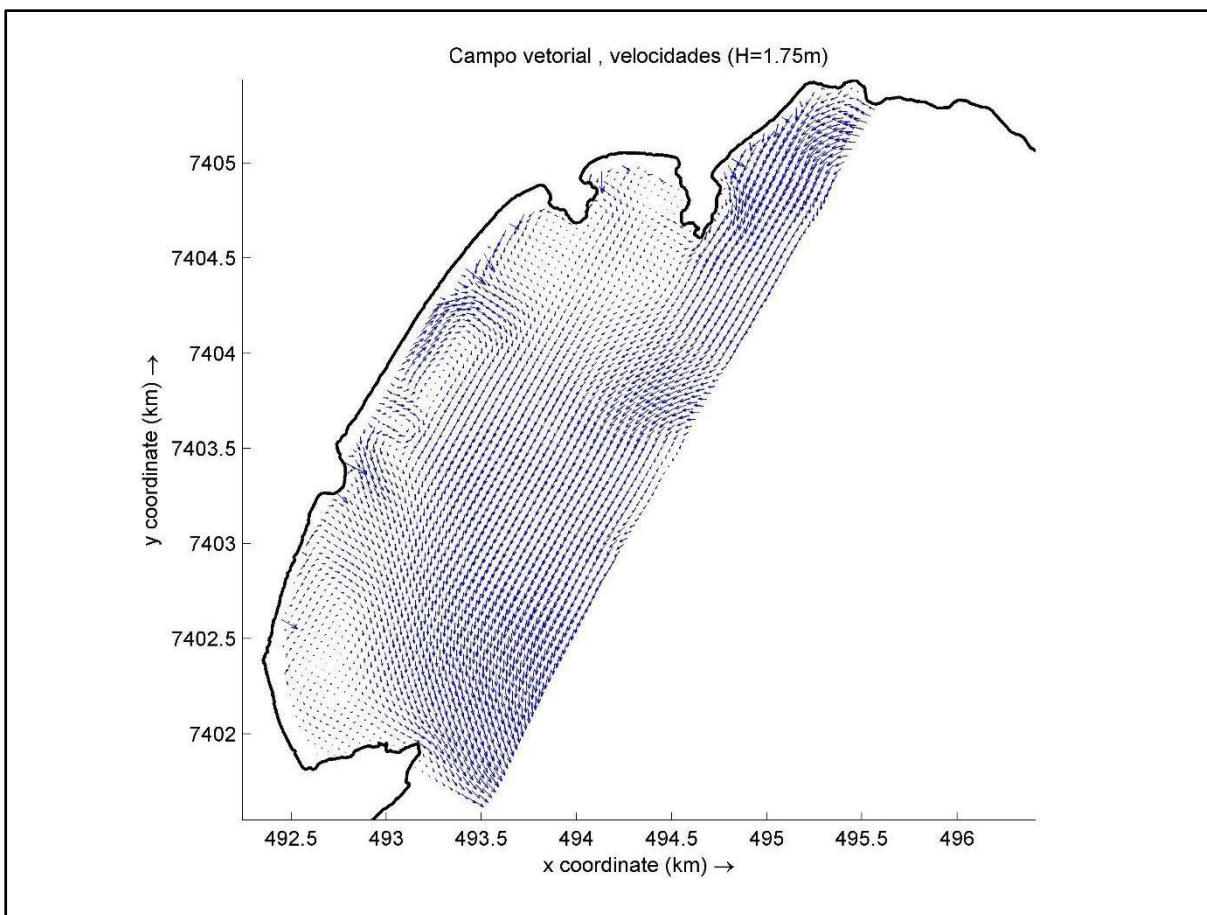


Figura 47 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 1.75m

A partir de alturas significativas de 2.25 m, a dinâmica dos sistemas de correntes de retorno não se alterou, indicando que a altura possivelmente passa a exercer função secundária na evolução dos sistemas a partir de um determinado valor (Figura 48).

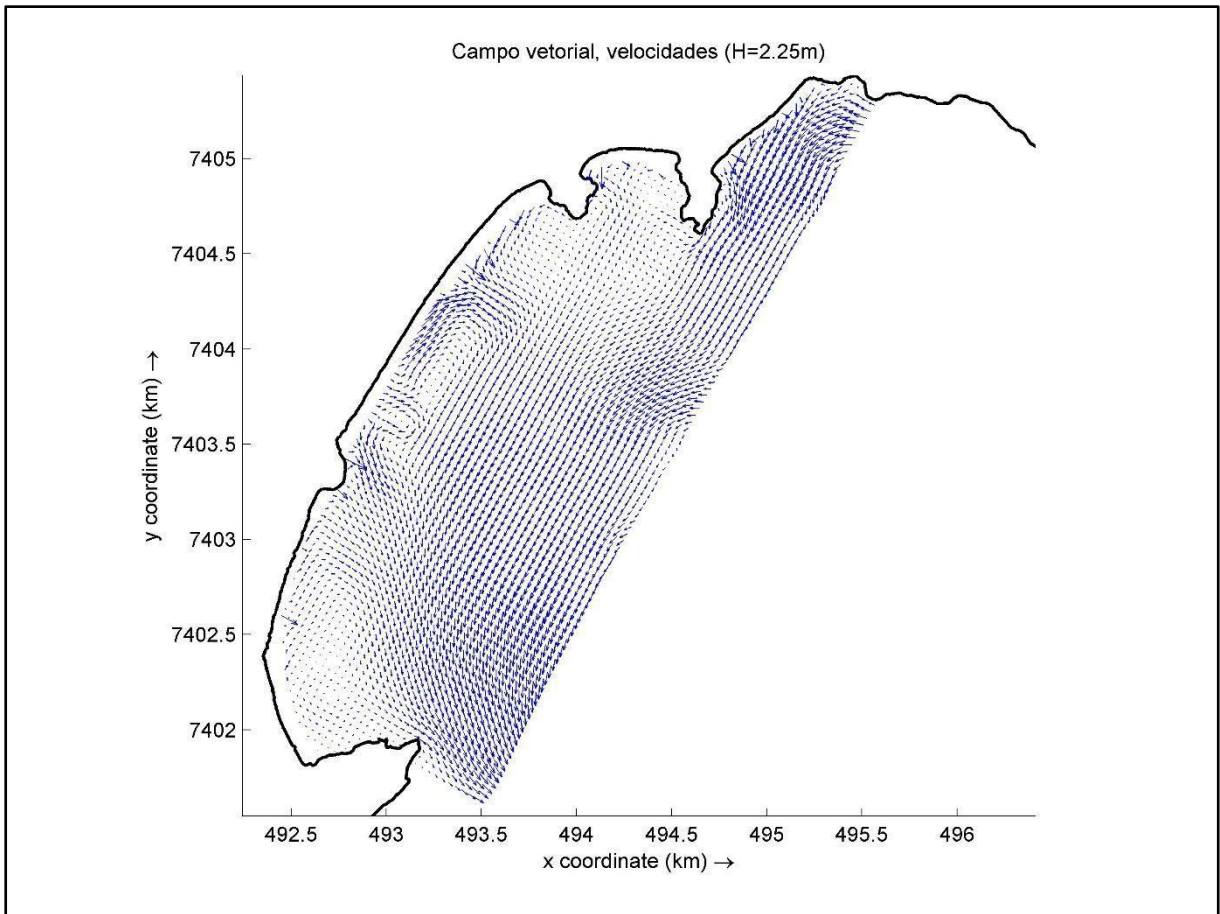


Figura 48 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 2.25m

A partir dos 2.75m os sistemas na praia grande são desfeitos e o que passa se a observar é um controle absoluto da deriva litorânea. Nas praias mais abrigadas a ondas de Sul, ou seja, onde a altura significativa na zona de surf é menor, sistemas são formados e/ou intensificados, como podemos ver nas praias Toninhas e Tenório (figuras 49,50,51 e 52). Nas figuras que se seguem, para condições de ondas superiores a 2.75m, a única diferença que se nota é a intensificação dos fenômenos já observados e descritos.

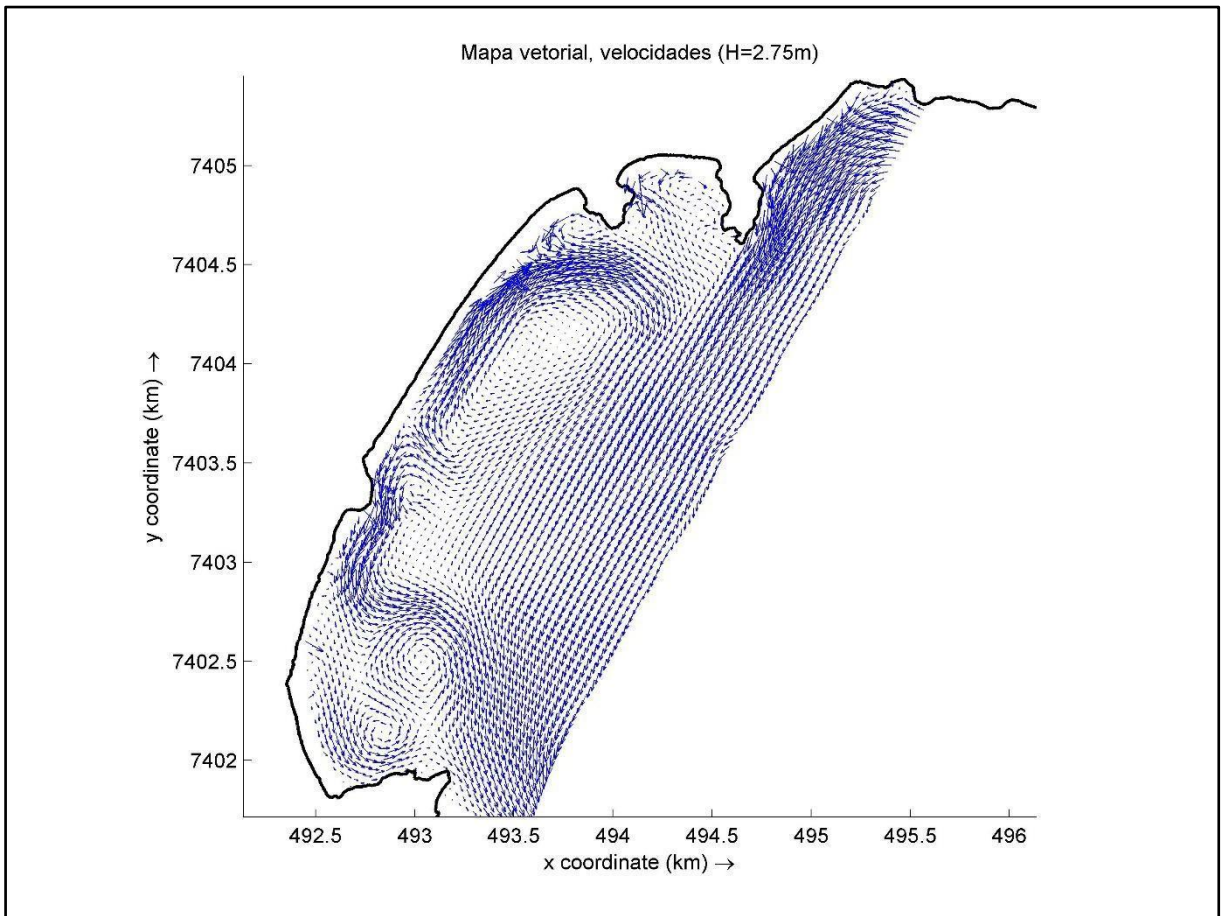


Figura 49 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 2.75m

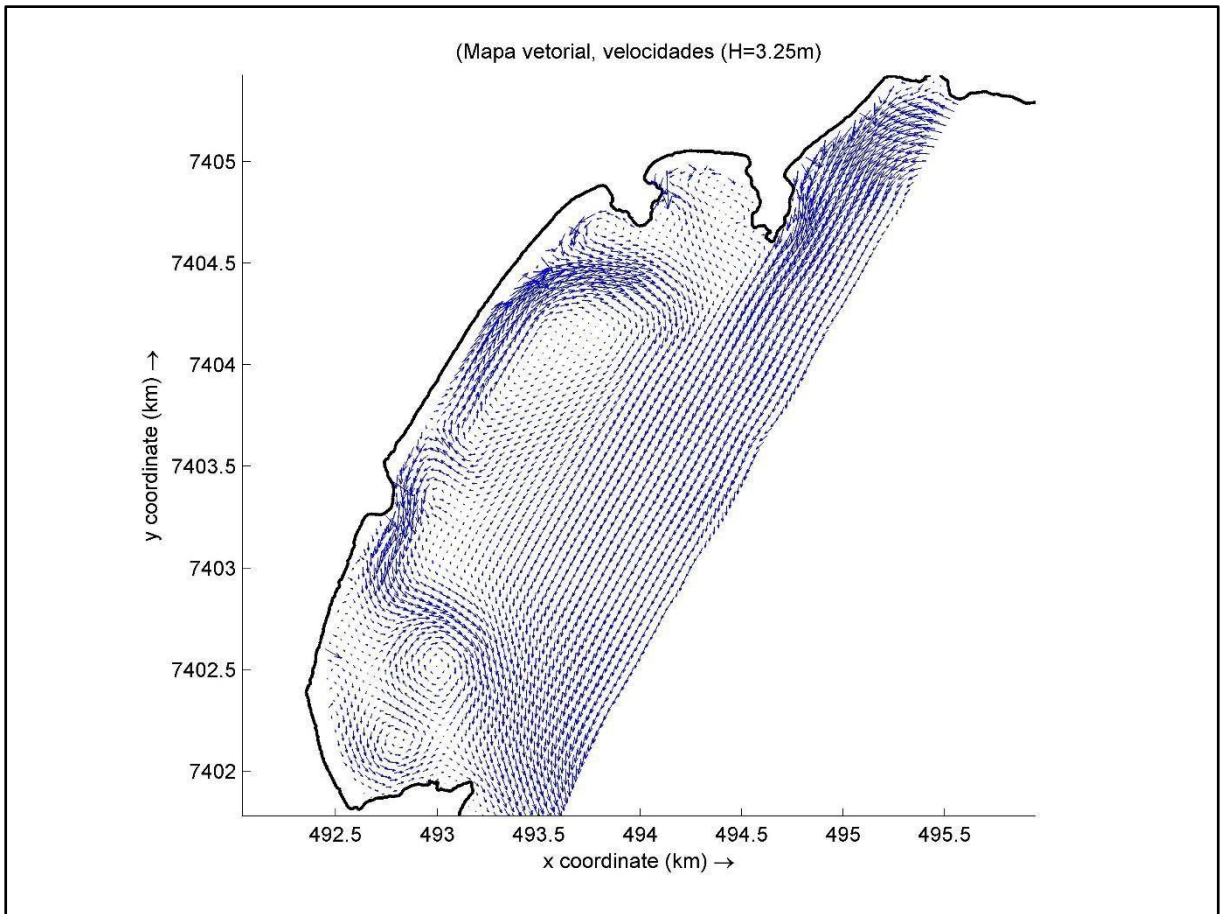


Figura 50 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 3.25m

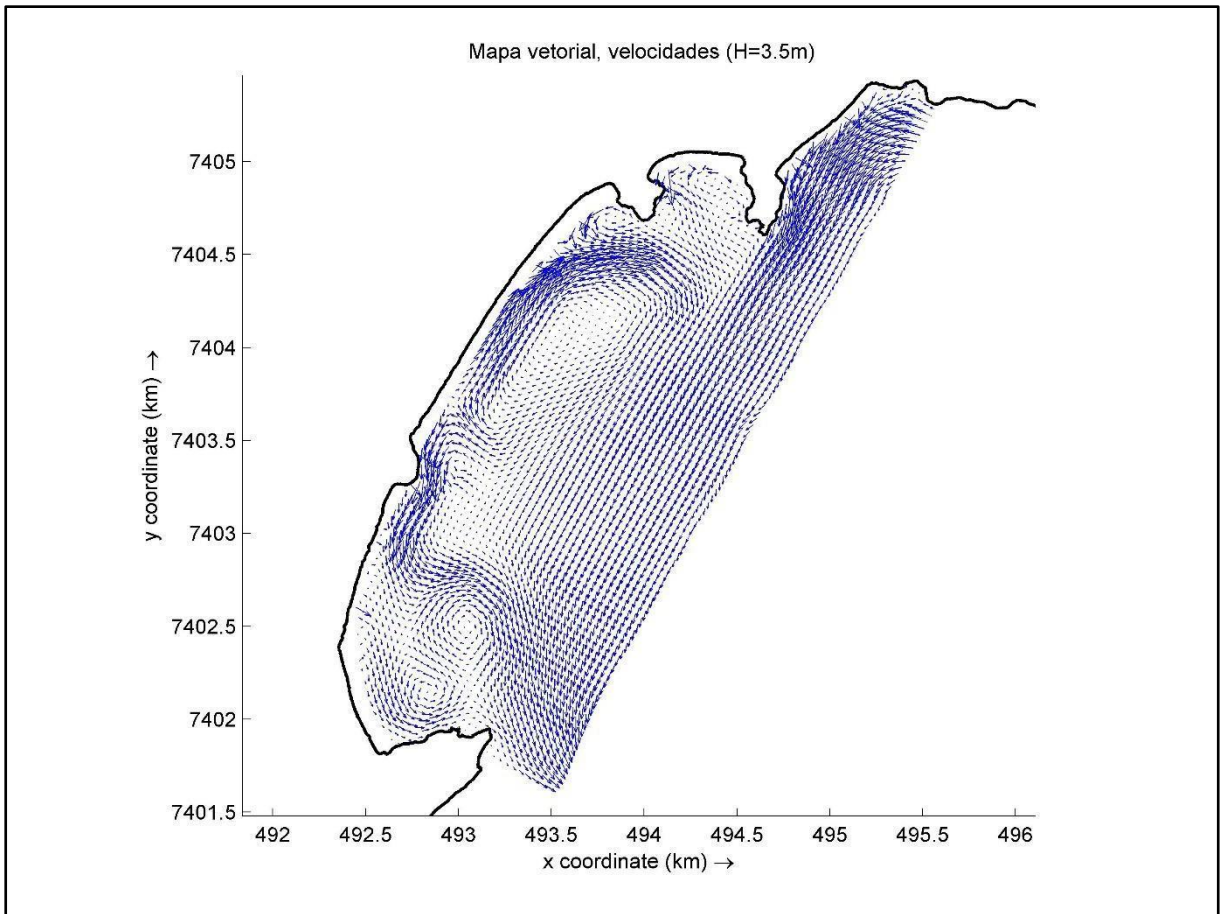


Figura 51 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 3.5m

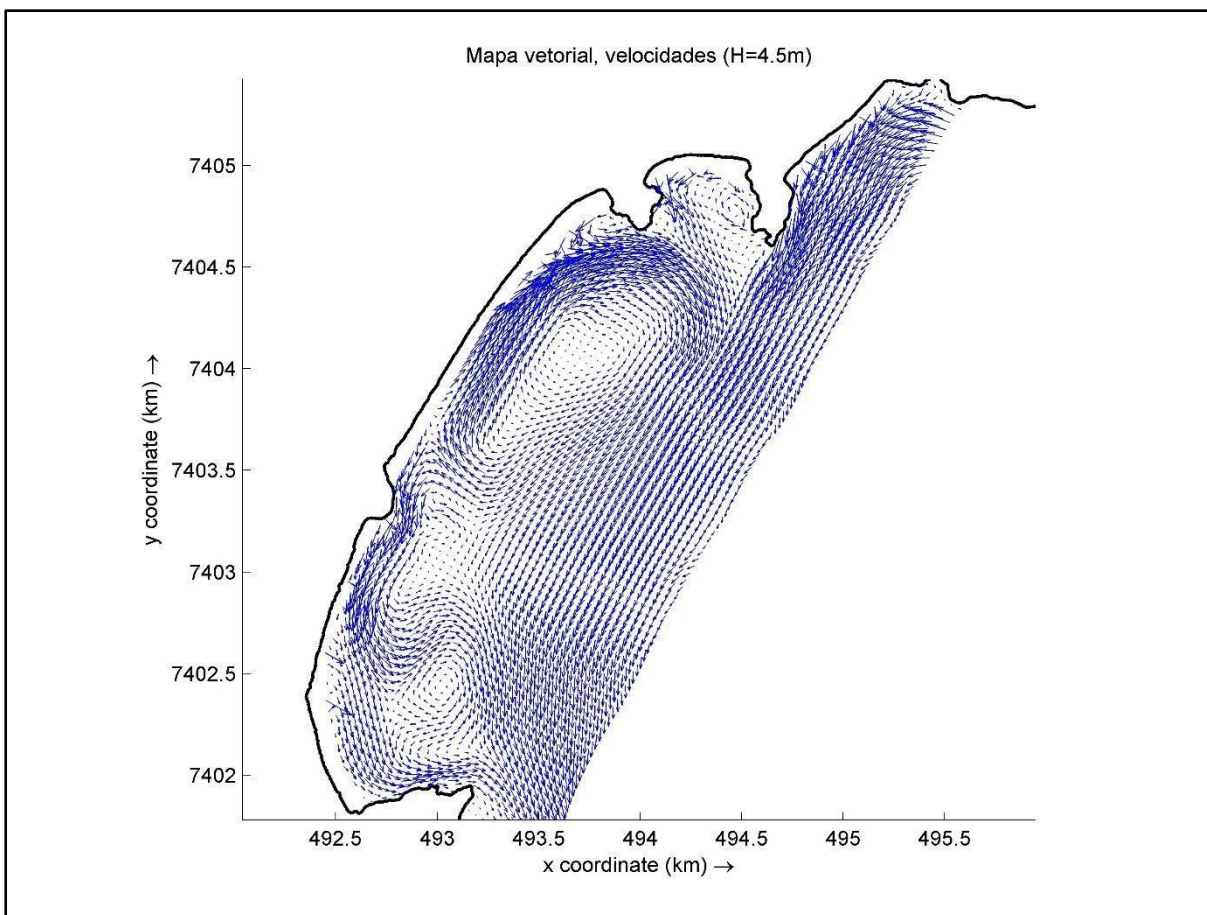


Figura 52 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 4.5m

5.3.3.2 Quadrante Sudeste:

Para a criação dos cenários, a única diferença em relação ao quadrante sul foi a aplicação de um ângulo de 135° para a direção do *Swell*. 8 diferentes cenários foram analisados e os resultados estão expostos a seguir e podem ser visualizados nas imagens 53 a 60.

