



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

**ESTUDO LOCACIONAL DE ESTRUTURA DE AMPLIFICAÇÃO
DE ONDAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ASSOCIADO À
ESTRUTURA DE DISSIPAÇÃO PARA ESPORTE, LAZER E
PROTEÇÃO COSTEIRA, NO LITORAL DE IPARANA, CE**

Paulo Tadeu de Oliveira Júnior

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de
Engenharia Ambiental da Escola Politécnica,
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro

Março de 2014

**ESTUDO LOCACIONAL DE ESTRUTURA DE AMPLIFICAÇÃO
DE ONDAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ASSOCIADO À ES-
TRUTURA DE DISSIPACÃO PARA ESPORTE, LAZER E PROTE-
ÇÃO COSTEIRA, NO LITORAL DE IPARANA, CE**

Paulo Tadeu de Oliveira Júnior

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinada por:

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph.D

Prof. Gilberto Olympio Mota Fialho, D.Sc

Prof. Afonso Augusto Magalhães de Araujo, D.Sc

RIO DE JANEIRO – BRASIL

MARÇO DE 2014

Oliveira Júnior, Paulo Tadeu de

Estudo Locacional de Estrutura de Amplificação de Ondas para Geração de Energia associado à Estrutura de Dissipação para Esporte, Lazer e Proteção Costeira, no Litoral de Iparana, CE./Paulo Tadeu de Oliveira Júnior – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2014

xviii, 101 p.:il.; 29,7 cm

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Projeto de Graduação – UFRJ / POLI / Curso de Engenharia Ambiental, 2014

Referências Bibliográficas: p.88-89

1.Sesc Iparana; 2. Modelagem Computacional; 3.Aproveitamento Energético; 4.Obra Costeira; 5.Proteção Costeira 6.Ampliação e Dissipação de Energia de Onda; 7.Balneabilidade; 8.Surfabilidade; 9.Modelo de Propagação de Ondas; I. Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III. Estudo Locacional de Estrutura de Amplificação de Ondas para Geração de Energia associado à Estrutura de Dissipação para Esporte, Lazer e Proteção Costeira, no Litoral de Iparana, CE

“... e aquilo que se revelará aos povos surpreenderá a todos, não por ser exótico, mas pelo fato de poder ter sempre estado oculto, quando terá sido o óbvio.”

(Caetano Veloso)

Dedico este trabalho à minha família, que foi fundamental, não só no período da faculdade, mas também em todas as etapas da minha vida, sempre me ajudando e me apoiando em todos os momentos que mais precisei.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Paulo Tadeu de Oliveira e Maria Luiza Rohrer por todo apoio dado ao longo desses 23 anos, que com todas as reclamações e puxões de orelha, me fizeram ser essa pessoa que me tornei. Obrigado pai, por toda ajuda e todo exemplo dado ao longo da minha vida. Obrigado mãe por ter sido minha guia e minha rainha em todo esse meu percurso. Agradeço ainda ao meu irmão João Alexandre de Oliveira por ter sido o melhor irmão que a vida poderia ter colocado ao meu lado. Por ser quem são, deixo o meu MUITO OBRIGADO. Sem vocês eu não seria nada.

Sou imensamente agradecido, também, aos meus primos e primas, tios e tias, avôs e avós que foram peças únicas e indispensáveis para a minha educação e formação.

Como educadores e exemplos, é impossível esquecer todos os meus amigos, que ao longo da minha vida inteira foram muitas vezes o meu suporte para e a minha motivação para seguir em frente.

Sou infinitamente agradecido à galera do Colégio, irmãos que a vida me deu, que me ajudam e me dão força para continuar buscando meus sonhos. Que a nossa amizade seja para sempre. Obrigado por tudo, Betinho, Bernardo, Maurício, Paulo Victor, Romano, Pedro Henrique, Pedro Augusto, Pepa, Rafael Magliano, Rafael Negri, Rodrigo Negri, Raiam. Agradeço também ao Diego, amigo que a vida colocou no meu caminho.

Inesquecível é também a minha galera, a “galera maneira”, que ao longo desses 6 anos de faculdade, foram amigos, irmãos, pais, primos, tios e tias, e dessa forma se tornaram pessoas especiais e insubstituíveis na minha vida. Obrigado Bia, Ágatha, Luíza, Nina, Bel, Isa, Camila, Mini, Nanda, Hélinah, Fernanda “Petrópolis”, Friburgo, Juan, Kellah Kéh, Rodrigo Peixoto, Rodrigo Amado e Diego. Ainda no âmbito acadêmico, agradeço a todos os profissionais do DRHIMA, que auxiliaram de forma fundamental os alunos nessa jornada.

Sou imensamente agradecido à “galera da costeira”, que, ao longo da parte mais profissional da minha graduação, foram muito mais que colegas de trabalho, viraram amigos da vida. Obrigado Isa, Andreia, Monica, Tathi, Jeane, Ludmila, Clara, Loani, Rodrigo Peixoto, Rodrigo Amado, Daniel, Mario, Anton, Eduardo e Taoan. Sou agrade-

cido também à nossa queridíssima Marise, que, muitas vezes como uma mãe, sempre ajudou muito os alunos.