Como já mencionado, ondas inferiores a 1m geralmente não tiveram competência na geração dos sistemas de retorno. Nesse cenário podemos ver muito sutilmente o esboço de um sistema em formação na porção sul da praia grande. Nas demais praias, nada contundente foi observado.

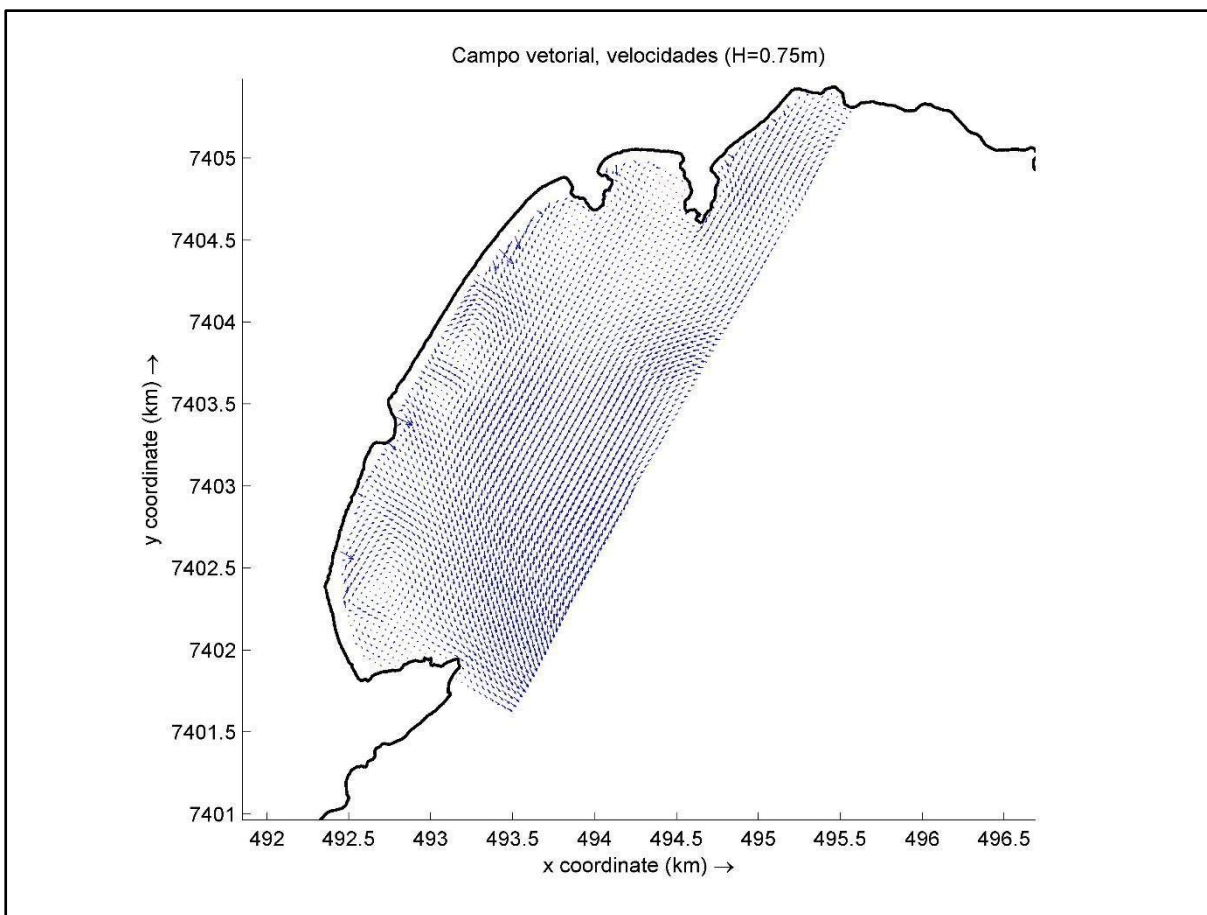


Figura 53 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 0.75m

Com uma altura significativa de 1.25m sistemas mais bem definidos podem ser observados, facilmente pode se identificar um sistema, em regime de escape, na zona central da Praia Grande, o sistema incipiente identificado na análise anterior (Sul da Praia Grande) se intensifica e ganha forma de regime circulatório, outro ainda mais ao sul, no costão entre praia grande e toninhas, se forma com característica de borda. Ainda nas toninhas observamos outro sistema próximo a sua extremidade leste, apesar de se localizar muito próximo ao costão rochoso, podemos observar a convergência entre dois sistemas de deriva litorânea, direcionando esta corrente de retorno mencionada. Esta altura de onda merece atenção especial pois contribuiu com cerca de 11% do total das ondas analisadas com base nos dados do *Wave Watch III* (Tabela 2) sendo a condição mais recorrente nas praias analisadas.

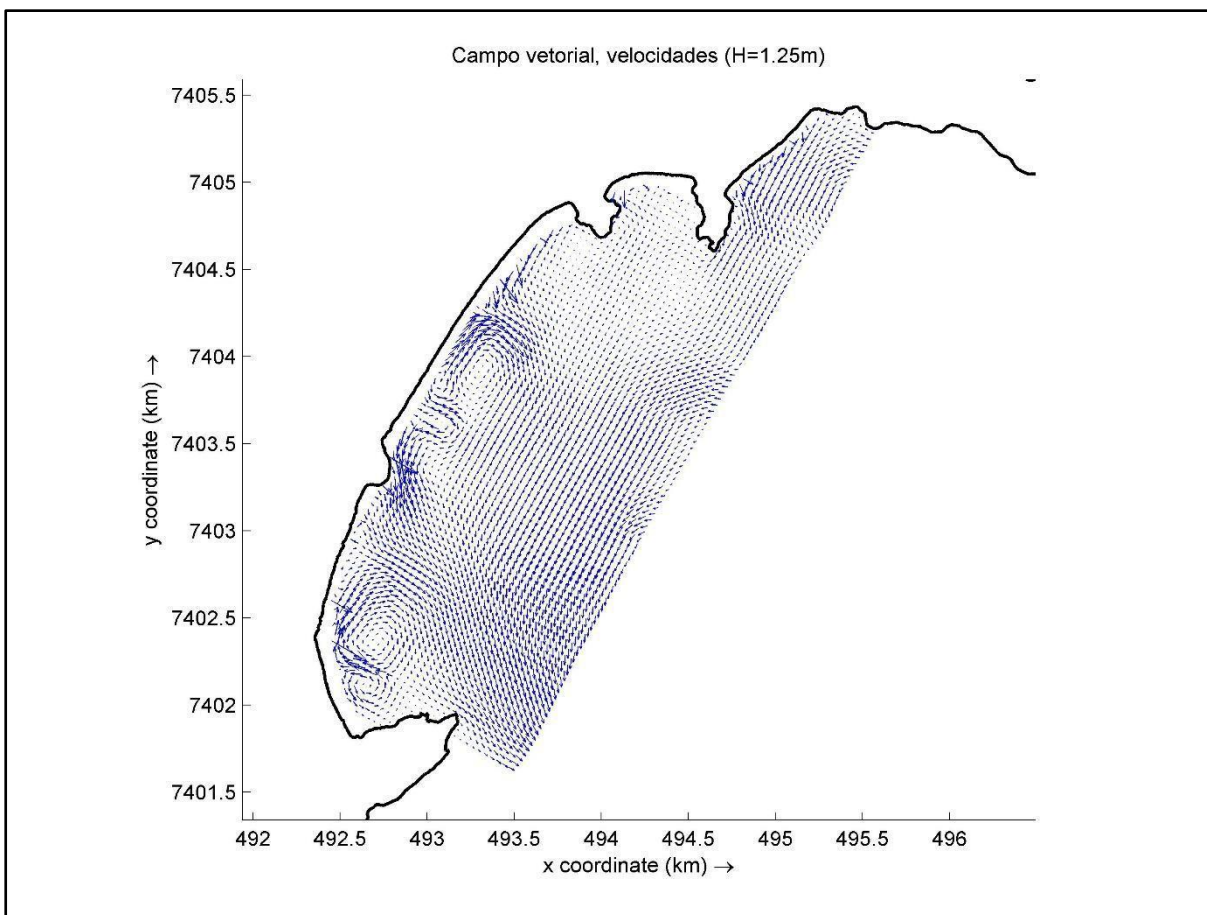


Figura 54 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 1.25m

Aumentando em 0.5m a altura significativa das ondas, podemos ver uma intensificação dos sistemas já mencionados e o início de formação de um sistema na porção central da praia das Toninhas, o sistema mais ao sul mencionado anteriormente, adquire características nítidas de regime circulatório/celular. E na divisa entre Tenório e Vermelha do centro, uma corrente de borda embrionária começa a se desenhar.

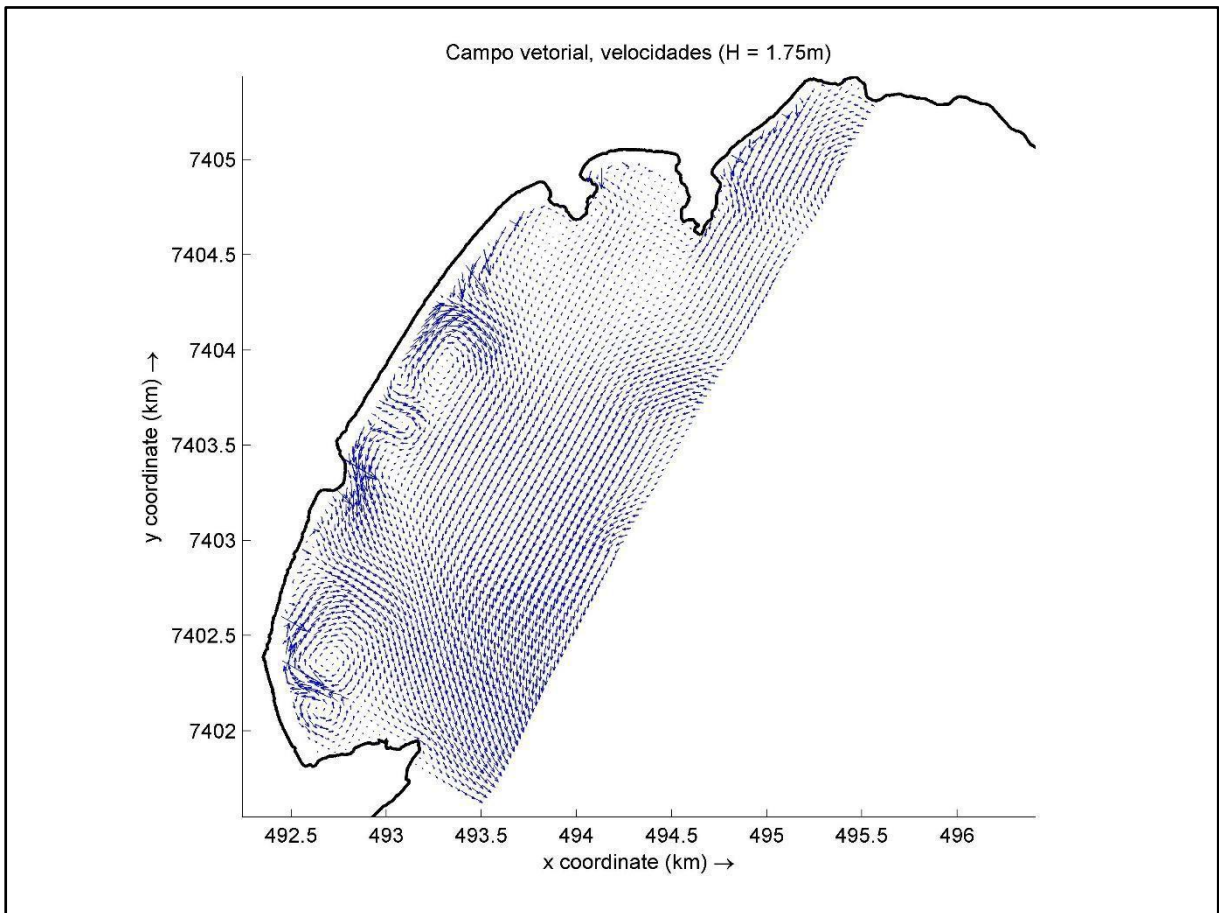


Figura 55 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 1.75m

Com 2.25 m de altura significativa, além da intensificação da maior parte dos sistemas discutidos anteriormente, podemos visualizar o início da transformação de outros. Na Praia Grande, o sistema mais intenso observado, passa a sofrer um desvio de sua rota forçado pela ação sobrepujante da deriva litorânea, que cada vez mais, ganha intensidade e influência na condução dos sistemas. Outra diferença pode ser observada na praia das Toninhas, o sistema na porção mais austral da praia, que outrora se desenhava devido a convergência de correntes de deriva, migra e passa a sofrer influência preponderante do obstáculo físico representado pelo costão rochoso, ganhando característica de corrente de sombra.

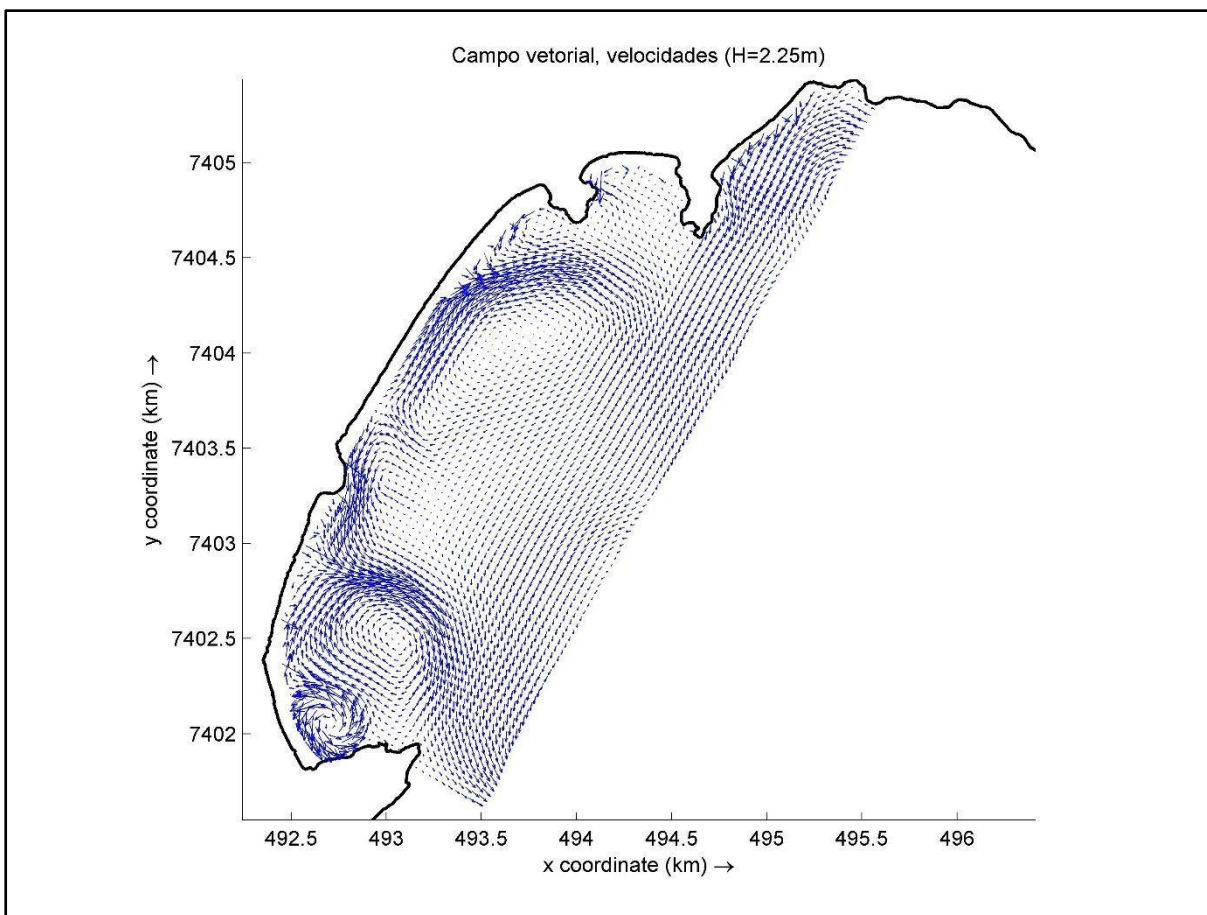


Figura 56 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 2.25m

Com altura significativa de onda de 2.75m, além da intensificação dos fenômenos observados anteriormente, ocorre a transformação do sistema principal da Praia Grande. A deriva litorânea ganha ainda mais influência e desloca todo o sistema para norte, o fluxo se depara com o promontório rochoso e toma as características de corrente de borda de deflexão.

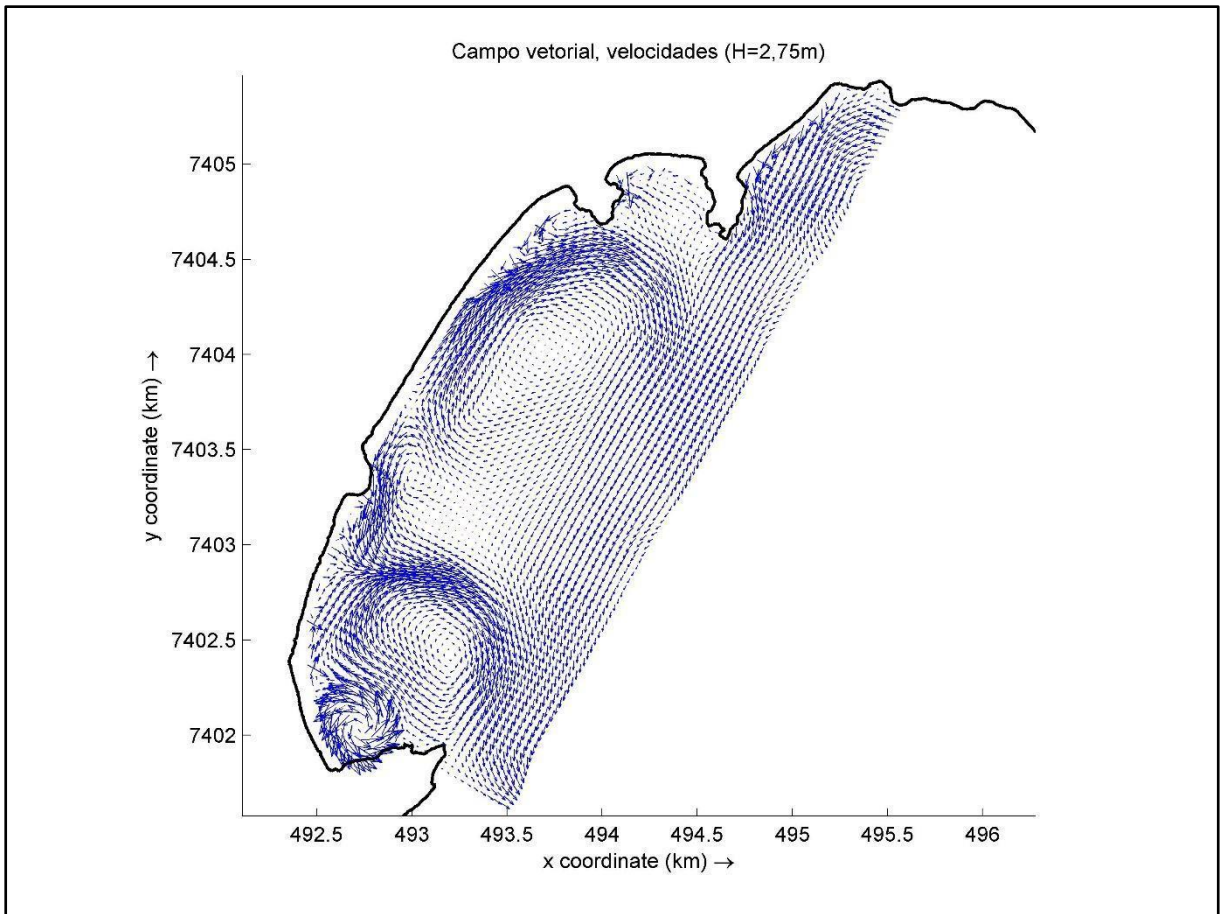


Figura 57 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 2.75m

Quando as ondas entram na casa dos 3 m (Figuras 58,59 e 60) poucas mudanças são perceptíveis além da intensificação dos sistemas já existentes. As regiões onde a ação das ondas é menos intensa continuam apresentando os sistemas definidos. Já em áreas de maior energia de onda, os sistemas não conseguem se manter devido ao intenso hidrodinamismo, com a deriva litorânea passando a ser o agente de maior influência e as correntes de borda prevalecem. Em relação aos cenários discutidos previamente, podemos ver o início de uma mudança no padrão das correntes na praia vermelha do centro. Além da corrente de borda de sombra localizada no promontório que secciona a faixa praias entre as praias Tenório e Vermelha, um outro sistema começa a se formar no meio da praia.

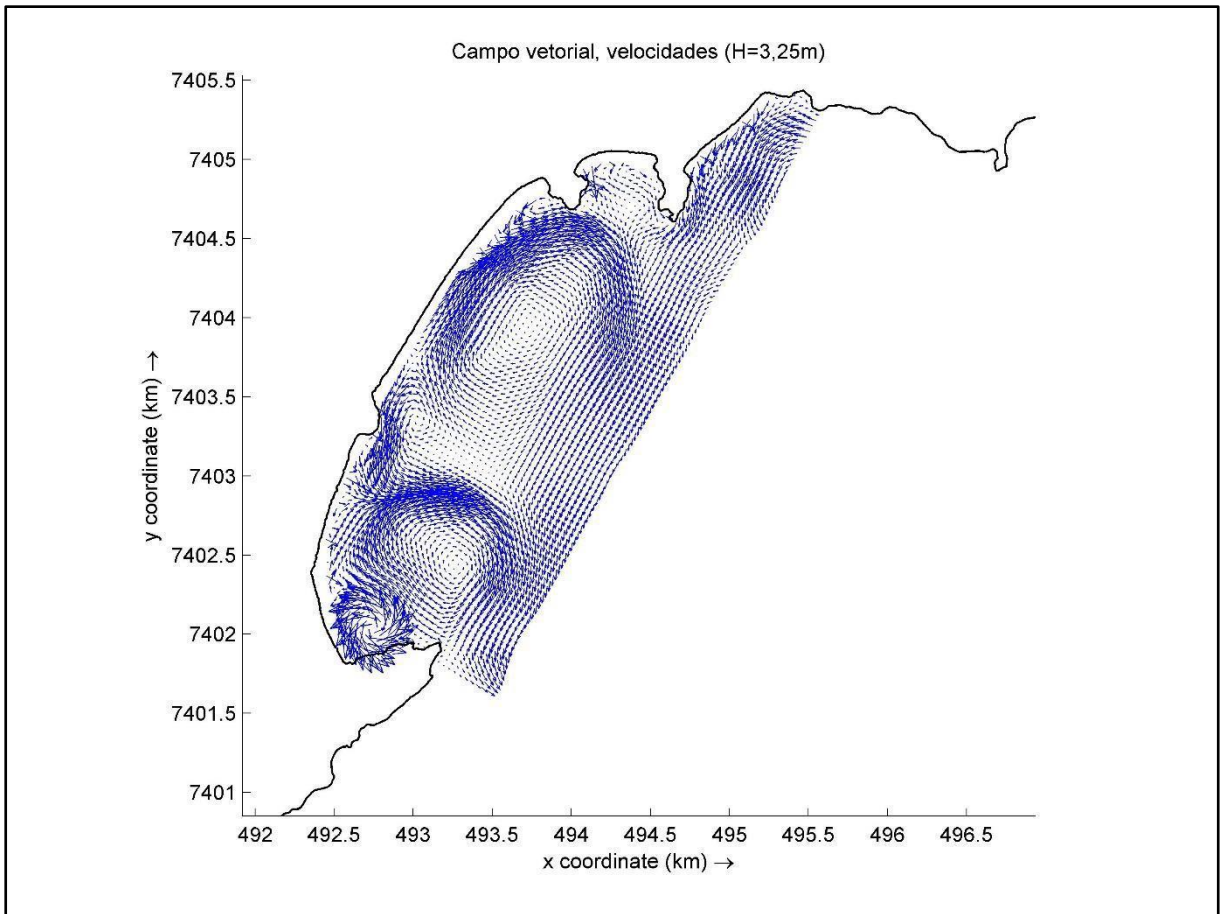


Figura 58 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 3.25m

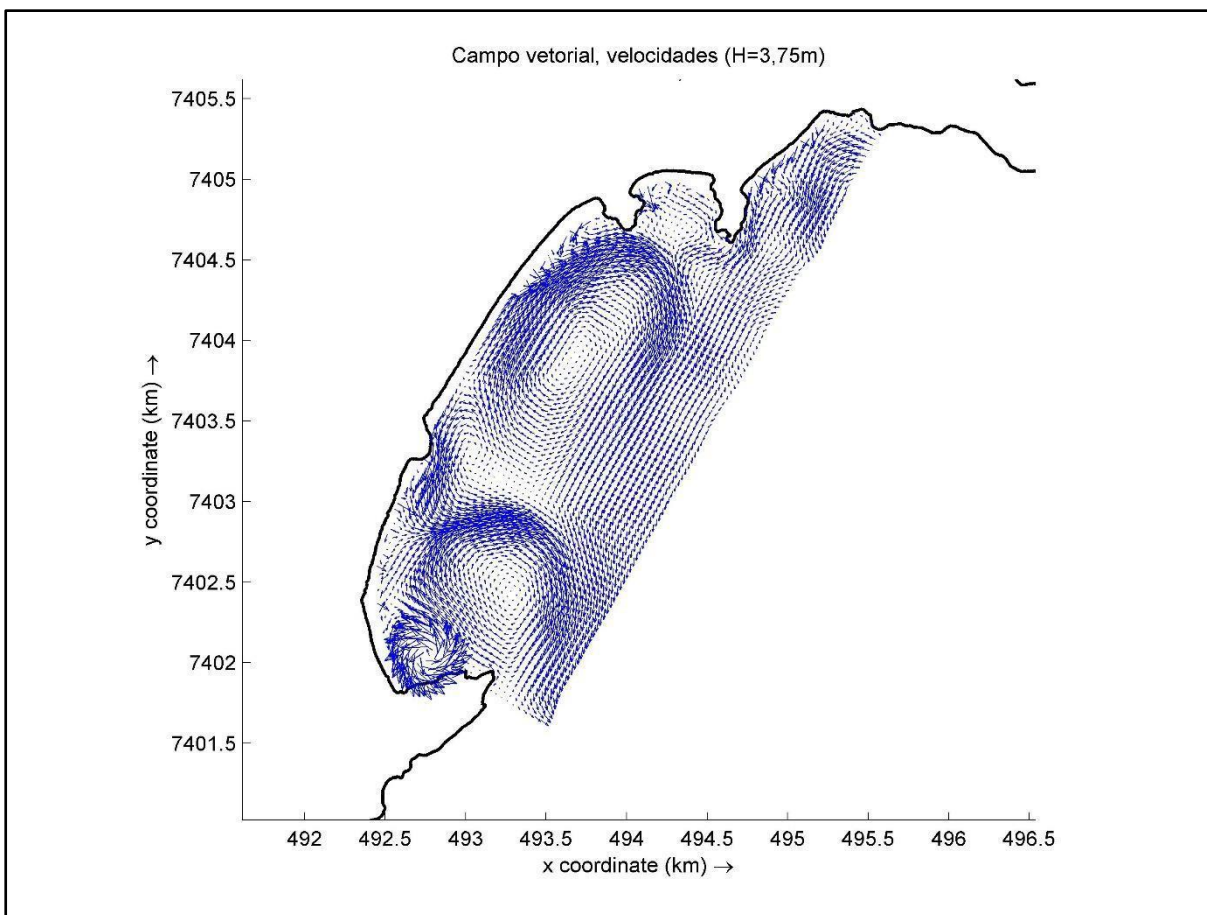


Figura 59 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 3.75m

Para o cenário mais extremo, com altura significativa de onda de 4.5 m temos o desenvolvimento completo do sistema incipiente da Vermelha do centro, destacado na análise anterior. Este novo sistema adquire característica de modo de circulação celular e uma feição de vórtice toma conta de praticamente toda a praia.

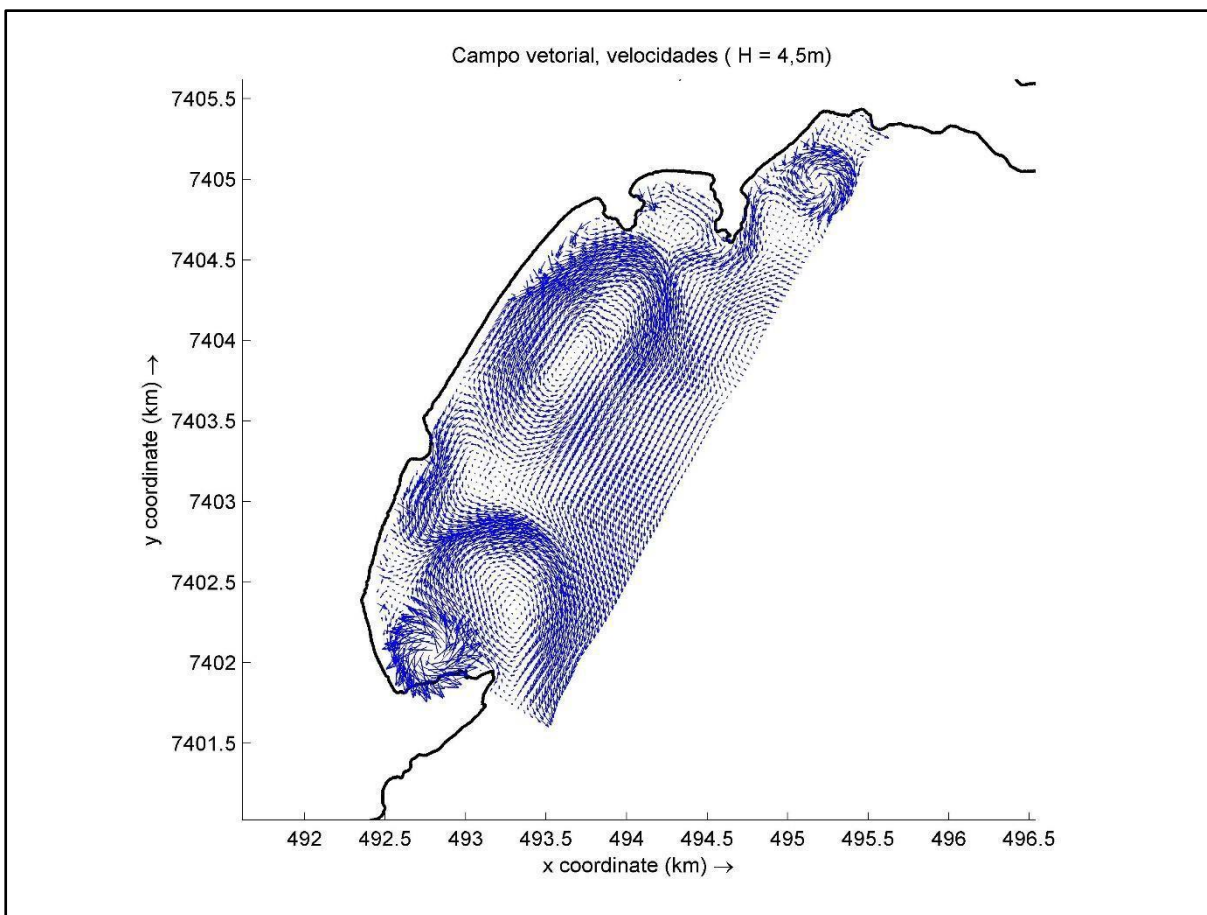


Figura 60 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 4.5m

5.3.3.3 Quadrante Leste:

Seguindo o mesmo procedimento adotado nas duas análises anteriores, com a diferença única na direção de incidência definida em 90° . O mesmo total de oito cenários são apresentados (Figuras 61 a 67).

Como observado em praticamente todos os experimentos numéricos realizados, nenhum fenômeno expressivo ocorre com ondas menores de 1 m. Isso se repete nesse novo cenário mesmo nas Toninhas, praia mais exposta a ondulações vindas de leste. Com 1.25 m de altura significativa de onda, os primeiros sistemas começam a se formar, mais evidentes na praia das Toninhas. É possível observar o sistema da porção austral, um sistema central e um sistema no promontório que secciona Toninhas e Praia Grande, este fluxo se inicia na praia Grande contorna o costão e tem a cabeça da corrente de retorno alcançando a praia das Toninhas. Um sistema central na Praia Grande começa a ganhar força. Esta classe de altura representa importantes 15,75 % do total extraído da análise climatológica.

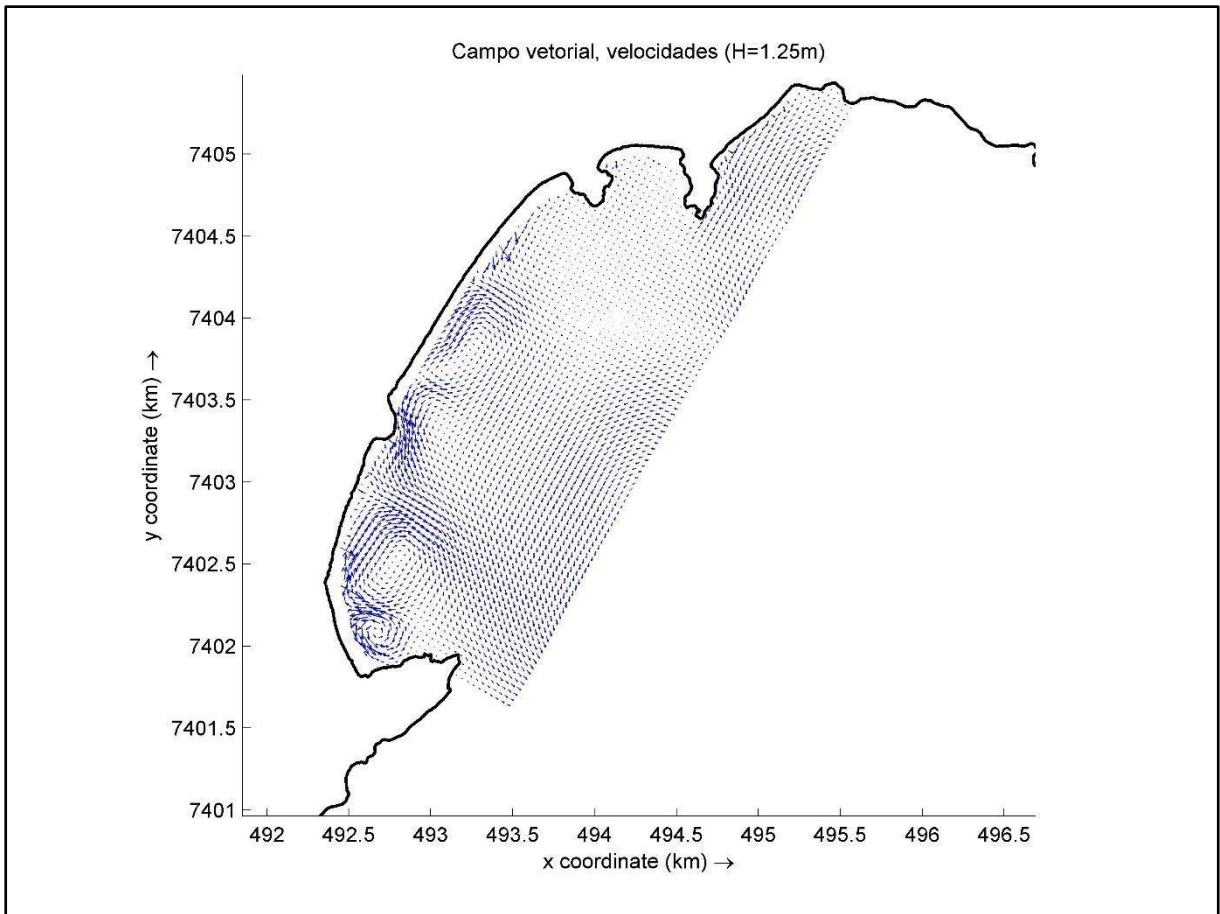


Figura 61 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 1.25m

Com altura significativa de onda de 1.75 m, todos os sistemas se evidenciam e se intensificam. O sistema mais ao sul da praia das Toninhas migra e se transforma, exatamente como notado na análise feita para as ondas de sudeste. Adicionalmente, ocorre a fusão do sistema central da praia das Toninhas com o sistema que se inicia na praia Grande e deságua na Toninhas. Nessa situação, os sistemas se unem e formam um grande e intenso sistema de retorno com modo de circulação de escape.

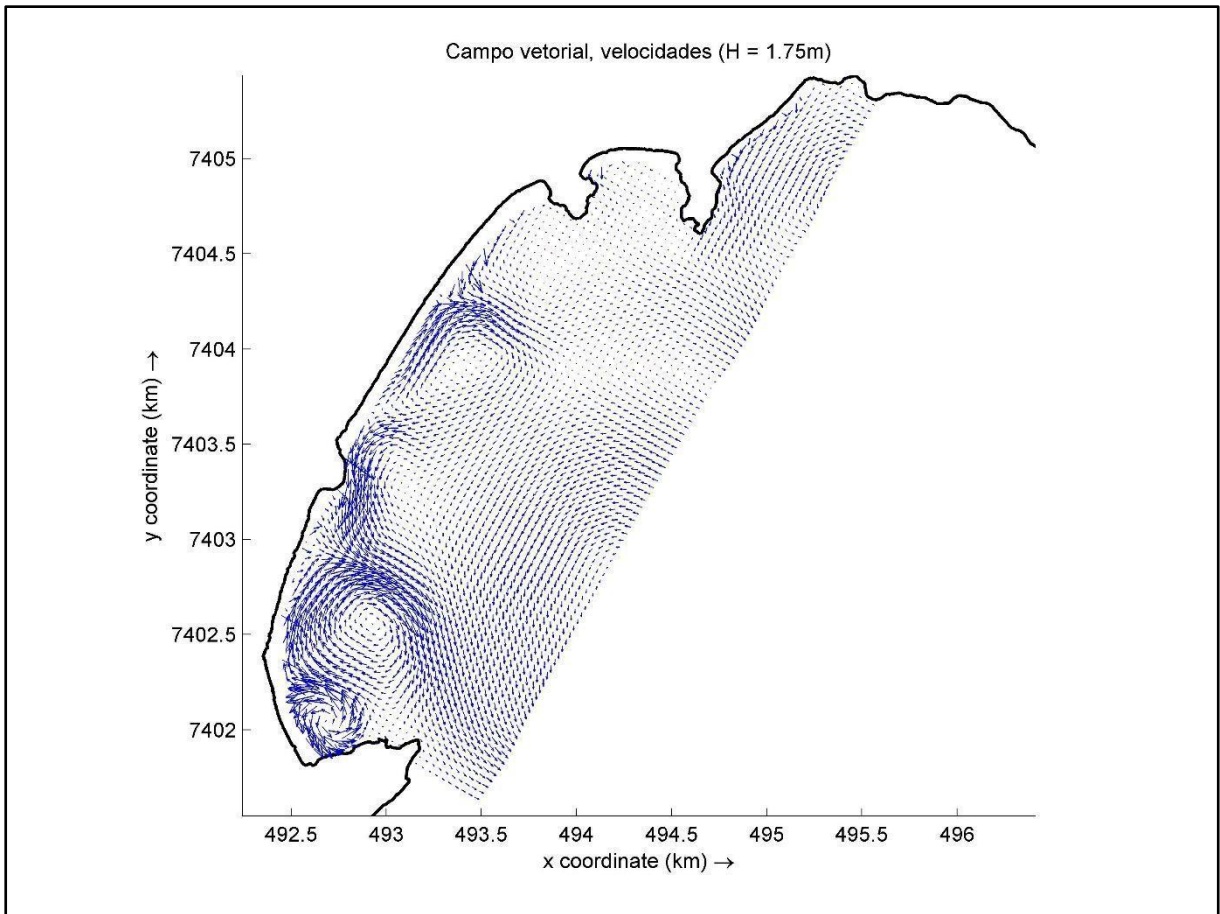


Figura 62 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 1.75m

Com altura de onda em torno de 2.25 m (Figura 63), a diferença notável ocorre na praia Vermelha do Centro, onde uma extensa corrente de deriva litorânea, com sentido norte-sul, percorre a praia até alcançar o costão, gerando a corrente que contorna este promontório. Com altura de onda de 2.75 m (Figura 64), um padrão evidenciado para as ondas de sudeste passa a se repetir e o sistema central da Praia Grande começa a se deslocar para norte. Contudo não há formação de novos sistemas.