Agradeço ao meu orientador e guru Paulo Cesar Colonna Rosman, pela grande ajuda ao longo desses anos, tanto na função de professor, como na de orientador acadêmico, sendo responsável pelo meu grande interesse nessa área de Engenharia Costeira.

Não posso esquecer verdadeiros amigos que eu fiz ao longo do meu período de intercâmbio, que apesar da sua curta duração foi, com toda a certeza, o período que mais me fez crescer como ser humano. Muito obrigado por tudo, Lívia, Pedro, Bianca, Tiago, Haline, Romeu, Mateus, Lucas, Evandro, Pheto, Kalil, Leonardo Carmona, Leonardo Lopes, Rodolfo, Ana, Anaíza, Maíla, Laura, Halil Yurttutar, Goran, Carlos, Maximilien, Jonas e Carolin.

Sou agradecido a todos os meus amigos da dança por terem me proporcionado felicidade nas horas que as coisas pareciam estar terríveis. Muito obrigado Pedro Rey, Daniel, Irving e Família Ramalho.

Agradeço também ao meu “Sensei” Edgar Freitas Júnior que atuou de forma única na minha educação e trouxe o judô para a minha vida, sendo um segundo pai ao longo de toda minha vida.

Obrigado ainda a todas as outras pessoas que fizeram parte da minha vida e que por falta de memória não estão presentes nessa lista, mas que nem por isso são menos importantes.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Estudo Locacional de Estrutura de Amplificação de Ondas para Geração de Energia associado à Estrutura de Dissipação para Esporte, Lazer e Proteção Costeira, no Litoral de Iparana, CE

Paulo Tadeu de Oliveira Júnior

Março/2014

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Curso: Engenharia Ambiental

A Colônia Ecológica do Sesc Iparana está localizada na praia de Iparana, pouco mais de 15 quilômetros do centro de Fortaleza, sendo assim um importante centro de lazer da região, bem como um cano de escape para movimentada e cosmopolita capital cearense. O empreendimento é foco deste trabalho, uma vez que sofre com problemas de encurtamento de sua faixa de praia causado pela subida do nível do mar. Este problema é consequência de intervenções feitas a sudeste desta região, as quais já foram temas de diversas publicações de engenharia costeira e portuária e serão melhor contextualizadas no primeiro capítulo deste trabalho.

O presente trabalho propõe uma solução para o problema de deriva litorânea na região do Sesc, bem como uma fonte de lucro, uma vez que os objetivos do projeto proposto são, o aproveitamento energético da energia contida nas ondas e criação de uma zona de balneabilidade e surfabilidade, aspectos os quais podem ser utilizados para a geração de riqueza.

Para isso, foram simulados 8 diferentes períodos de ondas para 6 diferentes direções. O processamento e modelagem dos dados foi feito usando o Modelo de Propagação de Ondas contido no SisBaHiA®.

O dimensionamento das Estruturas de Ampliação e Dissipação baseou-se em estudos anteriores, realizados por Aguiar (2012), onde as dimensões do conjunto de arrecifes artificiais foram variadas de modo que a configuração ideal fosse alcançada.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que atenderam às expectativas, porém algumas recomendações foram feitas de modo que o projeto possa ser mais bem detalhado. Foi visto que uma área com cerca de cem metros de extensão foi amortecida, propiciando assim uma zona de balneabilidade. Além disso, constatou-se que o ângulo de quebra e o modo de arrebentação possibilitam a prática de surfe em diferentes níveis de dificuldade, aspectos os quais eram objetivos primários do presente estudo.

Palavras-chave: Sesc Iparana, Modelagem Computacional, Modelo de Propagação de Ondas, Aproveitamento Energético; Obra Costeira, Proteção Costeira, Balneabilidade, Surfabilidade, Ampliação e Dissipação de Energia de Onda.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Locational Study of a Wave Amplification Structure for Energy Generation associated with a Dissipation Structure for Sports, Leisure Activities and Coastal Protection at Iparana's Seashore.

Paulo Tadeu de Oliveira Júnior

Março/2014

Advisor: Paulo Cesar Colonna Rosman

Course: Environmental Engineering

The “Sesc Iparana” Ecological Colony is located near the Iparana beach, 15 kilometers far from Fortaleza downtown, this way, it is not only an important amusement center in the surroundings, but also a way out from the tumultuous and crowded capital.

This enterprise is the center of attention of this thesis, once it suffers with matters related to the shortening of its beach belt. This problem is consequence or interventions made at the southeast part of this region, which were already theme of uncountable publications linked to the Coastal and Port Engineering and are going to be better detailed in the first chapter of this paper.

On this way, the current paper proposes, not only a solution for this coastal drift at the Sesc Iparana's proximity, but also a profit source, once this project aims, not only to harness the wave energy, but also to create a balneability and surfability zone, which could be used to profit.

In order to accomplish the objectives, 8 different wave periods and 3 different azimuths were simulated. For the data processing and modelling, the Wave Propagation Model from SisBaHiA® was used.