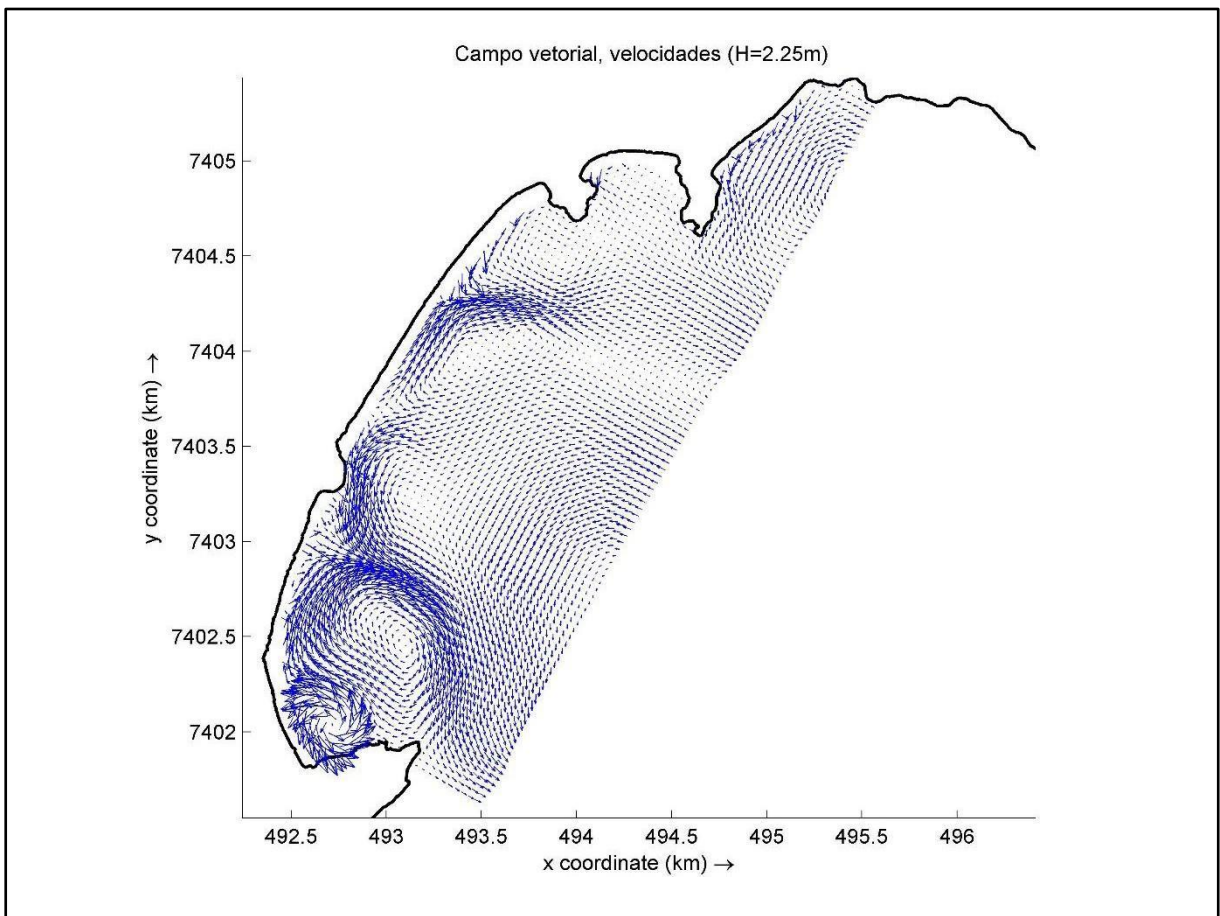


Figura 63 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 2.25m

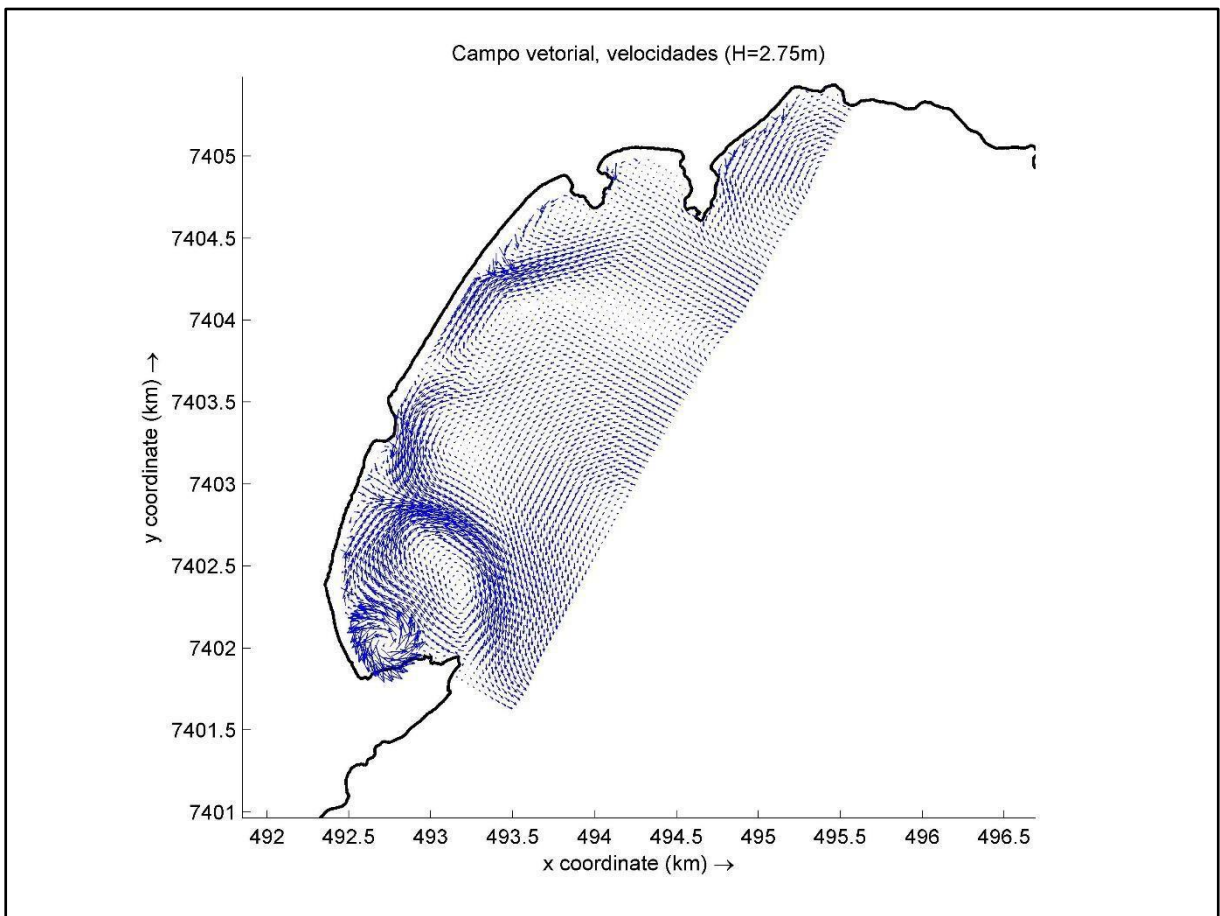


Figura 64 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 2.75m

A partir deste ponto a corrente de retorno central da praia grande, migrou e adquiriu as características de corrente de borda, entretanto ainda é possível observar uma força de deriva litorânea no sentido contrário a este fluxo convergindo no meio desta grande corrente de retorno (figura 65).

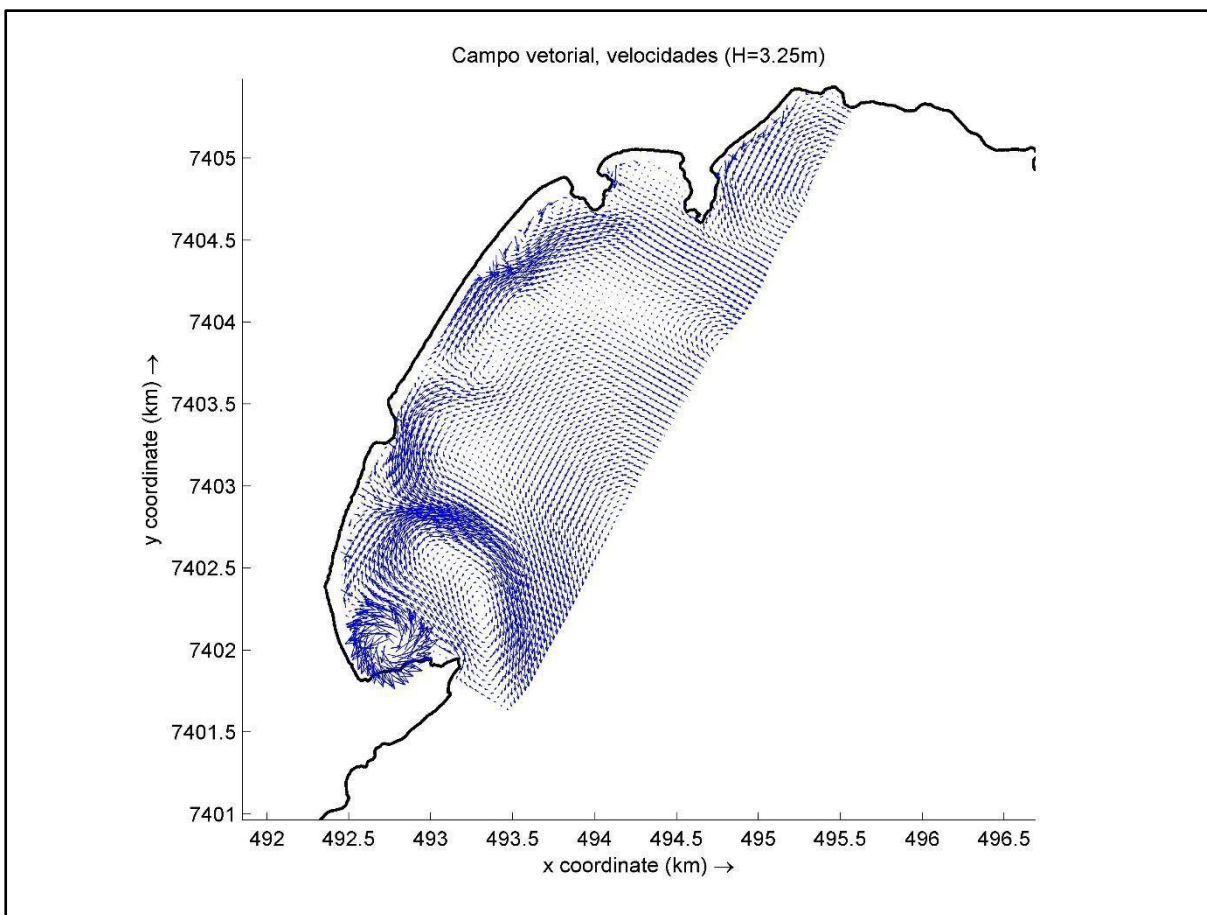


Figura 65 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 3.25m

Com alturas de onda maiores, observa-se, na figura 66, que a influência da deriva que vem do extremo norte da Praia Grande aumenta, e um novo braço começa a se desenvolver a partir do fluxo que contorna o costão (Praia Grande/Tenório).

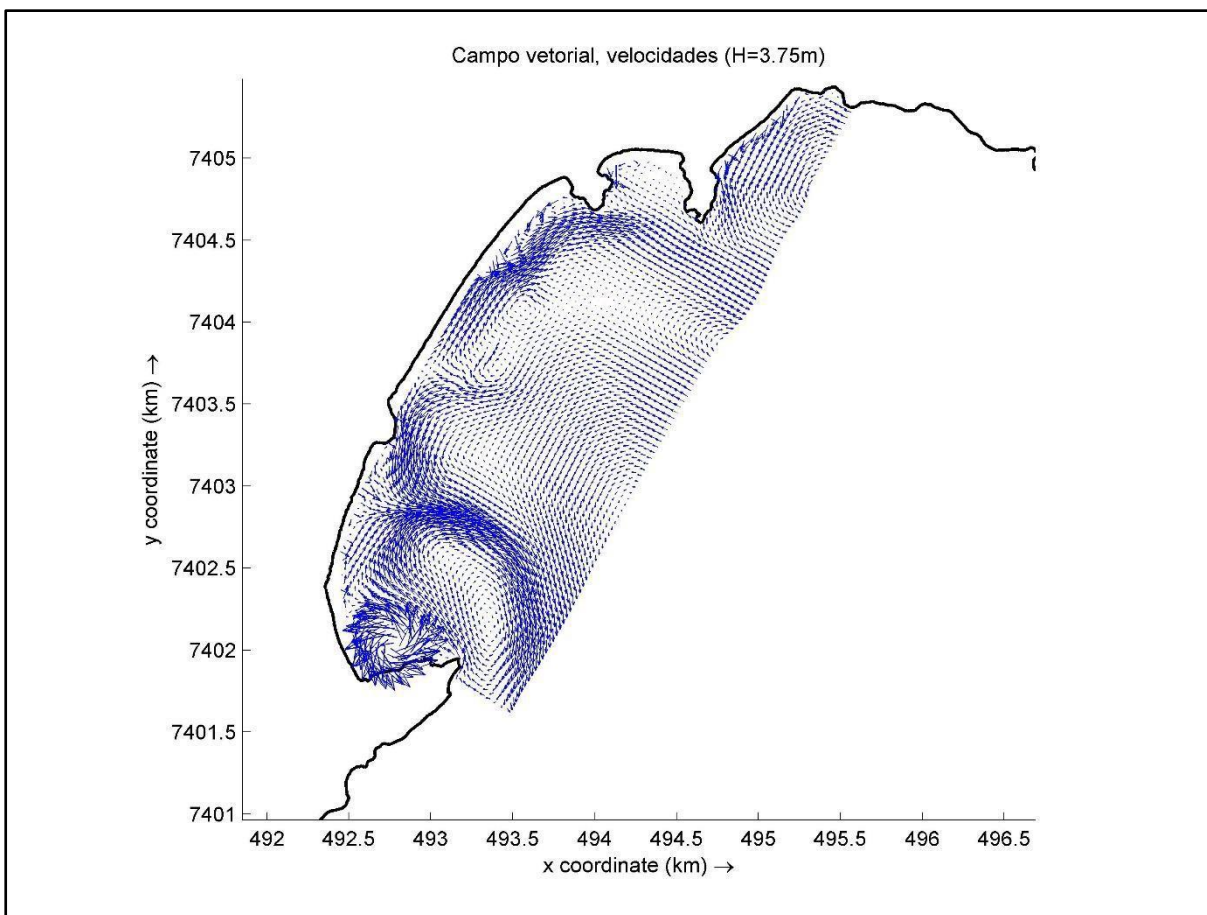


Figura 66 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 3.75m

Com mais energia entrando no sistema, é possível identificar com maior nitidez a formação de um novo sistema a partir do sistema principal da praia grande, o qual contorna o costão desaguando ao largo da Praia do Tenório, conforme figura 67.

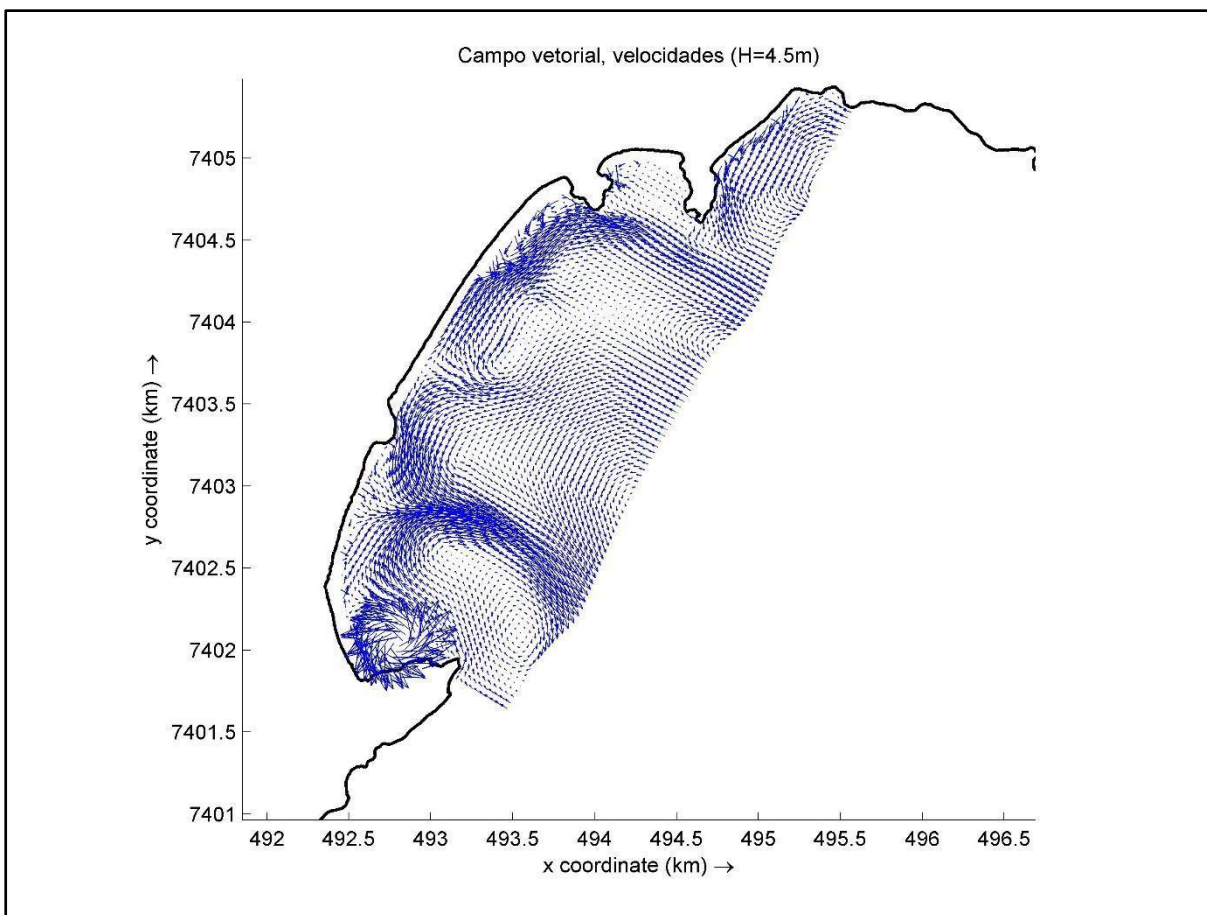


Figura 67 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de altura significativa igual a 4.5m

5.3.4 Análise sobre influência do período de onda:

Como um parâmetro descritor de onda, o período de onda (T) também exerce influência nos padrões das correntes de retorno. Com o objetivo de compreender esta relação, a última parte da análise de sensibilidade discorre sobre a variabilidade dos sistemas de retorno atribuída a diferentes valores de período de onda. 21 cenários foram estudados, onde para cada direção de onda, com altura de 1.5 m, e período variando. A Tabela 1 resume os cenários considerados nos experimentos numéricos.

5.3.4.1 Quadrante Sul:

Para ondas com incidência de 180° e altura de onda fixada em 1.5 m os padrões obtidos são apresentados nas Figuras 68 a 72. Como mencionado anteriormente, para esse ângulo de incidência de ondas, a Ilha Anchieta causa uma região de sombra, resultando em padrões mais amenos de correntes de retorno.

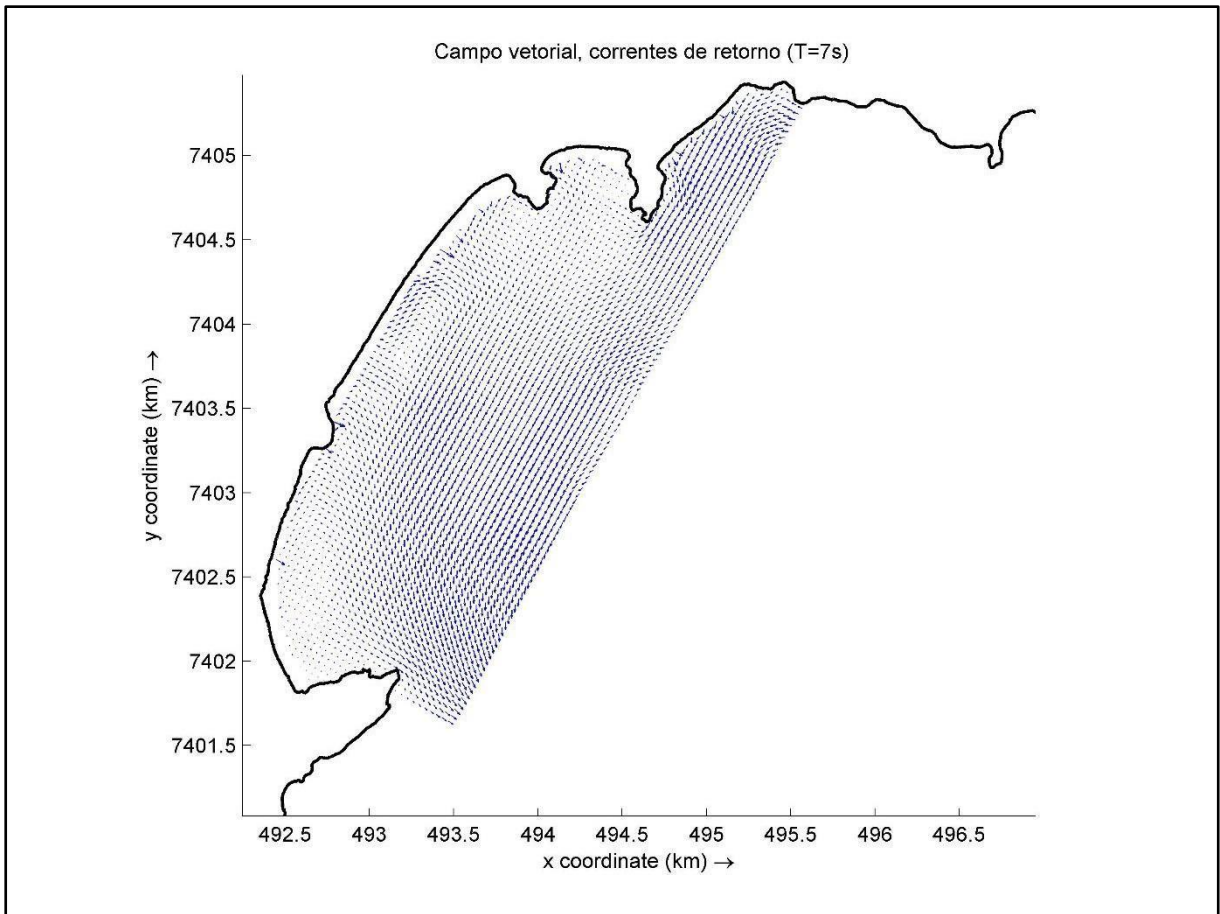


Figura 68 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 7s

Com o menor dos Períodos ($T = 7s$) não há formação de sistemas consolidados. O período baixo confere um set-up menor na região, o que dificulta a formação de áreas de canalização do fluxo. Na figura 69, que representa o campo vetorial de correntes sobreposto a um campo de altura significativa, observa-se que sistemas incipientes começam a se formar nas áreas de baixa altura de onda compreendidas entre regiões de altura de onda mais elevada.

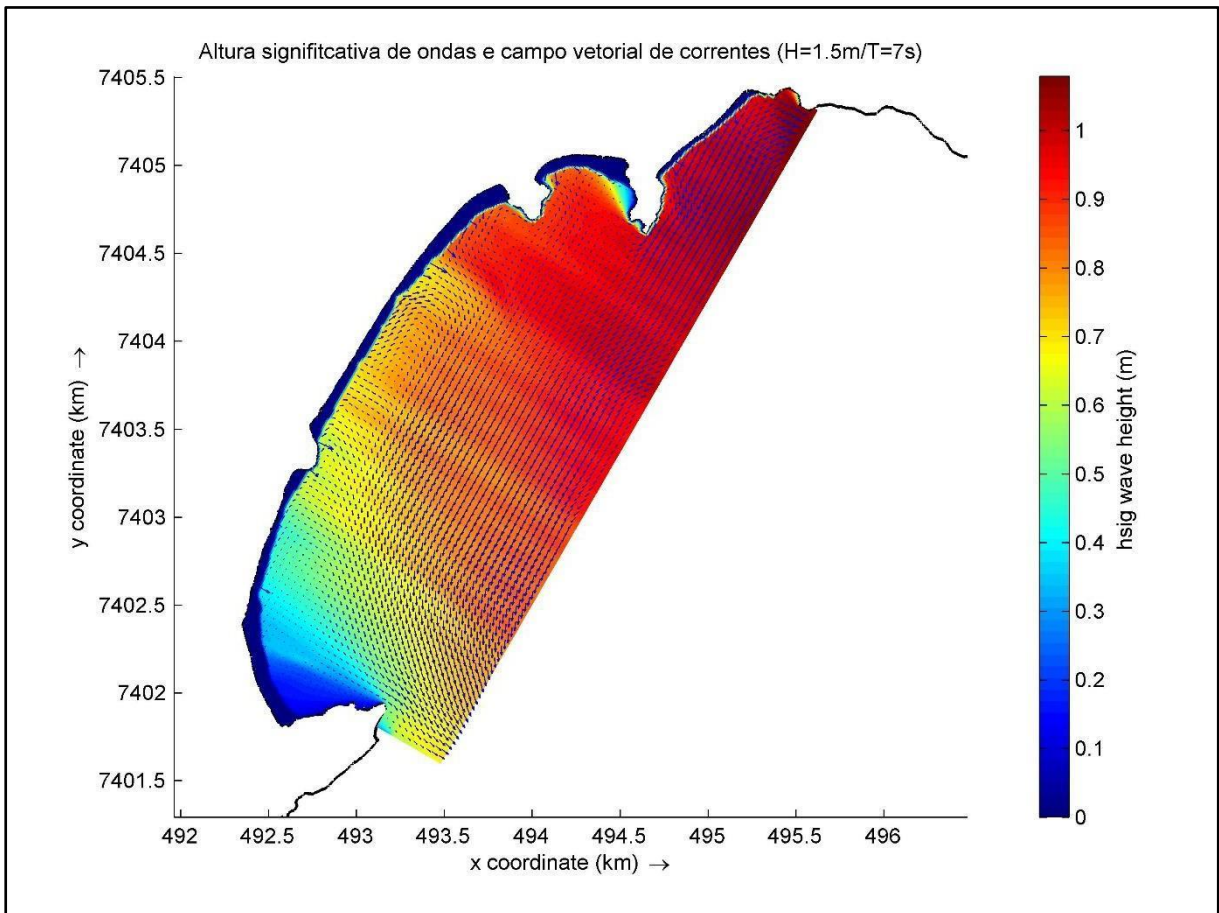


Figura 69 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 7s, sobreposto a um mapa de altura significativa de onda

À medida que o período de onda aumenta, sistemas de retorno começam a ser formados. Com 9 s de período ainda há pouca competência na geração e manutenção dos sistemas. Com 11s, já podemos observar canais mais nítidos na Praia Grande. Pelo menos 3 são identificados, 1 central com modo de circulação de escape/saída, outros 2 na porção sul da praia. Na Praia Vermelha do Centro, podemos identificar um sistema contornando o costão rochoso ao sul e no Tenório um contra fluxo modesto se desenha margeando o promontório que secciona Tenório e Praia Grande. Nesse sentido, vale ressaltar a relevância destes períodos supracitados que colaboram com 10 % e 16,26 %, respectivamente, do total das ondas incidentes (Tabela 2). Com 13 s de período, o sistema praiial alcança sua capacidade máxima na geração dos canais de retorno. À medida que o período aumenta (Figura 71), apenas deflexão dos sistemas já existentes é observada. Confirmando o resultado apresentado na Figura 71, a Figura 72 evidencia a preferência pela formação dos canais de retorno nas zonas de menor altura de onda. Resumindo, esta análise permite distinguir um sistema bem consolidado e permanente ao sul da Vermelha do Centro, margeando o costão rochoso. Três sistemas de retorno são observados na Praia

Grande, que se desenvolvem por completo a partir de ondas com 13 s de período. São observados também dois sistemas pouco expressivos nas Toninhas, um na parte central e outro ao sul. De modo geral o período exerceu pouca influência no comportamento dos sistemas quando comparado aos demais parâmetros.

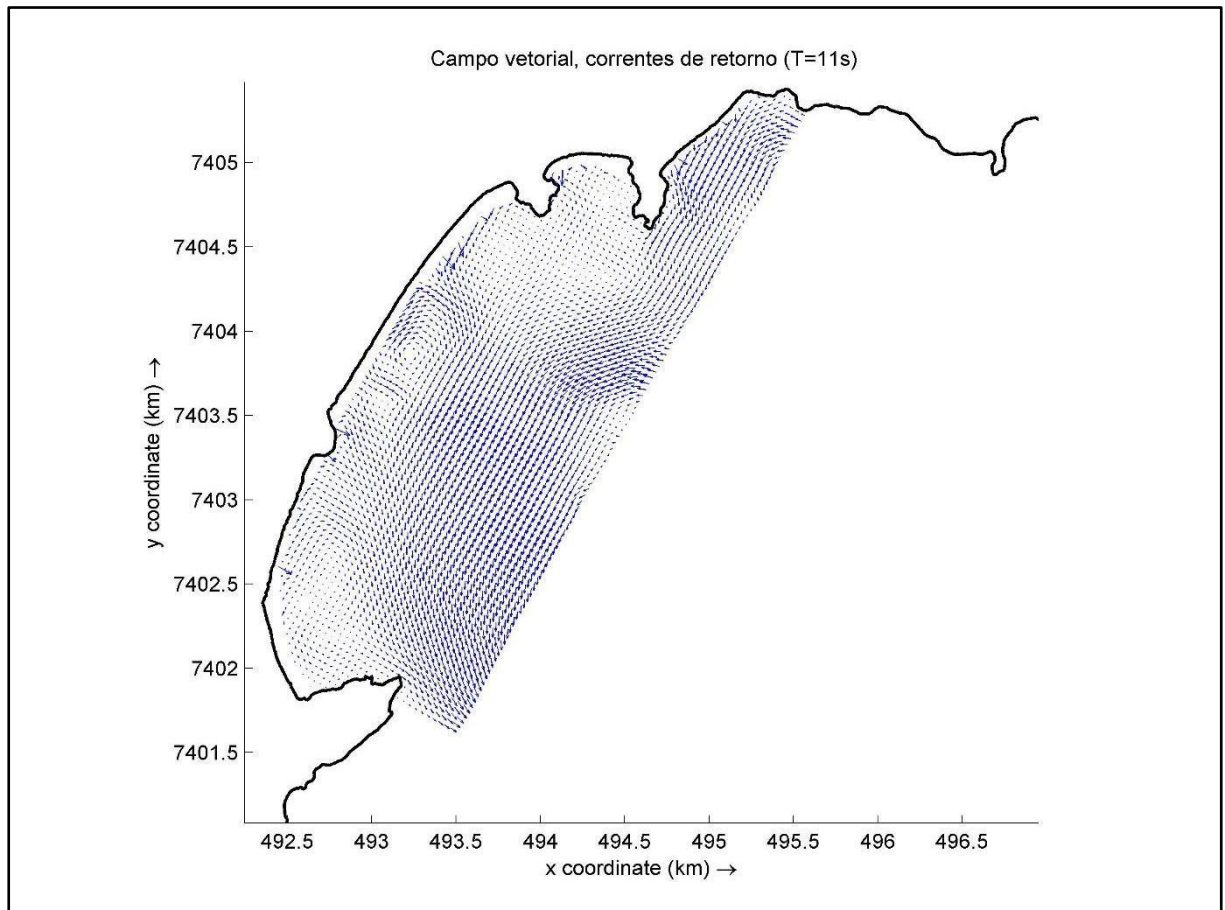


Figura 70 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 11s

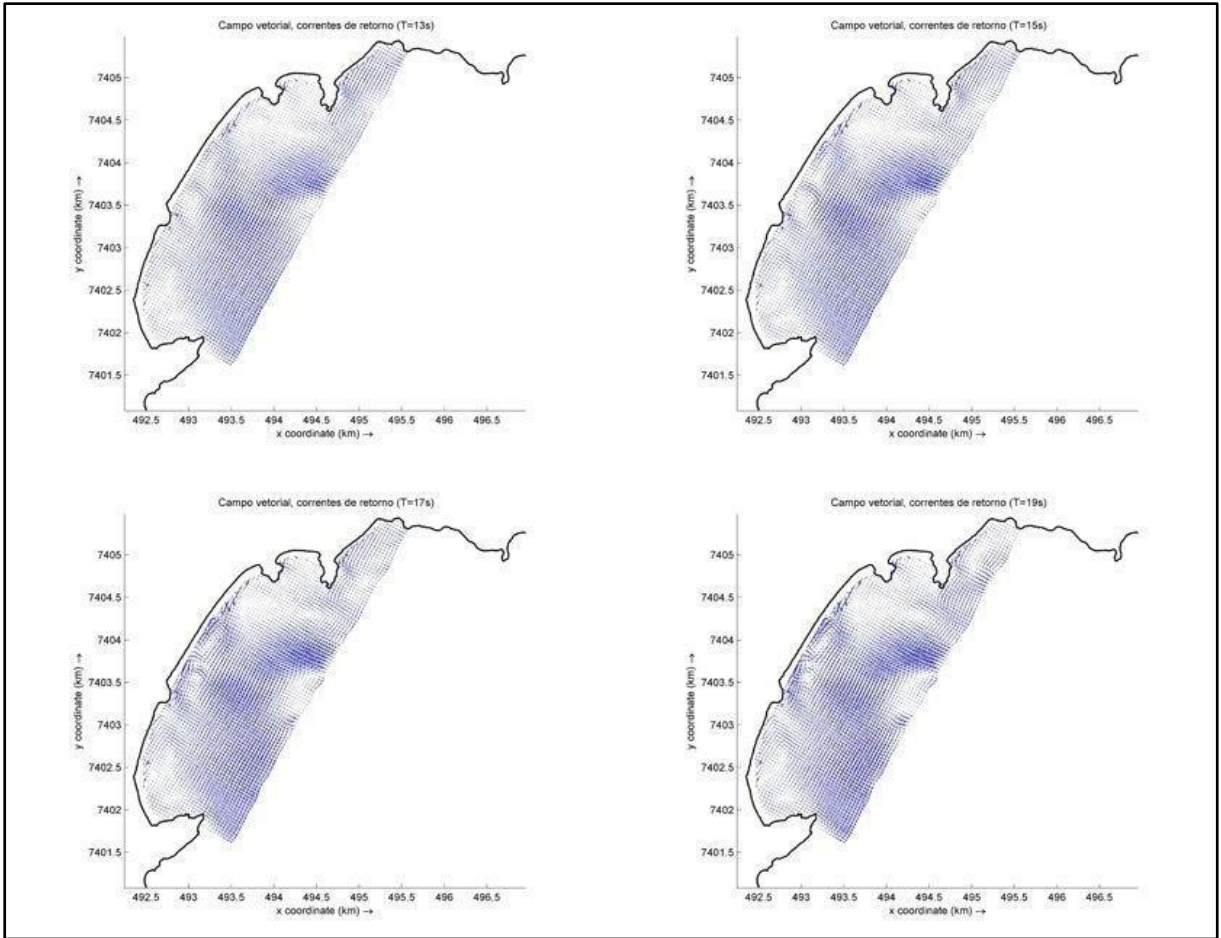


Figura 71 Composição de campos vetoriais de correntes, para o modelo forçado por ondas de Períodos iguais a 13,15,17 e 19 respectivamente.

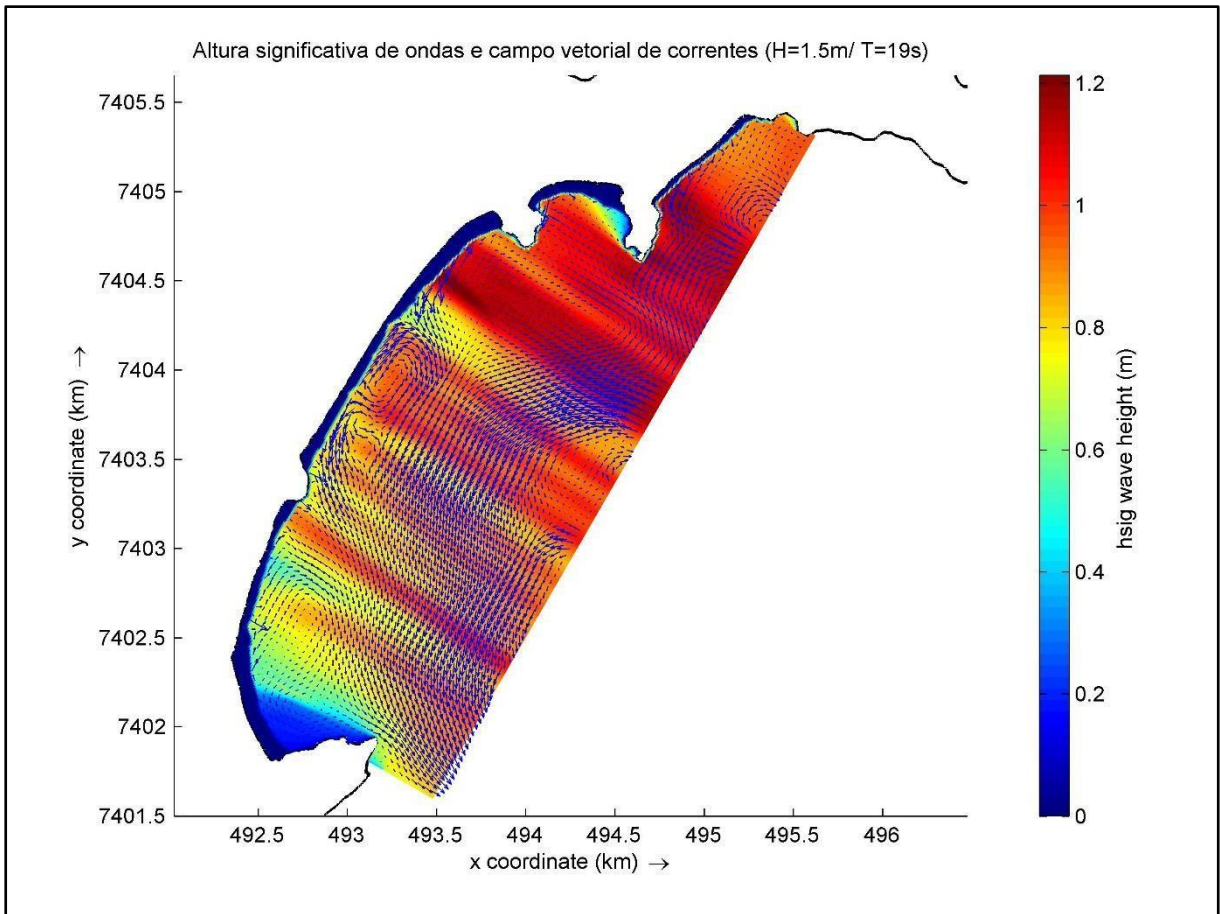


Figura 72 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 19s, sobreposto a um mapa de altura significativa de onda

5.3.4.2 Quadrante Sudeste:

Ondas com a mesma altura (1,5 m), mas com direção de 135° e períodos variando entre 7 e 19 s, intercalados a cada 2 s, foram analisados nesses experimentos. Nota-se que diferentemente da análise feita para ondas vindas de sul, ondas de sudeste são mais eficientes em gerar sistemas de retorno para as praias em questão e mesmo com o menor dos períodos já observamos pelo menos 6 sistemas de retorno bem desenvolvidos (Figura 73).

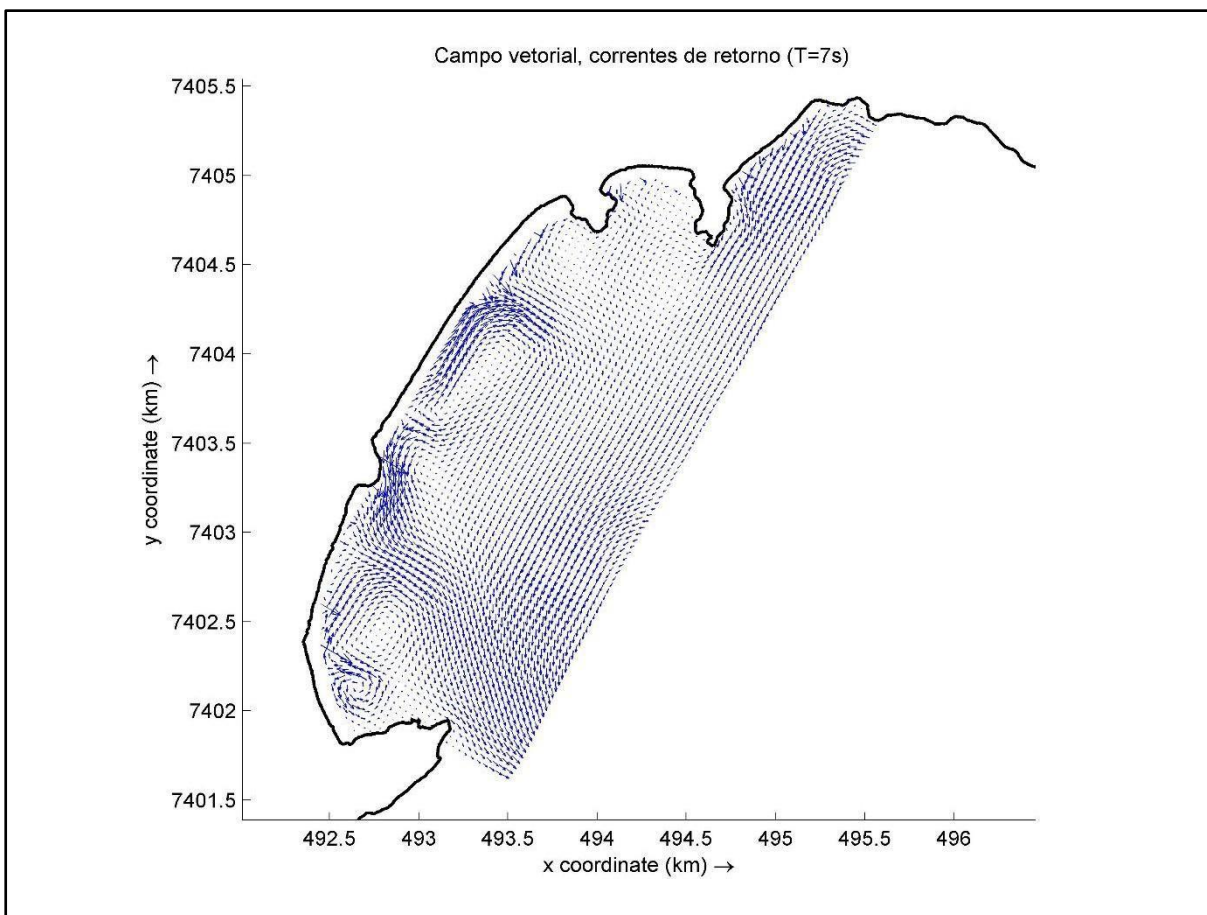


Figura 73 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 7s

Com período de 9 s (Figura 74), os sistemas observados anteriormente estão bem desenvolvidos, sendo a corrente de retorno central da Praia Grande, caracterizada por apresentar modo de circulação de escape/saída, assim como a corrente central das Toninhas. No extremo sul das Toninhas temos um sistema em regime de circulação celular. Nas adjacências dos promontórios rochosos temos a presença marcante das correntes de retorno de borda. Nesse contexto, ondas com períodos de 9 s representam importantes 10,7% do total das ondas analisadas.

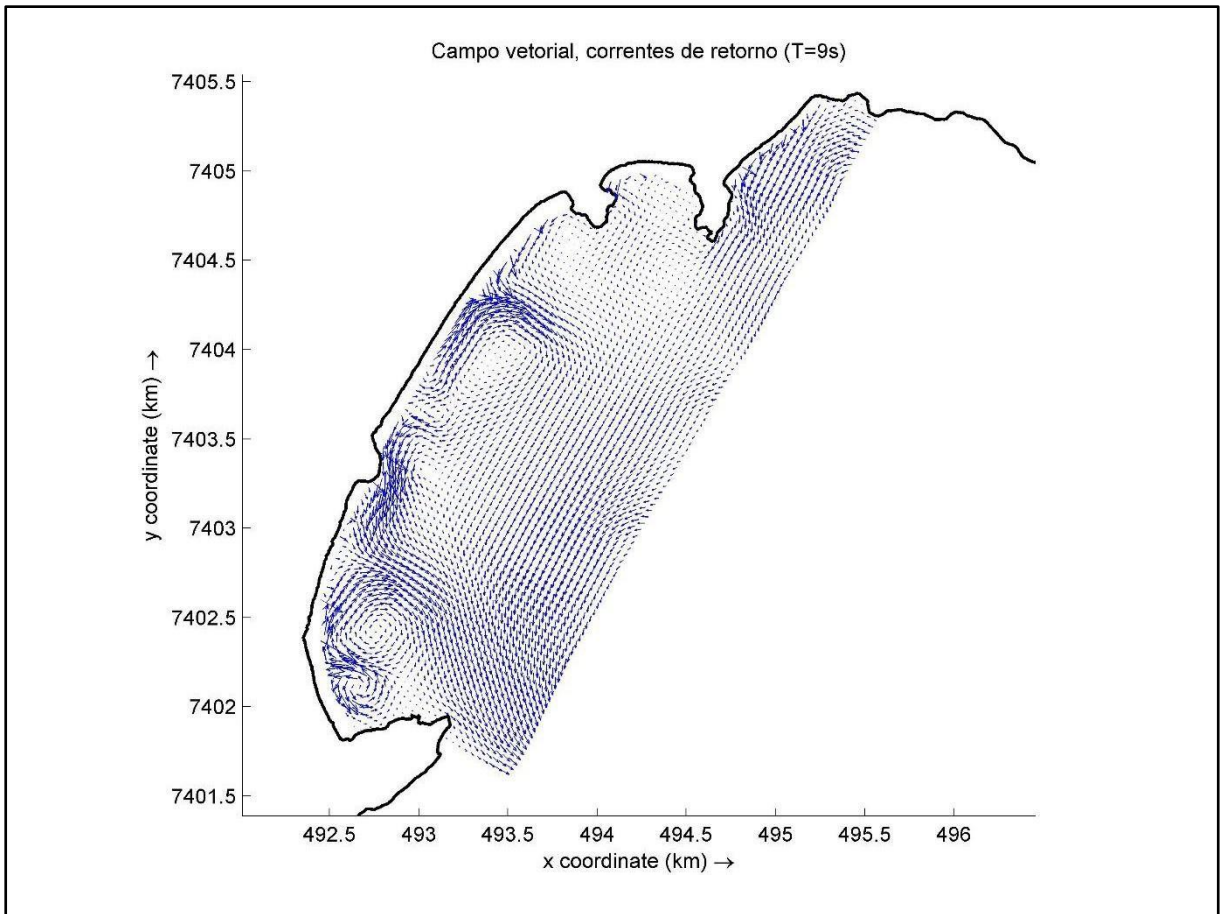


Figura 74 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 9s

Com o gradual aumento do período, os sistemas vão sendo intensificados e defletidos (Figuras 75 e 76). Outro aspecto interessante, é a mudança no regime de circulação; a corrente de retorno central da Praia Grande, que apresenta modo de escape até o cenário em que o período é igual a 11 s, gradualmente muda de comportamento, adquirindo características de regime celular, a partir dos 13 s de período. O mesmo é observado com a corrente de retorno central das Toninhas.