For the Structures dimensioning part, a previous study, in which the sizes were varied in a way that the best configuration was met, was taken into consideration. The obtained results were good, once they met the expectations. Nevertheless, some recommendations were given in order to provide information on how this project could be better detailed.

It was noticed that an area with nearly 100 meters of extension was damped, probing, in this way, in a balneability zone. Moreover, one could note, that the wave breaking angle and the surf mode provided perfect conditions for the practice of surf in many different levels of difficulty, aspects which were main tasks of the current study.

Keywords: Sesc Iparana, Computational Modelling, Wave Propagation Model, Energetic Use, Coastal Work, Coastal Protection, Balneability, Surfability, Amplification and Dissipation of Wave Energy.

Sumário

1. Introdução.....	1
1.1 Apresentação do Problema	1
1.2 Aplicabilidade dos Esporões.....	5
1.3 Consequências “indiretas”	6
1.4 Solução do Problema.....	9
2. Objetivo	10
2.1 Vantagens Agregadas	10
2.1.1 Vantagem Ambiental.....	11
2.1.2 Vantagem Econômica	12
3. Lentes Multifocais.....	13
3.1 Estruturas de Amplificação.....	13
3.2 Estruturas de Dissipação.....	14
3.3 Projeto “Macaé”	15
3.3.1 Desenvolvimento de Estruturas Marinhas de Amplificação de Ondas para Geração de Energia Elétrica	16
3.3.2 Desenvolvimento de Estruturas Marinhas de Dissipação de Ondas para Geração de Energia Elétrica	17
4. Determinação do Sítio para o Assentamento do Conjunto de Estruturas	18
4.1 Modelagem Computacional.....	18
4.2 Modelo de Ondas	21
4.3 Região Modelada	22
4.4 Dados Considerados nas Simulações	22
4.4.1 Batimetria.....	23
4.4.2 Dados de Maré	25
4.4.3 Dados de Onda	25
4.5 Cenário de Ondas Modeladas	30

4.6	Grades de Propagação de Onda	32
4.6.1	GPO para Ondas do Quadrante Norte	33
4.6.2	GPO para Ondas do Quadrante Nordeste	34
4.6.3	GPO para Ondas do Quadrante Leste.....	35
4.7	Resultado do Modelo de Propagação de Ondas.....	36
4.7.1	Fatores de Amplificação para Ondas vindas do Quadrante Norte	37
4.7.2	Fatores de Amplificação para Ondas vindas do Quadrante Nordeste	40
4.7.3	Fatores de Amplificação para Ondas vindas do Quadrante Leste.....	41
4.8	Análise dos Resultados do Modelo de Propagação de Ondas	44
4.9	Conclusão	49
5.	Metodologia para a concepção da estrutura de Amplificação de Ondas.....	51
5.1	Concepção da Estrutura de Amplificação de Energia	52
5.2	Metodologia para Modelagem Computacional da Região com a Estrutura Assentada.....	53
5.3	Grades de Propagação de Ondas para o quadrante Norte.....	55
5.4	Resultados da Propagação de Ondas com a instalação da Estrutura de Amplificação.....	56
5.4.1	Resultados das ondas com azimute 0° sobre as lentes do Centro e Oeste	56
5.4.2	Resultados das ondas com azimute 10° sobre as lentes do Centro e Oeste ...	59
5.4.3	Resultados das ondas com azimute 350° sobre as lentes do Centro e Oeste .	63
5.5	Análise dos Resultados das Simulações para Concepção da Estrutura de Amplificação.....	66
5.6	Conclusão	67
6.	Metodologia para a concepção da estrutura de Dissipação de Energia	69
6.1	Concepção da Estrutura	69
6.2	Resultados do Modelo de Propagação de Ondas para o caso da presença do conjunto de lentes para a Onda de Projeto	73
6.3	Análise dos Resultados.....	75

6.3.1 Parâmetros de Proteção Costeira e Balneabilidade	75
6.3.2 Parâmetros de Surfabilidade	77
6.4 Sugestão de Projeto	81
6.4.1 Resultado do Modelo de Propagação de Ondas para 2 estruturas adjacentes à original.....	81
6.5 Conclusão	83
7. Conclusões e Recomendações	85
8. Bibliografia.....	88
9. Anexo A – Mapas de distribuição dos Fatores de Amplificação e Direção de Propagação de Ondas	90
10. Anexo B – Resultados do Modelo de Propagação de Ondas para ondas com azimutes 10°, 0° e 350° com período de 7 segundos	100