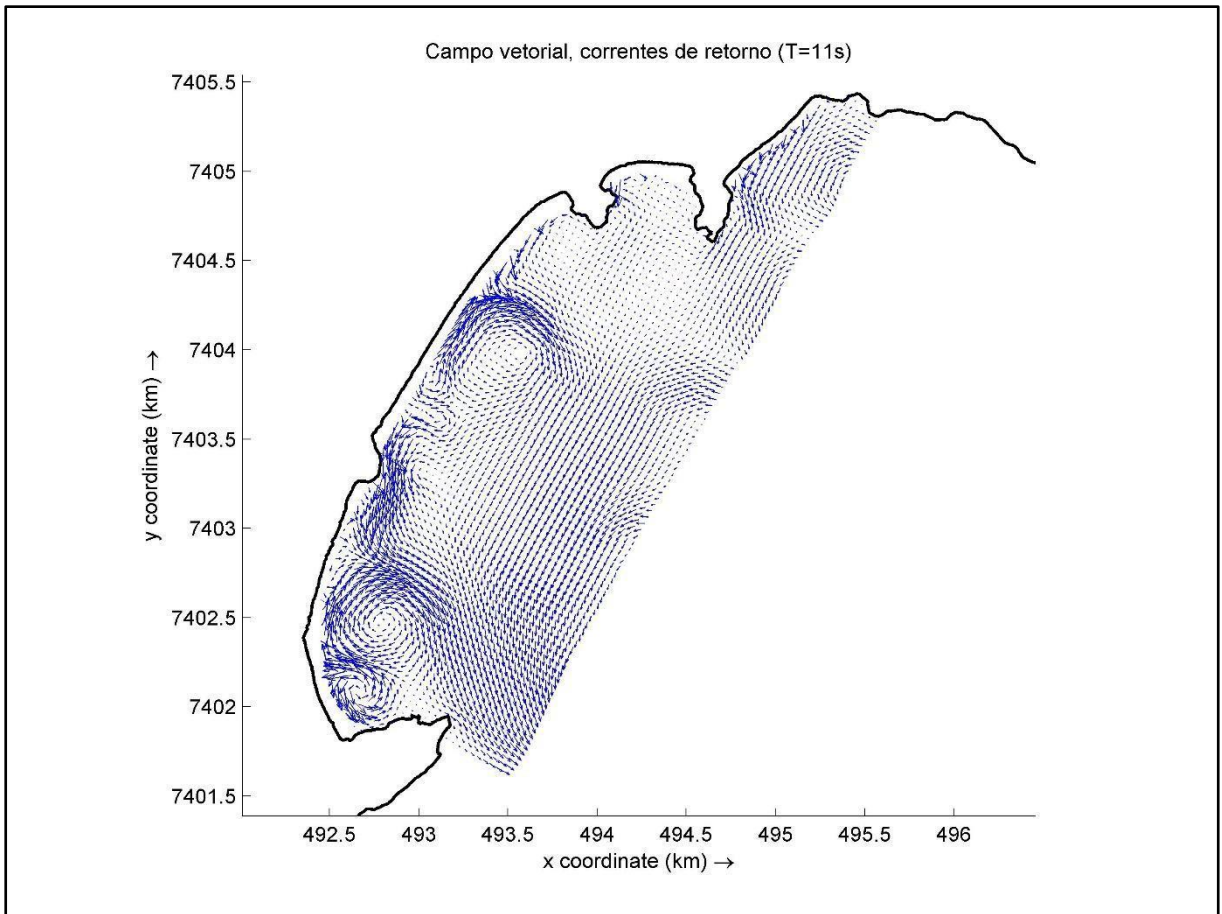


Figura 75 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 11s

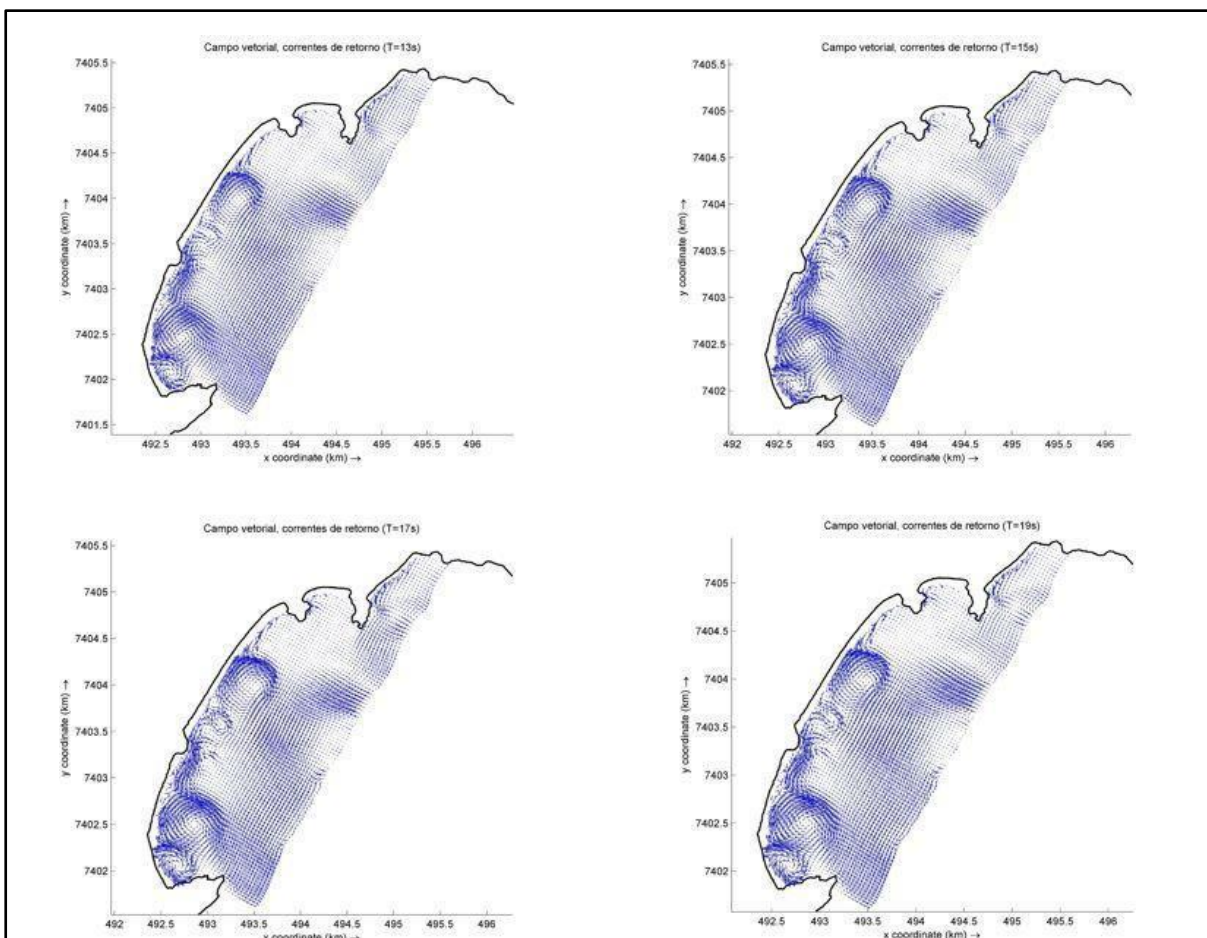


Figura 76 Composição de campos vetoriais de correntes, para o modelo forçado por ondas de Períodos iguais a 13,15,17 e 19 respectivamente

5.3.4.3 Quadrante Leste:

Este cenário simulou ondas com os mesmos 1.5 m de altura significativa, incidindo com 95.3° e períodos variados, resultados gráficos nas figuras 77 e 78. Para este cenário, observam-se 4 sistemas bem definidos, entre a região central da praia grande e a extremidade sul de Toninhas e um sistema incipiente no canto esquerdo da Vermelha do Centro. O sistema que ocorre no entorno do promontório que particiona as praias Grande e Toninhas, foi contabilizado apenas uma vez apesar de influenciar a dinâmica de ambas as praias. Com o decorrer da análise, nenhum novo sistema foi formado. Entretanto, é observada a intensificação dos sistemas e uma tendência de migração para norte. Outra observação foi a fusão entre o sistema central das Toninhas e a corrente de borda (Praia Grande/Toninhas). Destacando a relevância dos períodos de 7 e 9 s que representam 19,6 % e 12,6 % do total das ondas. Nesse sentido temos um quadro de alto potencial de risco para os banhistas, visto a elevada recorrência de eventos deste tipo.

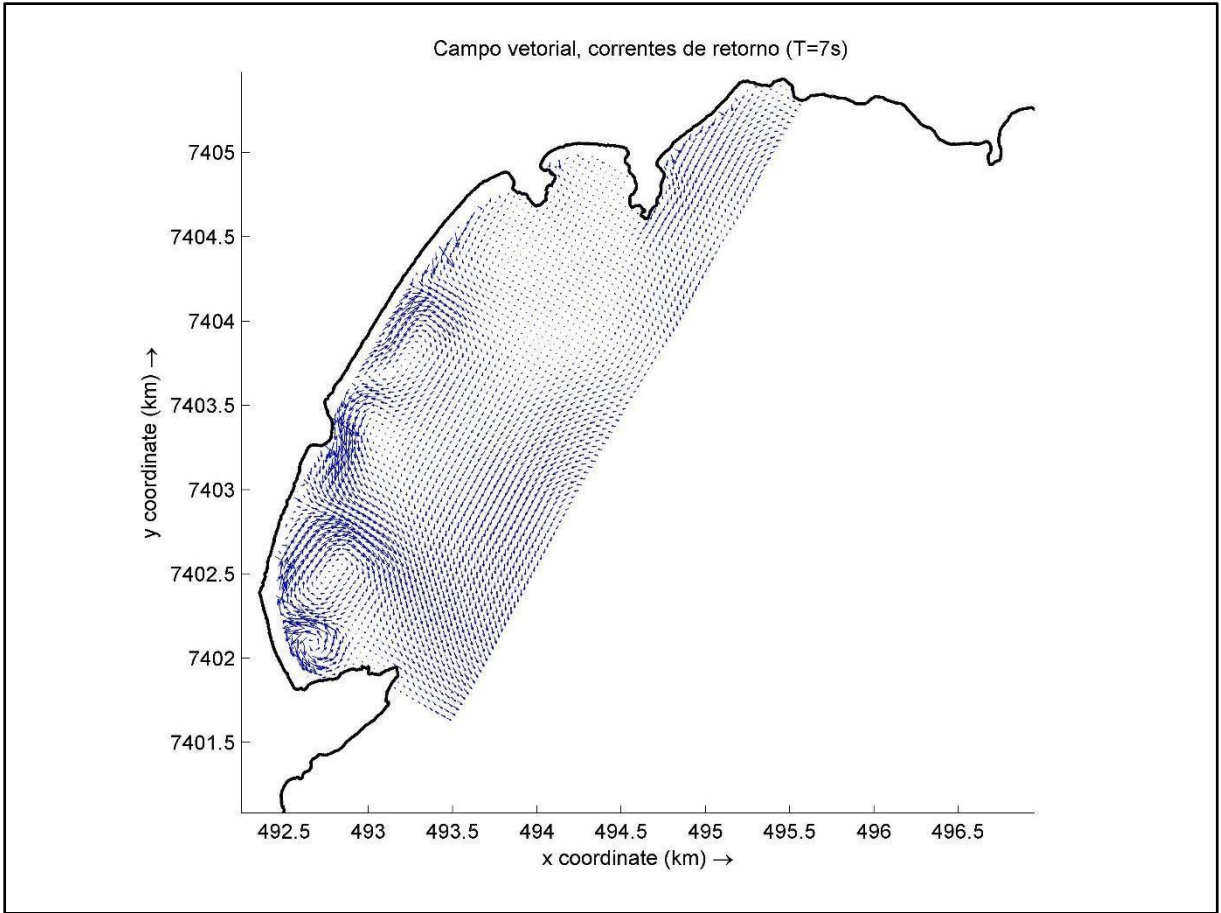


Figura 77 Campo vetorial de correntes, para o modelo forçado por ondas de Período igual a 7s

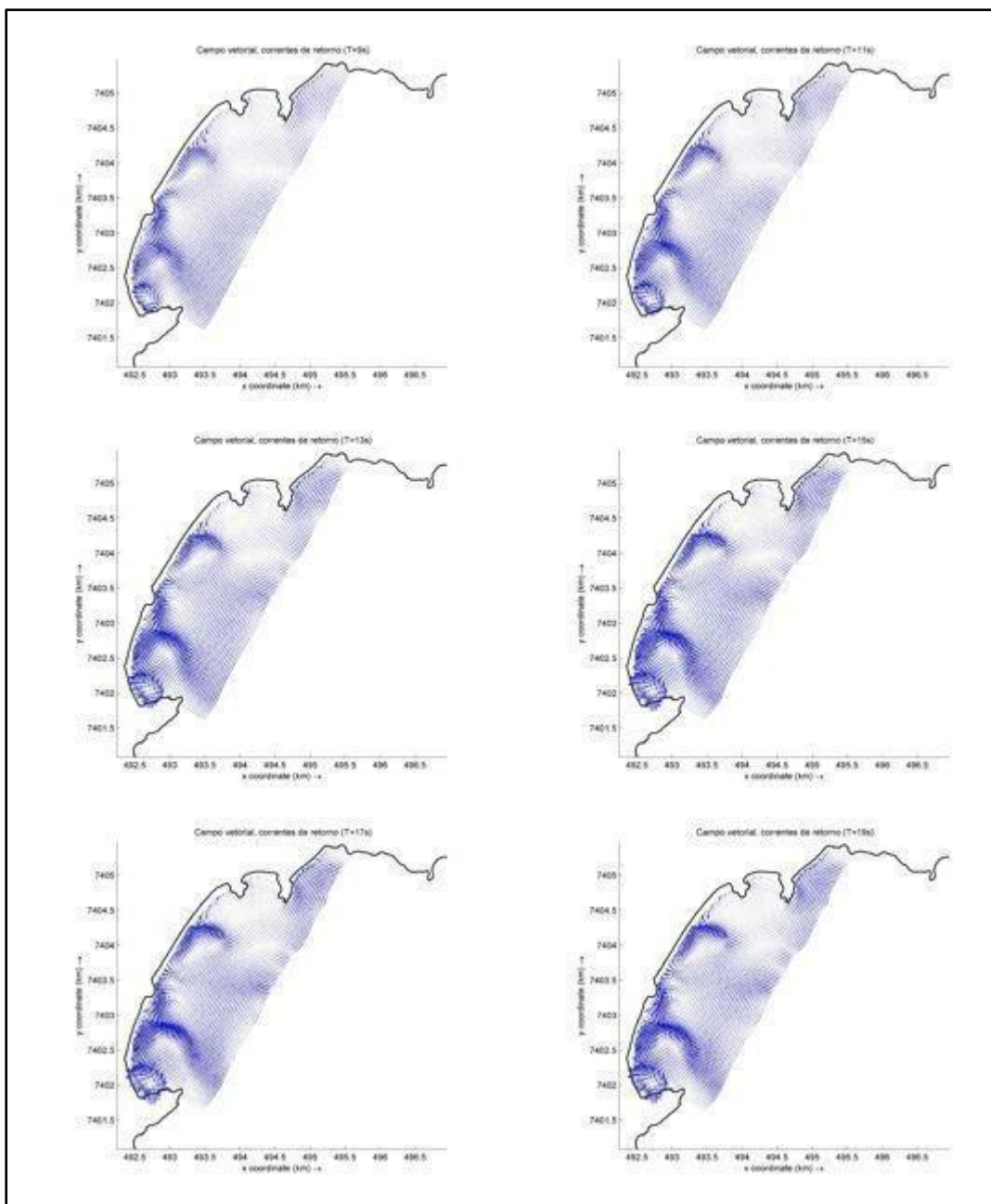


Figura 78 Composição de campos vetoriais de correntes, para o modelo forçado por ondas de períodos iguais a 9,11,13,15,17 e 19 respectivamente

De modo geral observou-se que para ondas do quadrante Leste, o período entre as ondas atua mais como agente modelador, causando migrações e fusões, do que como agente formador de sistemas.

5.3.4 Análise sobre influência do estado da maré:

Esta análise tem o objetivo de compreender melhor a influência da variação do nível da água exerce sobre o comportamento das correntes de retorno. Para os experimentos numéricos, foram aplicadas condições de contorno de ondas com altura significativa de 1.25 m e período de 9 s. No total foram 3 simulações analisadas uma para cada direção principal de incidência de ondas, Sul, Sudeste e Leste.

5.3.4.1 Ondas de Sul:

Quando a região sofre influência de ondas vindas de Sul, as correntes de maré atuam como agente defletor da direção das correntes de retorno. A mudança mais notável ocorre com a corrente de retorno central da Praia Grande, durante a maré enchente ela é defletida para norte sentido Praia do Tenório, como uma corrente de sombra, contudo na maré vazante o fluxo segue predominantemente para sul (Figuras 79 e 80).