Índice de Figuras

<i>Figura 1 Reprodução do mais antigo documento cartográfico existente sobre o porto de Fortaleza, CE. (Valentini, 1994)</i>	2
<i>Figura 2 Imagem do Google Earth® que mostra, em amarelo, o engordamento da faixa de praia provocado pela construção do espigão em questão.</i>	4
<i>Figura 3 Imagem do Google Earth®, a qual mostra que o Sesc Iparana está localizado a aproximadamente a 20 km da costa leste.</i>	5
<i>Figura 4 Imagem do Google Earth® que exemplifica a poluição visual causada por campo de esporões situado em Espinho – Maceda.</i>	6
<i>Figura 5 Imagem do Google Earth®, onde é possível observar o intenso processo de Favelização nas proximidades do Cais do Porto.</i>	7
<i>Figura 6 Imagem do Google Earth® tirada em 27/07/2004, na qual é possível visualizar parte da vegetação que cobria a costa da região.</i>	8
<i>Figura 7 Imagem do Google Earth® tirada em 11/09/2013, na qual é possível visualizar a subida do Nível do Mar.</i>	8
<i>Figura 8 Imagem do Google Earth® onde é possível localizar a barreira artificial construída na fronteira do Sesc com o mar.</i>	9
<i>Figura 9 Exemplo da distorção da frente de onda causada pela focalização da mesma na presença da lente de amplificação.</i>	14
<i>Figura 10 Distorção da linha de arrebentação ao passar pelo arrecife artificial.</i>	15
<i>Figura 11 Fluxograma representativo das etapas que devem ser seguidas por um Modelador em um processo de Modelagem.</i>	20
<i>Figura 12 Imagem do Google Earth® que ilustra a região que foi digitalizada e modelada.</i>	22
<i>Figura 13 Carta Náutica de número 710 (Proximidades do Terminal do Pecém e do Porto de Mucuripe) utilizada para a criação da grade de Batimetria do Modelo de Propagação de Ondas.</i>	23
<i>Figura 14 Carta Náutica de número 50 (Do Rio Parnaíba ao Recife) utilizada para a criação da grade de Batimetria do Modelo de Propagação de Ondas.</i>	24
<i>Figura 15 Mapa Batimétrico da região estudada.</i>	25
<i>Figura 16 Ponto de medição de dados para alimentação do modelo WaveWatchIII®.</i>	26
<i>Figura 17 Imagem da Interface do Site do Global Wave Statistics</i>	27
<i>Figura 18 Ilustração que representa a Faixa de Ocorrência das Alturas Significativas.</i>	29
<i>Figura 19 Ilustração que representa a Faixa de Ocorrência dos Períodos Significativos.</i>	30
<i>Figura 20 Imagem do Google Earth® que mostra a gama de ângulos utilizados para a modelagem.</i>	31
<i>Figura 21 Mapa batimétrico com a representação da Grade de Propagação de Ondas para o Quadrante Norte.</i>	34
<i>Figura 22 Mapa batimétrico com a representação da Grade de Propagação de Ondas para o Quadrante Nordeste.</i>	35

<i>Figura 23 Mapa batimétrico com a representação da Grade de Propagação de Ondas para o Quadrante Leste.</i>	36
<i>Figura 24 Carta Náutica com as duas possíveis áreas consideradas para o assentamento da lente de amplificação de onda.</i>	37
<i>Figura 25 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 22,5º e período 6 segundos.</i>	38
<i>Figura 26 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 0º e período 6 segundos.</i>	38
<i>Figura 27 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 0º e período 7 segundos.</i>	39
<i>Figura 28 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 0º e período 9 segundos.</i>	39
<i>Figura 29 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 0º e período 12 segundos.</i>	40
<i>Figura 30 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 45º e período 7 segundos.</i>	40
<i>Figura 31 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 45º e período 8 segundos.</i>	41
<i>Figura 32 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 45º e período 13 segundos.</i>	41
<i>Figura 33 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 67,5º e período 11 segundos.</i>	42
<i>Figura 34 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 67,5º e período 12 segundos.</i>	42
<i>Figura 35 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 67,5º e período 13 segundos.</i>	43
<i>Figura 36 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 90º e período 6 segundos.</i>	43
<i>Figura 37 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 90º e período 11 segundos.</i>	44
<i>Figura 38 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 90º e período 13 segundos.</i>	44
<i>Figura 39 Pontos de maior concentração de energia na linha de costa para os quatro períodos simulados para cada direção 0º ENE (verde), 45º E (roxo), 67,5º (laranja), e 90º (cinza), 337,5º (preto).</i>	48
<i>Figura 40 Carta Náutica com representação dos pontos de maior energia das ondas mais relevantes, bem como a posição das duas áreas estudadas.</i>	49
<i>Figura 41 Vista superior e cortes transversais da lente de amplificação de energia.</i>	53

<i>Figura 42 Representação da nova área estudada (em verde) para o assentamento da estrutura de amplificação de energia.</i>	54
<i>Figura 43 Mapa batimétrico com a representação das GPOs externa e interna acopladas.</i>	56
<i>Figura 44 Mapa de Fator de Amplificação para a onda de azimute 0º (N) e período 6s nas Grades de Propagação de Ondas acopladas de Norte.</i>	57
<i>Figura 45 Fator de amplificação da onda com azimute 0º e período 6 segundos para a lente de amplificação central.</i>	57
<i>Figura 46 Fator de amplificação da onda com azimute 0º e período 6 segundos para lente de amplificação oeste.</i>	58
<i>Figura 47 Fator de amplificação da onda com azimute 0º e período 7 segundos para lente de amplificação oeste.</i>	58
<i>Figura 48 Fator de amplificação da onda com azimute 0º e período 7 segundos para lente de amplificação central.</i>	59
<i>Figura 49 Mapa de Fator de Amplificação para a onda de azimute 10º (N) e período 6 segundos nas Grades de Propagação de Ondas acopladas de Norte.</i>	60
<i>Figura 50 Fator de amplificação da onda com azimute 10º e período 6 segundos para lente de amplificação central.</i>	61
<i>Figura 51 Fator de amplificação da onda com azimute 10º e período 6 segundos para lente de amplificação oeste.</i>	61
<i>Figura 52 Fator de amplificação da onda com azimute 10º e período 7 segundos para lente de amplificação central.</i>	62
<i>Figura 53 Fator de amplificação da onda com azimute 10º e período 7 segundos para lente de amplificação oeste.</i>	62
<i>Figura 54 Mapa de fator de amplificação para a onda de azimute 350º (N) e período 6 segundos nas Grades de Propagação de Ondas acopladas de Norte.</i>	63
<i>Figura 55 Fator de amplificação da onda com azimute 350º e período 6 segundos para lente de amplificação central.</i>	64
<i>Figura 56 Fator de amplificação da onda com azimute 350º e período 6 segundos para lente de amplificação oeste.</i>	64
<i>Figura 57 Fator de amplificação da onda com azimute 350º e período 7 segundos para lente de amplificação central.</i>	65
<i>Figura 58 Fator de amplificação da onda com azimute 350º e período 7 segundos para lente de amplificação oeste.</i>	65
<i>Figura 59 Vista Superior e corte transversal da lente de dissipação de ondas.</i>	70
<i>Figura 60 Imagem do Google Earth representando a distância da lente de dissipação de ondas da costa.</i>	71
<i>Figura 61 Representação da linha de arrebenção sem a presença da estrutura de dissipação de energia.</i>	72

<i>Figura 62 Representação da linha de arrebentação (linha preta), tanto na costa, como no platô da estrutura de dissipação de energia.</i>	73
<i>Figura 63 Mapa de distribuição de fatores de amplificação da onda com período de 6 segundos e azimute 0º.</i>	73
<i>Figura 64 Mapa de distribuição de fatores de amplificação da onda com período de 6 segundos e azimute 10º.</i>	74
<i>Figura 65 Mapa de distribuição de fatores de amplificação da onda com período de 6 segundos e azimute 350º.</i>	74
<i>Figura 66 Perfil de fatores de amplificação de altura de onda ortogonal à linha de costa.</i>	76
<i>Figura 67 Traçado da seção utilizada para elaboração do perfil de fatores de amplificação de altura de ondas.</i>	76
<i>Figura 68 Representação do ângulo de quebra. (Aguiar, MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS PARA PROJETO DE ESTRUTURA MARINHA DE DISSIPACÃO DE ONDAS, 2012).</i>	78
<i>Figura 69 Gráfico da variação do ângulo de quebra ao longo da raia de surfe esquerda. (Aguiar, MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS PARA PROJETO DE ESTRUTURA MARINHA DE DISSIPACÃO DE ONDAS, 2012).</i>	80
<i>Figura 70 Localização dos novos conjuntos de lentes sugeridos.</i>	82
<i>Figura 71 Mapa de distribuição de Fatores de Amplificação para uma onda com azimute 0º e período 6 segundos.</i>	83

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 Tabela produzida a partir dos dados fornecidos pelo Modelo de Ondas Wave WatchIII® (NOAA).</i>	26
<i>Tabela 2 Tabela de Dispersão retirada do site do Global Wave Statistics.</i>	28
<i>Tabela 3 Probabilidades Acumuladas de direção de ondas e ventos.</i>	28
<i>Tabela 4 Principais Características das Ondas Simuladas.</i>	31
<i>Tabela 5 Períodos simulados e seus respectivos comprimentos de onda em águas rasas e profundas.</i>	32
<i>Tabela 6 Tabela com os parâmetros determinantes para a configuração da GPO para o Quadrante Norte.</i>	33
<i>Tabela 7 Tabela com os parâmetros determinantes para a configuração da GPO para o Quadrante Nordeste.</i>	34
<i>Tabela 8 Tabela com os parâmetros determinantes para a configuração da GPO para o Quadrante Leste.</i>	36
<i>Tabela 9 Tabela contendo os principais azimutes e períodos considerados com seus respectivos Fatores de Amplificação para cada área, além do Fator de Amplificação Médio para cada um dos três quadrantes em questão.</i>	46
<i>Tabela 10 Tabela contendo as alturas significativas e percentuais de ocorrência das ondas de norte em águas rasas.</i>	46
<i>Tabela 11 Tabela contendo as alturas significativas e percentuais de ocorrência das ondas de nordeste em águas rasas.</i>	47
<i>Tabela 12 Tabela contendo as alturas significativas e percentuais de ocorrência das ondas de leste em águas rasas.</i>	47
<i>Tabela 13 Tabela com a frequência de ocorrência de ondas vindouras dos principais quadrantes em questão.</i>	50
<i>Tabela 14 Tabela com os parâmetros da Onda Paramétrica.</i>	52
<i>Tabela 15 Tabela com os parâmetros determinante das Grades de Propagação de Ondas (íntera e externa).</i>	55
<i>Tabela 16 Fatores de Amplificação de Onda com a presença da estrutura.</i>	66
<i>Tabela 17 Fatores de Amplificação de Onda sem a presença da estrutura.</i>	66
<i>Tabela 18 Variação Porcentual dos Fatores de Amplificação Médio para as duas áreas.</i>	66
<i>Tabela 19 Tabela com as características dimensionais para a concepção do arrecife de dissipação de energia.</i>	70
<i>Tabela 20 Classificação do nível de habilidade do surfista em função do mínimo ângulo de quebra; (a partir de HUTT et al., 2001).</i>	79
<i>Tabela 21 Classificação do modo de arrebatamento em função do Número de Iribarren, segundo BATJES (1974). Denominação entre parênteses é aquela praticada pelos surfistas.</i>	81