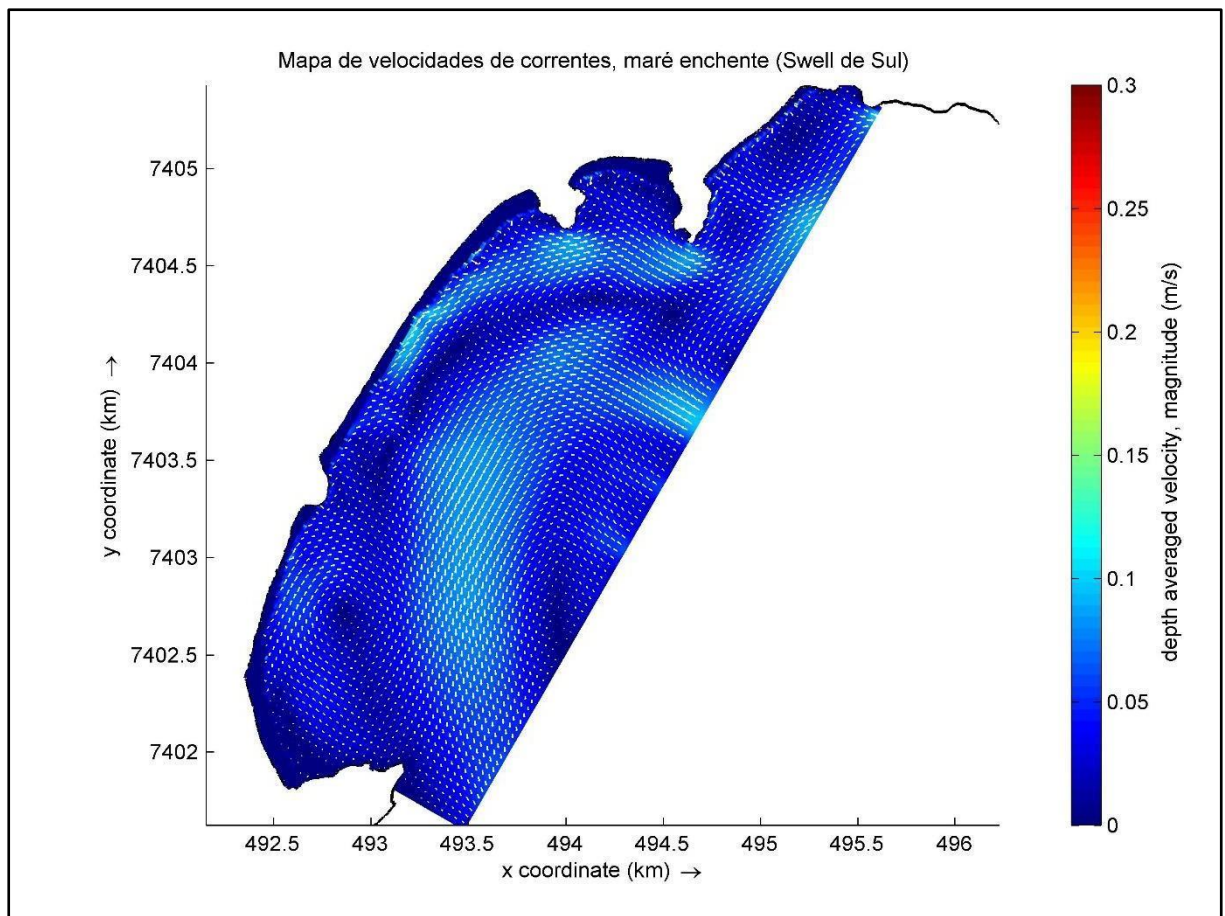


Figura 79 Mapa de correntes durante a maré enchente forçado por um Swell de Sul

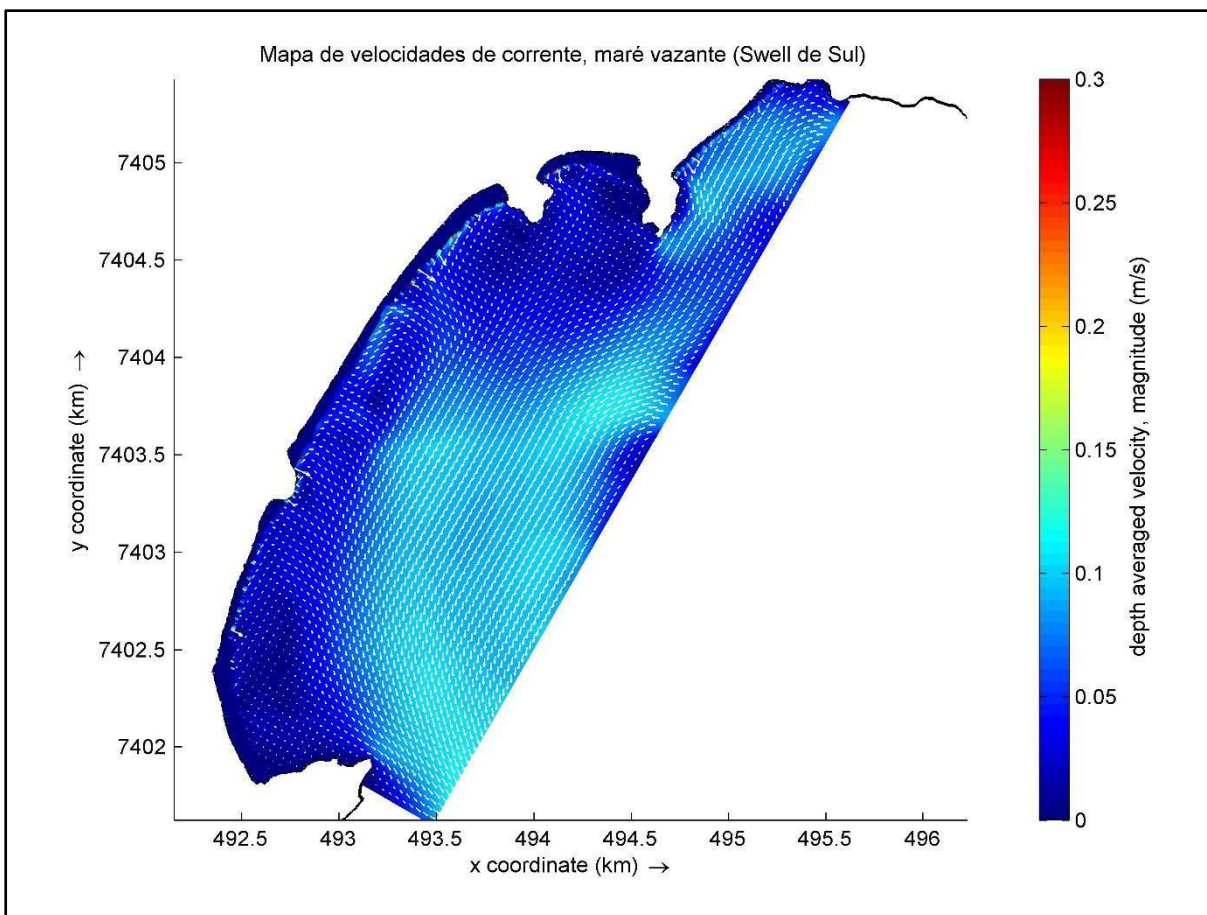


Figura 80 Mapa de correntes durante a maré vazante forçado por um Swell de Sul

5.3.4.2 Ondas de Sudeste:

Durante a maré enchente a corrente de retorno central da Praia Grande vai sofrendo deflexão para norte sentido Tenório, na vazante esta corrente é defletida para sul. Observa-se na Vermelha do Centro uma corrente menos intensa, perpendicular à costa, durante a enchente. Na vazante ela se intensifica e ganha característica de corrente de borda escoando no entorno do promontório rochoso que compartimenta as praias do Tenório e Vermelha do Centro (Figuras 81 e 82).

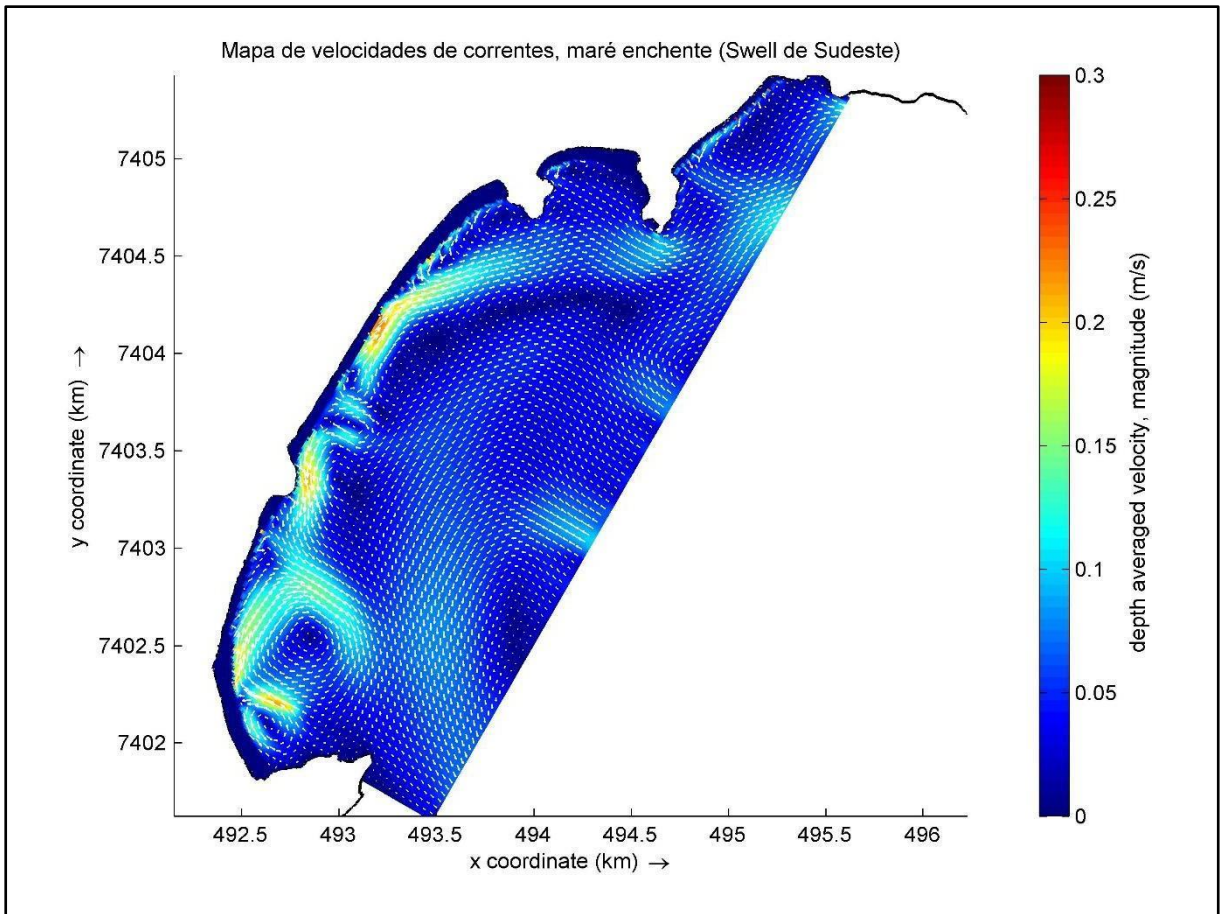


Figura 81 Mapa de correntes durante a maré enchente forçado por um Swell de Sudeste

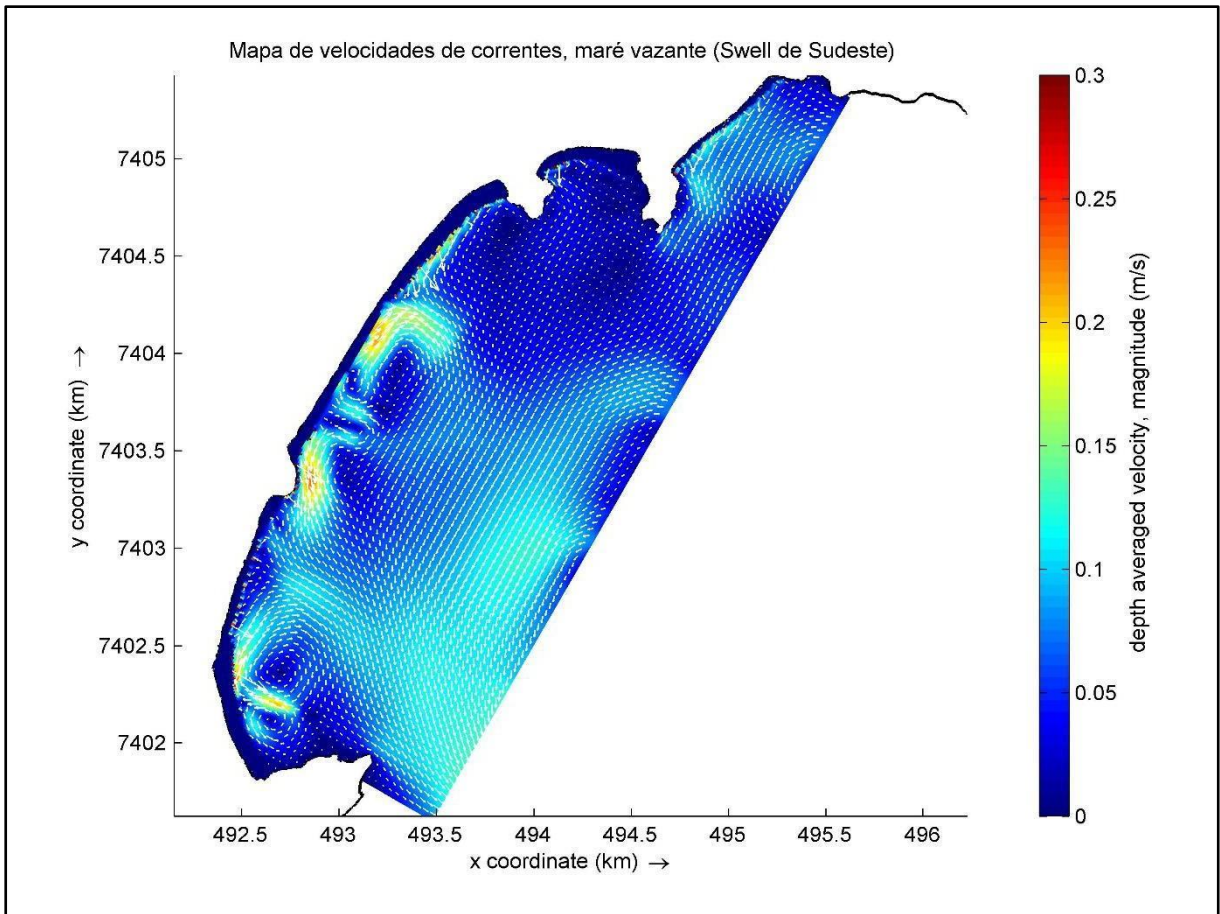


Figura 82 Mapa de correntes durante a maré vazante forçado por um Swell de Sudeste

5.3.4.3 Ondas de Leste:

Com ondas de leste, o mesmo padrão e comportamento observado nas análises anteriores ocorre em relação à corrente central da Praia Grande e da Vermelha do Centro. Na Praia das Toninhas, durante a maré enchente, um vórtice presença é observado no centro da praia. Com a maré vazante, o sistema perde vorticidade e adquire características de regime de escape, com um fluxo mais canalizado perpendicular à costa (Figura 83 e 84).

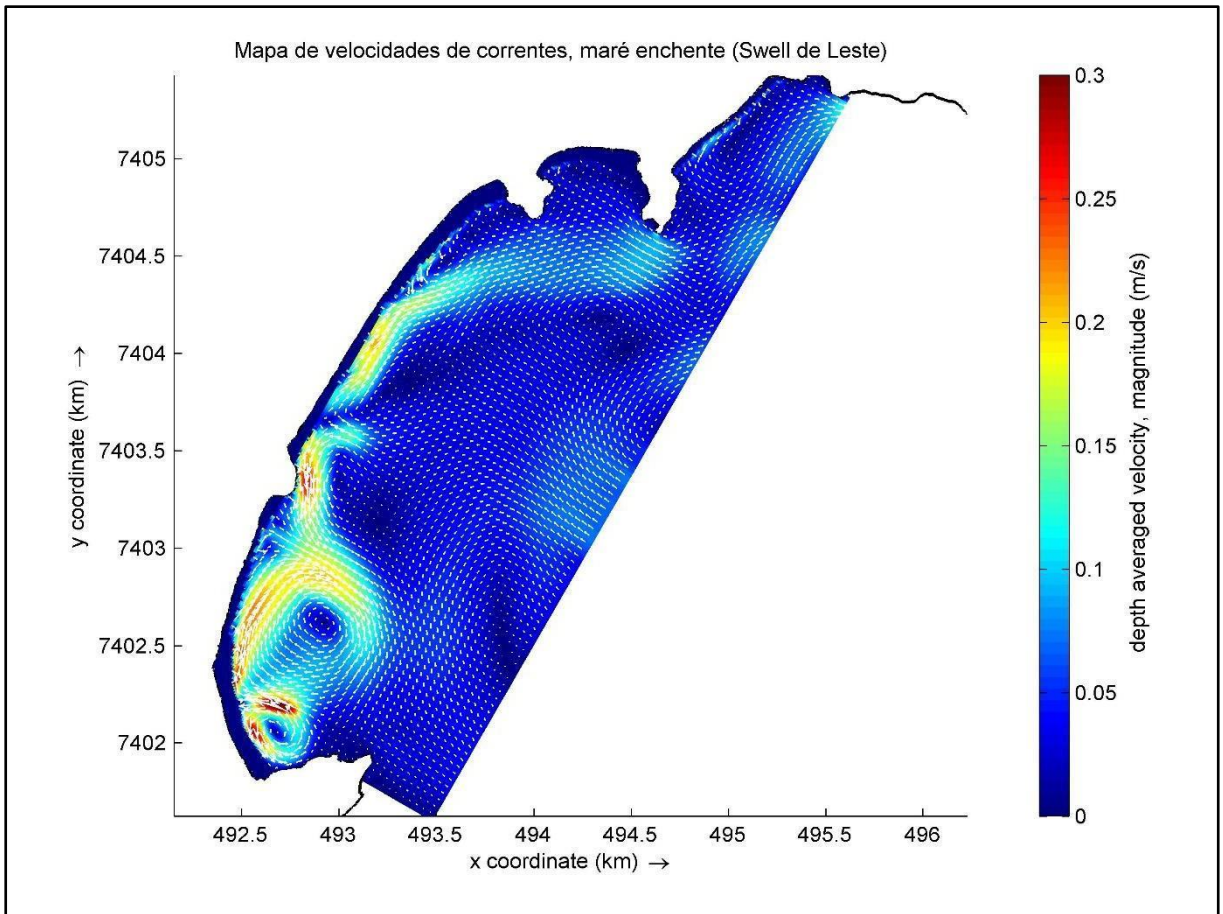


Figura 83 Mapa de correntes durante a maré enchente forçado por um Swell de Leste

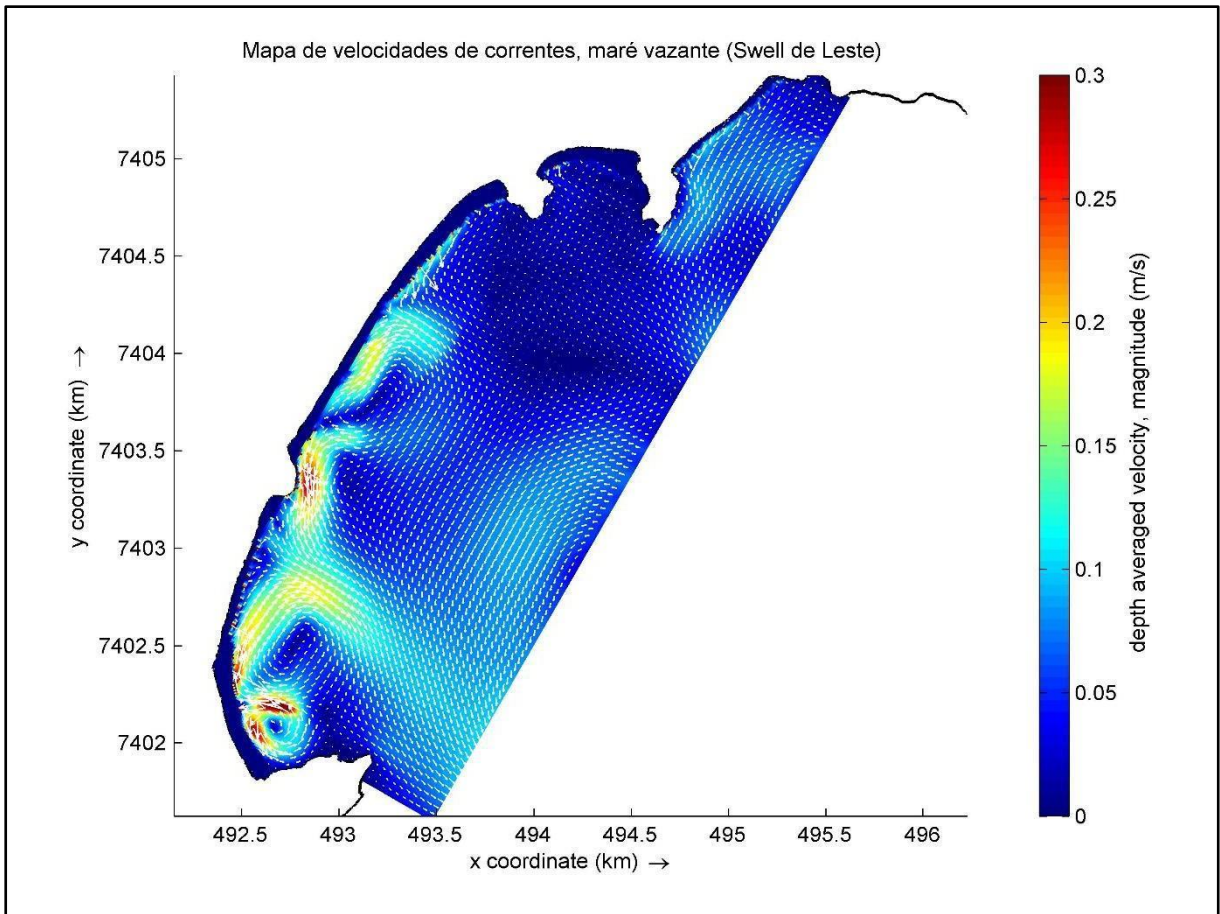


Figura 84 Mapa de correntes durante a maré vazante forçado por um Swell de Leste

De modo geral a variação do nível do mar causada pela maré atua como agente defletor da direção das correntes de retorno, alterando o rumo do fluxo em ciclos de vazante e enchente. Pouca influência observada sobre a intensidade, embora a maré enchente induza comportamentos ligeiramente mais intensos.

Em relação ao número de sistemas, foi observado que condições de maré enchente produziram um sistema a mais do que durante a maré vazante para todos os cenários analisados. Com base na Figura 85 foi possível observar a presença de 5, 9 e 7 sistemas para ondas de sul, sudeste e leste respectivamente, durante a maré vazante. A maré enchente contabilizou 6, 10 e 8 para os cenários com ondas incidentes da direção sul, sudeste e leste, respectivamente (Figura 86)

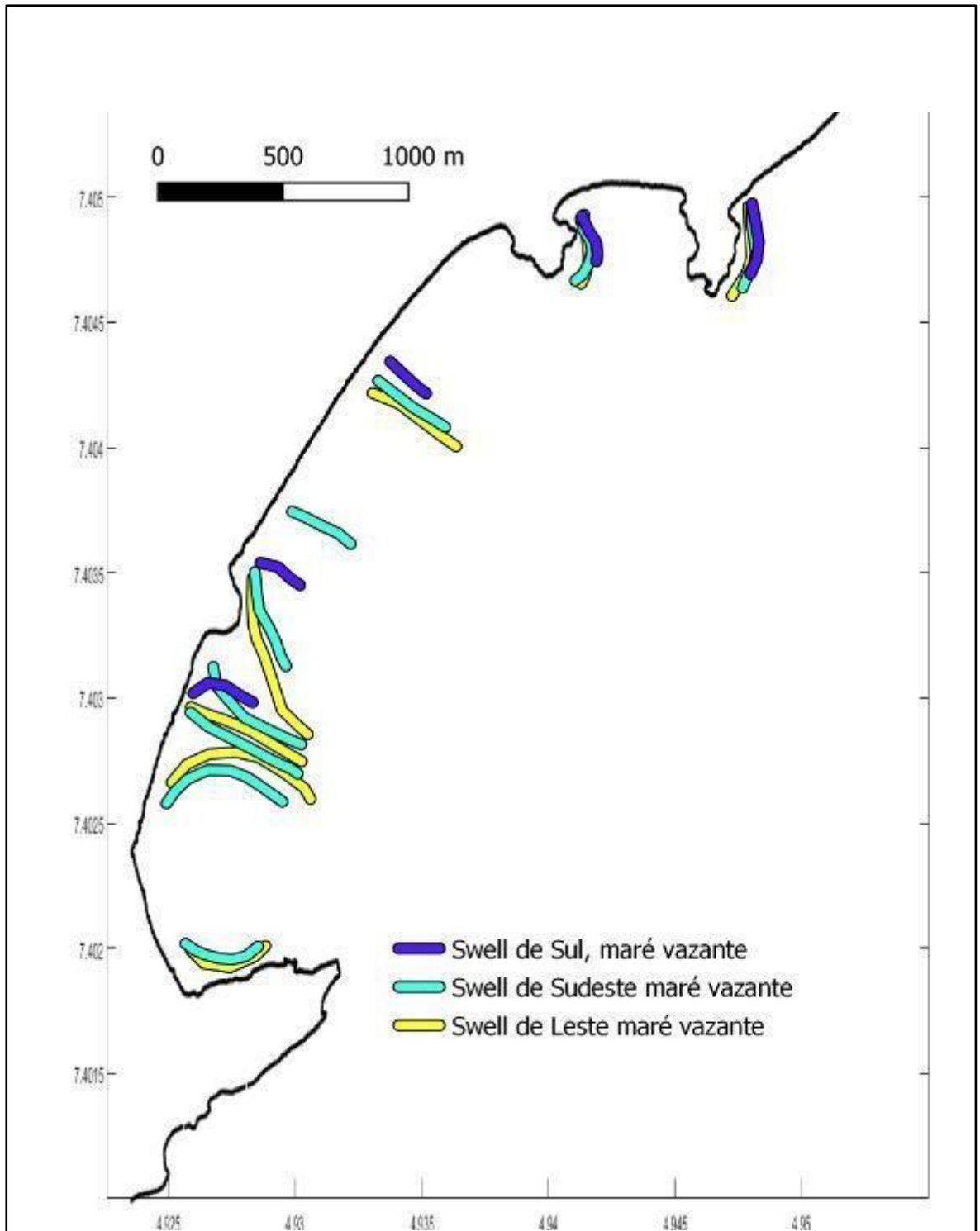


Figura 85 Mapa de localização dos sistemas de corrente de retorno, para os cenários de ondas de sul, sudeste e leste (maré vazante)

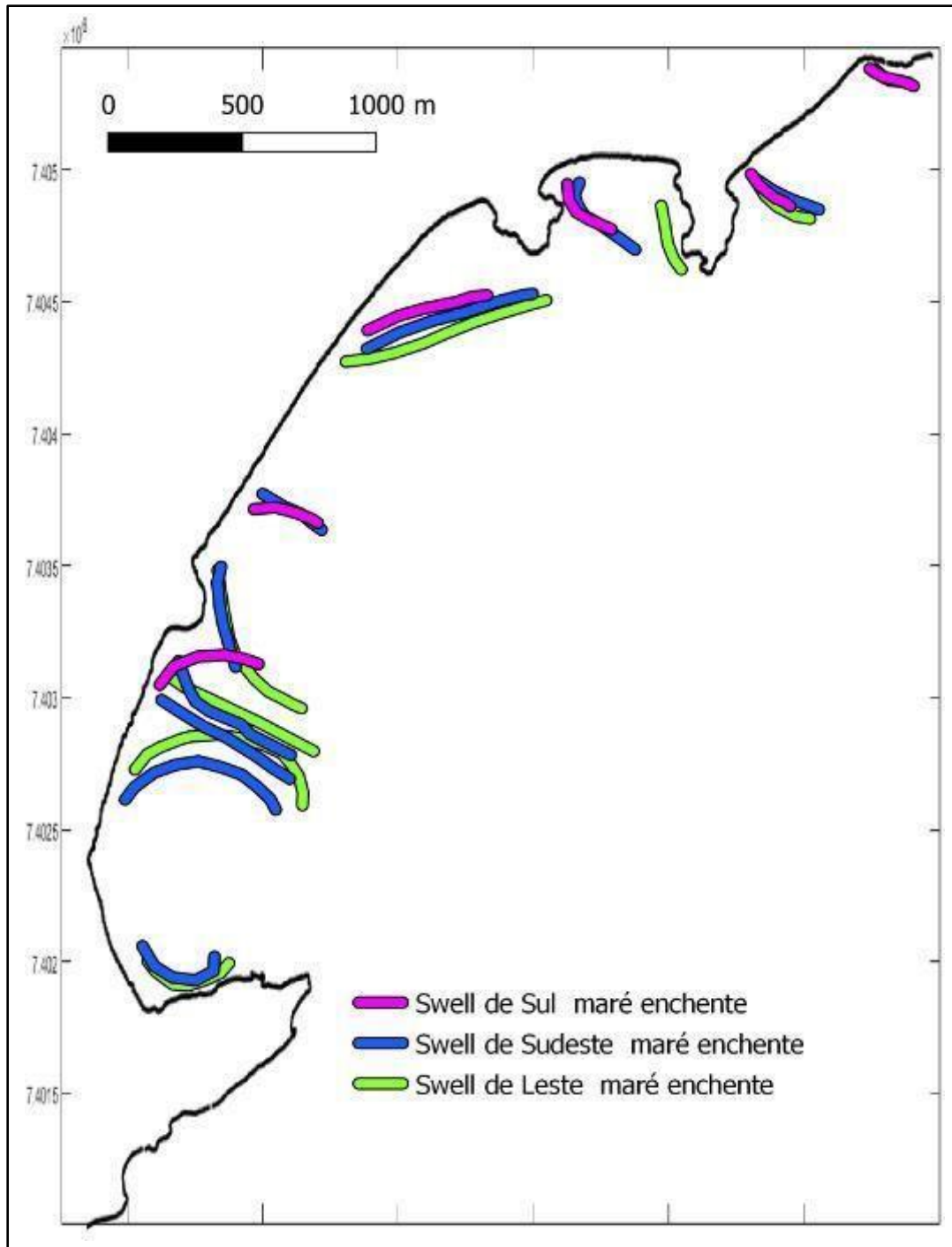


Figura 86 Mapa de localização dos sistemas de corrente de retorno, para os cenários de ondas de sul, sudeste e leste (maré enchente)

6. Conclusão

Os experimentos numéricos reproduziram sistemas de corrente de retorno diversos, tanto em seu modo de circulação quanto em modo de formação. Em relação ao modo de circulação, foram identificados sistemas em regime circulatório/celular e escape/saída. Em alguns casos foi observada a transformação de um regime para o outro à medida que as condições mudaram. Dos tipos de correntes de retorno observados, as mais frequentes foram as controladas pela batimetria e as correntes de borda.

Os experimentos numéricos reproduziram eventos bem determinados e recorrentes. Alguns desses sistemas ocorrem em praticamente todos os cenários, como o caso da corrente de retorno central na Praia Grande. Apesar de um número considerável de sistemas contabilizados, a quantidade de canais de retorno parece estar subestimada, sobretudo na praia Vermelha do Centro, onde através da análise das imagens são observadas mais correntes. Isso pode estar relacionado à resolução da grade numérica e malha batimétrica utilizadas, que não necessariamente reproduz toda a variação morfológica da região. Os resultados apresentam a dependência principal do padrão de correntes de retorno com a batimetria, altura e a direção das ondas incidentes. Os sistemas analisados mostraram uma grande sensibilidade a estes parâmetros. Parâmetros como o período de onda e fase da maré possuem menor influência sobre o padrão de correntes de retorno. A direção de onda mais eficiente na geração de sistemas de correntes de retorno nas praias em questão é sudeste, seguida por ondas de Leste e Sul.

A altura de onda atua tanto de forma construtiva como destrutiva durante a evolução destes fluxos. Inicialmente o incremento na energia do sistema favorecida pela altura de onda, impulsiona a formação de novos sistemas, contudo a energia em excesso desestabiliza o sistema em determinado momento, e então passa a ocorrer o efeito inverso e sistemas são desfeitos. Esse processo demanda ondas maiores (ao largo) para aquelas incidentes do quadrante Sul, pois em função da zona de sombra criada pela Ilha Anchieta, as ondas atingem as praias com alturas menores.

O período de onda se mostrou o parâmetro menos relevante na condução dos sistemas, as análises mostraram atuação como agente transformador dos sistemas criando fusões e causando deflexão nas correntes de retorno. Pouca influência observada na criação de novos sistemas.

Foi observado, da interação com a maré que, a onda de maré atua principalmente como agente defletor das correntes, alterando a direção do fluxo. Em alguns casos esse redirecionamento gera convergência entre correntes de alimentação originando um novo sistema, ou ainda fazendo com que um sistema seja conduzido ao longo de um promontório rochoso criando sistemas de borda.

Comparando os dois métodos empregados, modelagem numérica e mapa de Kernel decorrente da análise de imagens satelitais, observamos que os modelos reproduziram bem alguns dos sistemas evidenciados nos mapas. Diferenças são observadas no número de correntes formadas. Na praia das Toninhas recorrentemente temos a presença de uma corrente de retorno central, que em decorrência da

resolução da malha computacional pode estar representando a fusão entre alguns dos sistemas encontrados no mapa, possivelmente uma malha mais refinada seja capaz de distinguir melhor cada um destes sistemas. Há também a forte presença de uma corrente de borda nas adjacências do promontório que secciona a praia das Toninhas e Grande. Contudo os sistemas registrados pelo modelo, na porção Sul da praia não foram captados nas análises de Kernel.

Na Praia Grande invariavelmente podemos observar a presença de duas correntes de borda, uma em cada promontório de secção, também registradas na análise de Kernel. Em determinados momentos, uma corrente na porção sul da praia próxima ao costão rochoso na direção do córrego da Praia Grande, pode ser observada também nos modelos. Em relação a corrente central da Praia Grande o mesmo fenômeno de fusão atribuído a resolução da grade ocorre, evidenciando a presença de uma zona favorável a formação, mas subestimando o número real de sistemas existentes.

A praia do Tenório atuou tanto no modelo como nas análises de imagens satelitais como uma praia confinada, promovendo a formação das correntes que margeiam o costão o modelo não conseguiu captar a verdadeira intensidade dos sistemas, mas esporadicamente é possível evidenciar a presença deste tipo de corrente de retorno.

A praia Vermelha do Centro foi a que menos apresentou correspondência entre os dois métodos, o contorno da grade do modelo ficou muito próximo da região de interesse, isto pode ter comprometido os cálculos, gerando resultados imprecisos. Ainda assim, é inegável a presença de uma zona propícia a formação de correntes em ambas as extremidades da praia.

Os experimentos representaram bem os principais sistemas, sendo identificadas correntes de retorno de sombra e deflexão (contorno), correntes canalizadas fortemente dependentes da batimetria e correntes de embaçamento. Contudo o número total de correntes de retorno foi subestimado. Os experimentos numéricos representaram canais de retorno largos, que na prática supostamente seriam canais individualizados que acabaram sendo representados por um único sistema. A utilização de uma malha batimétrica e topográfica mais acurada e a implementação de uma grade computacional ainda mais refinada, podem vir a gerar resultados cada vez mais precisos.

Em relação a segurança de praias, as análises mostram um potencial de alto risco sobretudo para ondas de Leste e Sudeste que mesmo com ondas menores são capazes de gerar correntes de retorno intensas. Nesse sentido, ondulações de Sul representam condições mais seguras, porque a formação de sistemas concretos é fortemente dependente de ondas com altura significativa mais elevada, o que desencoraja banhistas a se arrisarem na zona de surf. Através da análise de sensibilidade conduzida com os diferentes experimentos numéricos, é possível identificar os principais fatores que controlam a ocorrência e padrão das correntes de retorno na região de interesse, identificando fatores que podem ser monitorados para o uso seguro do ambiente.

REFERÊNCIAS

- Arya, Sunil, David M. Mount, Nathan S. Netanyahu, Ruth Silverman, and Angela Y. Wu. 1998. "An Optimal Algorithm for Approximate Nearest Neighbor Searching in Fixed Dimensions." *Journal of the ACM* 45 (6): 891–923. <https://doi.org/10.1145/293347.293348>.
- BARNETT TP, and SUTHERLAND AJ. 1968. "Note on an Overshoot Effect in Wind-Generated Waves." *J Geophysical Research* 73 (22): 6879–85. <https://doi.org/10.1029/jb073i022p06879>.
- Bowen, Anthony J., and Douglas L. Inman. 1971. "Edge Waves and Crescentic Bars." *Journal of Geophysical Research* 76 (36): 8662–71. <https://doi.org/10.1029/jc076i036p08662>.
- Brander, Robert W., and Andrew D. Short. 2001. "Flow Kinematics of Low-Energy Rip Current Systems." *Journal of Coastal Research* 17 (2): 468–81.
- Bruneau, N., P. Bonneton, B. Castelle, and R. Pedreros. 2011. "Modeling Rip Current Circulations and Vorticity in a High-Energy Mesotidal-Macrotidal Environment." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116 (7): 1–17. <https://doi.org/10.1029/2010JC006693>.
- Bryant, Edward. 1982. "Behavior of Grain Size Characteristics On" 52 (2): 431–50. Calliari, Lauro Júlio, Dieter Muehc, Fernanda Gemael Hoefel, and Elírio Toldo Jr. 2003. "Morfodinâmica Praia: Uma Breve Revisão." *Brazilian Journal of Oceanography* 51 (unico): 63–78. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592003000100007>.
- Carter, Charles H., and Donald E. Guy Jr. 1988. "Coastal Erosion: Processes, Timing and Magnitudes at the Bluff Toe." *Marine Geology* 84 (1–2): 1–17. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(88\)90121-1](https://doi.org/10.1016/0025-3227(88)90121-1).
- Castelle, B., V. Marieu, G. Coco, P. Bonneton, N. Bruneau, and B. G. Ruessink. 2012. "On the Impact of an Offshore Bathymetric Anomaly on Surf Zone Rip Channels." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117 (1): 1–20. <https://doi.org/10.1029/2011JF002141>.
- Castelle, B., T. Scott, R. W. Brander, and R. J. McCarroll. 2016. "Rip Current Types, Circulation and Hazard." *Earth-Science Reviews* 163: 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.09.008>.
- Castelle, Bruno, and Giovanni Coco. 2012. "The Morphodynamics of Rip Channels on Embayed Beaches." *Continental Shelf Research* 43: 10–23. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.04.010>.
- Cavaleri, Luigi, and San Polo. 2006. "Wave Modelling – the State of the Art The WISE Group 1 14 July, 2006."
- COWELL, P. J.; THOM, B. G. **Morphodynamics of coastal evolution**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1994.
- DAVIS JR, R. A.; FITZGERALD, D. M. *Beaches and Coasts*, 419 pp. 2004.

- Fedderson, Falk. 2013. "The Generation of Surfzone Eddies in a Strong Alongshore Current." *Journal of Physical Oceanography* 44 (2): 600–617. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-13-051.1>.
- Fischler, Martin a, and Robert C Bolles. 1981. "Paradigm for Model." *Communications of the ACM* 24 (6): 381–95. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>.
- Fransson, A. 2015. "Journal of Geophysical Research : Oceans." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1–17. <https://doi.org/10.1002/2014JC010320>.Received.
- Furukawa, Yasutaka, and Jean Ponce. 2007. "Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis." *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, no. June 2014. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2007.383246>.
- Gilbert, G.K. 1980. "The Journal of Geology,." *The Journal of Geology* 17 (4): 344–50. <https://doi.org/10.1086/621620>.
- Gindraux, Saskia, Ruedi Boesch, and Daniel Farinotti. 2017. "Accuracy Assessment of Digital Surface Models from Unmanned Aerial Vehicles' Imagery on Glaciers." *Remote Sensing* 9 (2): 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs9020186>.
- Gonçalves, J. A., and R. Henriques. 2015. "UAV Photogrammetry for Topographic Monitoring of Coastal Areas." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104: 101–11. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>.
- GUZA, R. T., and R. E. DAVIS. 1974. "Excitation of Edge Waves By Waves Incident on a Beach." *J. Geophysical Res.* 79 (9 (MARCH 20, 1974)): 1285–91. <https://doi.org/10.1029/jc079i009p01285>.
- Holthuijsen, L. H., N. Booij, and T. H.C. Herbers. 1989. "A Prediction Model for Stationary, Short-Crested Waves in Shallow Water with Ambient Currents." *Coastal Engineering* 13 (1): 23–54. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(89\)90031-8](https://doi.org/10.1016/0378-3839(89)90031-8).
- Huntley, D. A., and A. J. Bowen. 2015. "Beach Cusps and Edge Waves" 80 (21): 1378–93. <https://doi.org/10.1061/9780872621909.083>.
- Inman, D. L., R. J. Tait, and C. E. Nordstrom. 1971. "Mixing in the Surf Zone." *Journal of Geophysical Research* 76 (15): 3493–3514. <https://doi.org/10.1029/jc076i015p03493>.
- Ltrorânen, D E Dertva, Celia Regina, and De Gouveia Souza. 1997. *As Celulas de Deriva Litorânea e a Erosão Das Praias Do Estado de São Paulo*. Vol. il.
- MacMahan, Jamie, Jeff Brown, and Ed Thornton. 2009. "Low-Cost Handheld Global Positioning System for Measuring Surf-Zone Currents." *Journal of Coastal Research* 253: 744–54. <https://doi.org/10.2112/08-1000.1>.
- Mahiques, Michel Michaelovitch De, Eduardo Siegle, Javier Alcántara-carrió, Filipe Galiforni Silva, Paulo Henrique, Gomes De Oliveira, and Cristina Celia Martins. 2016. "Brazilian Beach Systems" 17: 397–418. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9>.

- MESQUITA, A.R. Variações do nível médio do mar nas escalas decadal e interdecadal na costa sudeste do Brasil. In: SEMINÁRIO SOBRE ONDAS E MARÉS OCEÂNICA, 1o, Arraial do Cabo (RJ). **Resumos...** Arraial do Cabo, 1995. p. 52-53.
- MONTEIRO, C.A.F. A Dinâmica Climática e as Chuvas do Estado de São Paulo. São Paulo, Fapesp/USP/IGEOG, 181p., 1973.
- Objectives, Chapter. 2012. *Gravity Waves. Fluid Mechanics*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-382100-3.10007-1>.
- Ozkan-haller, H Tuba, and James T Kirby. n.d. “Longshore Current ’ A Comparison of Observations and Computations.” *North*, no. 1999.
- PD, Komar. 1998. “Wave Erosion of a Massive Artificial Coastal Landslide.” *Earth Surface Processes and Landforms* 23 (October 1996): 415–28.
- Pereira, D, Eduardo Siegle, and Luiz B De Miranda. 2010. “Hidrodinâmica E Transporte De Material Particulado Em Suspens ~Ao Sazonal Em Um Estu´Ario Dominado Por Mar´E: Estu´Ario De Caravelas (Ba)” 28: 427–44.
- Price, T. D., and B. G. Ruessink. 2011. “State Dynamics of a Double Sandbar System.” *Continental Shelf Research* 31 (6): 659–74. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.12.018>.
- Ris, R C, and N Booij. 1999. “Fliesche Zeegat.” *October* 104: 7667–81.
- Scott, Tim, Gerhard Masselink, and Paul Russell. 2011. “Morphodynamic Characteristics and Classification of Beaches in England and Wales.” *Marine Geology* 286 (1–4): 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.04.004>.
- SATYAMURTI, P.; NOBRE, C.; DIAS, P. L. S. South America. In: Karoly, D.J. & Vincent, D.J (eds.). *Meteorology of the Southern Hemisphere*. American Meteorological Society, Boston, 1998, p.119-139.
- Shepard, K. O. Emery, and E. C. La Fond *The Journal of Geology* 1941 49:4, 337-369
- Rip Currents: A Process of Geological Importance.
- SECRETARIA DOS NEGOCIOS DA SEGURANÇA PÚBLICA POLICIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO CORPO DE BOMBEIROS GRUPAMENTO DE BOMBEIROS MARÍTIMO. Orientações de imprensa 2019/20220 OPERAÇÃO PRAIA SEGURA 2019-20
- Short, A. D. 2010. “Beaches, Physical Processes Affecting.” *Encyclopedia of Ocean Sciences* 3: 305–15. <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00084-9>.
- Short, A D. 2007. “Australian Rip Systems – Friend or Foe ? Author (s): A . D . Short Linked References Are Available on JSTOR for This Article : You May Need to Log in to JSTOR to Access the Linked References . Australian Rip Systems – Friend or Foe ?,” no. 50: 7–11.
- Short, Andrew D, and Gerhard Masselink. 1993. “Of Coastal Morphology : A Conceptual Beach Model.” *Journal of Coastal Research* 9 (3): 785–800.
- Silva FG, Sousa PHGO, Siegle E (2014) Wave climate analysis and its relation with erosion processes along the beach system of Ilha Comprida (SP), Brazil. In: Proceedings of the 17th Physics of Estuaries and Coastal Seas (PECS) conference. Porto de Galinhas, Brazil.
- Snively, Noah, Steven M. Seitz, and Richard Szeliski. 2008. “Skeletal Graphs for Efficient Structure from Motion.” *26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR*.

<https://doi.org/10.1109/CVPR.2008.4587678>.

Souza, Celia Regina de Gouveia. 2013. “Praias Arenosas Oceânicas Do Estado De São Paulo (Brasil): Síntese Dos Conhecimentos Sobre Morfodinâmica, Sedimentologia, Transporte Costeiro E Erosão Costeira.” *Geography Department, University of Sao Paulo*, no. 2012: 307–71. <https://doi.org/10.7154/rdg.2012.0112.0015>.

Thornton, E. B., and R. T. Guza. 1982. “Energy Saturation and Phase Speeds Measured on the Natural Beach.” *Journal of Geophysical Research* 87 (C12): 9499–9508. <https://doi.org/10.1029/JC087iC12p09499>.

Turner, Ian L., Mitchell D. Harley, and Christopher D. Drummond. 2016. “UAVs for Coastal Surveying.” *Coastal Engineering* 114: 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.03.011>.

Unit, Coastal Studies. 2006. “MORPHODYNAMIC VARIABILITY OF SURF ZONES AND BEACHES : Virginia Institute of Marine Science , School of Marine Science , College o f William and Surf Zones and Beaches Are Interesting Because They Are Not All the Same . They Vary in Time with Changing Wave” 56 (1135): 93–118.

Ventura, Daniele, Michele Bruno, Giovanna Jona Lasinio, Andrea Belluscio, and Giandomenico Ardizzone. 2016. “A Low-Cost Drone Based Application for Identifying and Mapping of Coastal Fish Nursery Grounds.” *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 171: 85–98. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.01.030>.

Westoby, M. J., J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey, and J. M. Reynolds. 2012a. “‘Structure-from-Motion’ Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool for Geoscience Applications.” *Geomorphology* 179: 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.

Westoby, M J, J Brasington, N F Glasser, M J Hambrey, and J M Reynolds. 2012b. “Geomorphology ‘ Structure-from-Motion ’ Photogrammetry : A Low-Cost , Effective Tool for Geoscience Applications.” *Geomorphology* 179: 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.

Wright, L.D., and Andrew D. Short. 2006. “Morphodynamic Variability of Surf Zones and Beaches : Virginia Institute of Marine Science , School of Marine Science , College o f William and Surf Zones and Beaches Are Interesting Because They Are Not All the Same . They Vary in Time with Changing Wave.” *Marine Geology* 56 (1135): 93–118. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2).