1. Introdução

A Colônia Ecológica do Sesc Iparana está localizada na praia de Iparana, pouco mais de 15 quilômetros do centro de Fortaleza, sendo assim um importante centro de lazer da região. Esta unidade do Sesc é chamada de Colônia Ecológica, uma vez que funciona como um refúgio ecológico da conturbada e agitada vida da capital cearense, pois permite contato direto com a fauna e flora característica.

1.1 Apresentação do Problema

Fortaleza sempre representou uma cidade altamente turística, sendo anualmente destino de milhares de viajantes em busca de sol e praias paradisíacas. Portanto, o turismo é um importante ator no orçamento anual daquela região.

Por sua localização privilegiada, Fortaleza sempre foi alvo de muitos estudos. Sua posição de destaque se deu principalmente por estar muito bem situada em relação a portos internacionais, principalmente, a portos europeus. O litoral de Fortaleza vem sendo alvo de obras de engenharia costeira e portuária há mais de 200 anos. A primeira intervenção data de 1807, com a construção do porto da antiga Vila de Fortaleza, que funcionava como um ancoradouro na, então, “Prainha” (atual Praia Formosa), permitindo somente a atracação de embarcações com um calado adequado para profundidades de aproximadamente 3 metros. O desenho, contido na Figura 1, foi feito por Antônio José da Silva Paulet em 1818 e mostra a localização da obra em questão. Este documento é a mais antiga reprodução cartográfica da área portuária de Fortaleza.

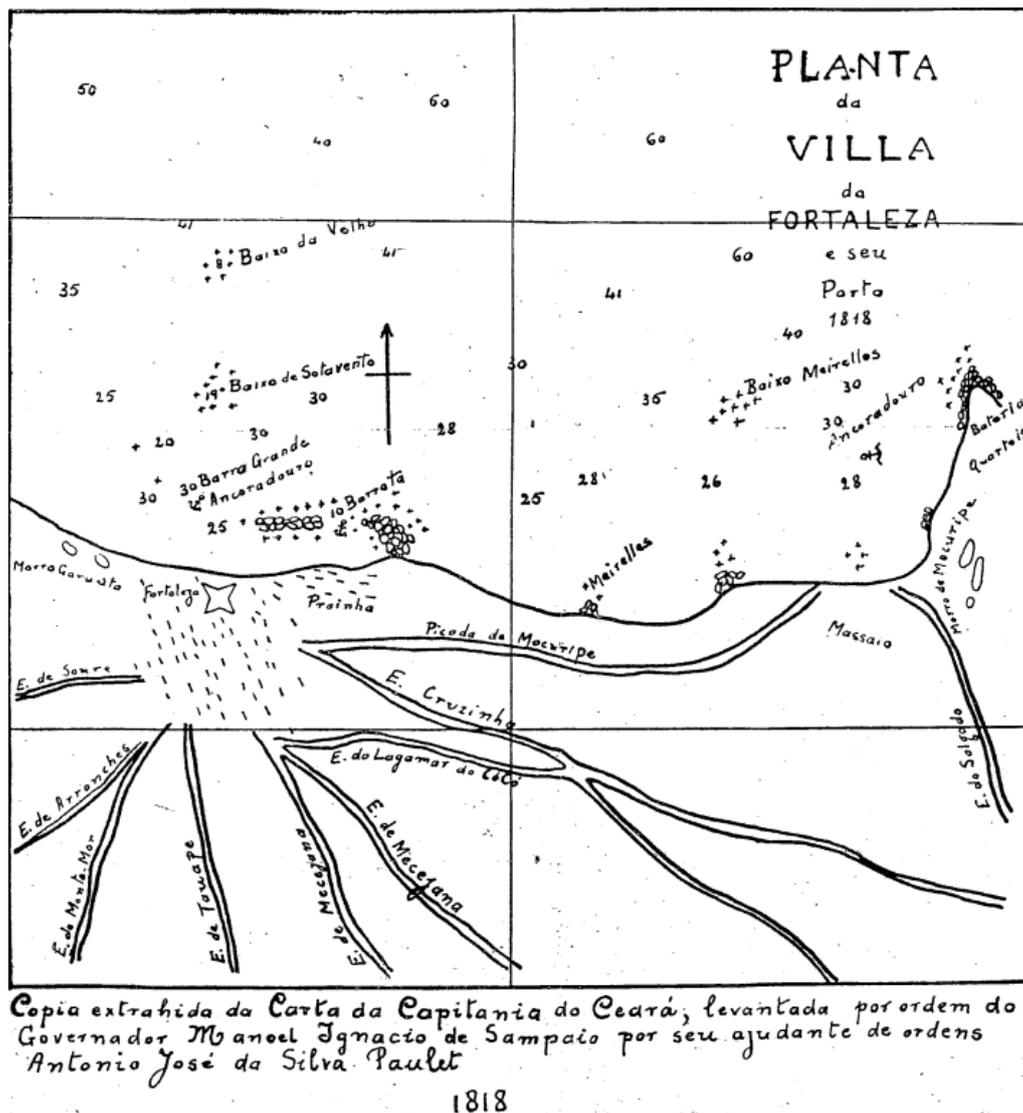


Figura 1 Reprodução do mais antigo documento cartográfico existente sobre o porto de Fortaleza, CE. (Valentini, 1994)

Com o progressivo desenvolvimento da capital cearense, sucessivos estudos e projetos surgiram de modo a encontrar a melhor região para construção de um porto maior e mais adequado à importância da cidade no âmbito nacional e internacional, até que na década de 30, foi proposta a transferência do então Porto de Fortaleza para a ponta de Mucuripe. Finalmente, no ano de 1939, deram-se início às obras do atual complexo do Porto de Mucuripe, que dista aproximadamente 6 km da antiga região portuária.

Mucuripe foi escolhida, uma vez que, como já dito, possui uma geografia interessante aos olhos dos engenheiros da época, já que o pontão facilitaria a construção das

obras do empreendimento. O molhe projetado na ocasião tinha a finalidade de embarrear o transporte de sedimentos na direção Leste-Oeste provocado pelas correntes geradas a partir de ondas junto à costa. O barramento desses sedimentos, porém, não significa uma mudança na capacidade de transporte, uma vez que o regime de ondas não se alterou. O impacto direto causado por este fato foi a erosão em pontos mais a noroeste da zona portuária. Outro problema encontrado foi o assoreamento do interior do recinto portuário, uma vez que as ondas difratadas transportam não só sedimentos, como também retêm aqueles já presentes na região.

A fim de sanar estes problemas, uma série de estudos foi conduzida em cooperação com a França. A solução encontrada foi o prolongamento do molhe existente na ponta de Mucuripe e a construção de um espigão na praia do Futuro. Este conjunto de obras pretendia uma melhor funcionalidade do porto em questão, bem como a diminuição da erosão de pontos a oeste da zona portuária.

A construção desse espigão, ou esporão, provocou o barramento de sedimentos a barlar da estrutura, como era esperado, porém a ausência de um projeto de transpasse de material para regiões a sotamar do porto, fez com que imensas áreas a noroeste fossem erodidas. Medidas semelhantes foram tomadas nessas áreas, de modo que o problema foi sendo empurrado para localidades a oeste de Mucuripe. Após a construção desse espigão, outros 11 espigões foram, em pouco tempo, projetados de modo a remediar o problema de deriva litorânea.

A erosão da costa a noroeste do porto já se estende por cerca de 30 km, com um recuo da linha costeira, em alguns pontos, de até 400 m. Aproximadamente 6 milhões de m² foram erodidos nos últimos 45 anos.

Ao construir estruturas acumuladoras de sedimentos, barra-se o material a barlar, provocando o assoreamento daquela região, porém o regime de ondas e a capacidade de transporte litorâneo não se alteram. Desta forma, a falta de material para ser carregado impede que pontos a sotamar sejam alimentados, o que acarreta em processos erosivos.

Como mostrado na Figura 2, pode-se observar um alargamento (em amarelo) de aproximadamente 530 metros de faixa de praia pertencente à Praia do Futuro, em relação à linha de costa original, que está representada em vermelho.



Figura 2 Imagem do Google Earth © que mostra, em amarelo, o engordamento da faixa de praia provocado pela construção do espigão em questão.

A solução de engenharia encontrada para resolver esse problema foi a construção de, no total, 19 esporões ao longo do litoral da capital cearense até a região aonde o Sesc se encontra. Estas estruturas podem ser vistas na Figura 3.

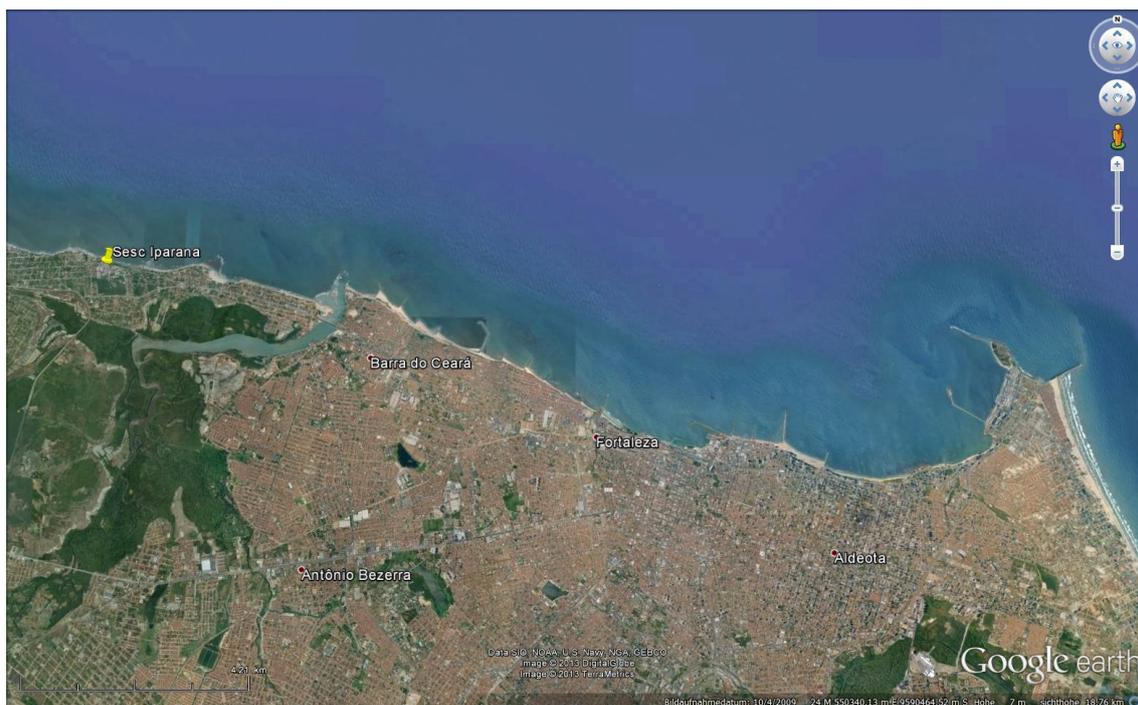


Figura 3 Imagem do Google Earth®, a qual mostra que o Sesc Iparana está localizado a aproximadamente a 20 km da costa leste.

1.2 Aplicabilidade dos Esporões

Esporões são estruturas rígidas dispostas transversalmente à linha de costa, sendo normalmente utilizadas para a proteção costeira. Sua principal função é a de provocar a retenção de sedimentos a barlamar da estrutura.

Essas construções podem ser em forma de T ou L, às vezes em Z e onduladas. Podem ser também, emersas, submersas, permeáveis ou impermeáveis, permitindo, ou não, o transpasse de sedimentos ao longo do seu corpo.

É comum que estas estruturas sejam construídas em grupos, uma vez que a retenção de sedimento a barlamar provoca um déficit sedimentológico à sotamar, o que gera a necessidade de posteriores ações de caráter remediativo, na maioria dos casos isso significa a construção de outros esporões. A presença deste campo de esporões é uma das formações mais vulgarizadas quando se trata de proteção costeira, uma vez que, com o barramento da deriva litorânea, há o acúmulo sedimentológico à barlamar. Essa disposição em série confere, também, um efeito estético não muito desejado, sendo assim, uma poluição visual. Devido esses inúmeros efeitos negativos, tem-se preferido o

uso do modelo de realimentação, que é um processo onde, após uma alimentação artificial de sedimentos, é notada uma retenção natural de outras partículas.



Figura 4 Imagem do Google Earth® que exemplifica a poluição visual causada por campo de esporões situado em Espinho – Maceda.

1.3 Consequências “indiretas”

Esse alargamento da faixa de praia representou, não só uma maior zona de lazer para os banhistas, mas também um novo pedaço de terra passível de ser habitado. Ao longo de aproximadamente 60 anos, uma ocupação desordenada aconteceu naquela nova faixa de terra, acarretando em uma favelização da área que antigamente era ocupada por famílias pertencentes à classe de alto padrão aquisitivo.



Figura 5 Imagem do Google Earth®, onde é possível observar o intenso processo de Favelização nas proximidades do Cais do Porto.

O Sesc Iparana localiza-se a pouco mais de 15 quilômetros do centro de Fortaleza, em um local que foi diretamente afetado pelas obras de engenharia construídas nas partes mais a sudeste do litoral cearense.

O barramento do transporte de sedimentos fez com que a areia, que seria transportada para as outras regiões, fosse retida, provocando assim, o afloramento de rochas na região costeira a frente do complexo do Sesc de Iparana. As Figuras 6 e 7 mostram a evolução desse processo, destacando, na primeira, uma situação de baixamar e na segunda uma de preamar. Em ambas é possível verificar a existência de pequenas rochas (arenitos) que afloraram devido à inexistência de sedimentos para a formação de uma faixa de praia.



Figura 6 Imagem do Google Earth® tirada em 27/ 07/2004, na qual é possível visualizar parte da vegetação que cobria a costa da região.

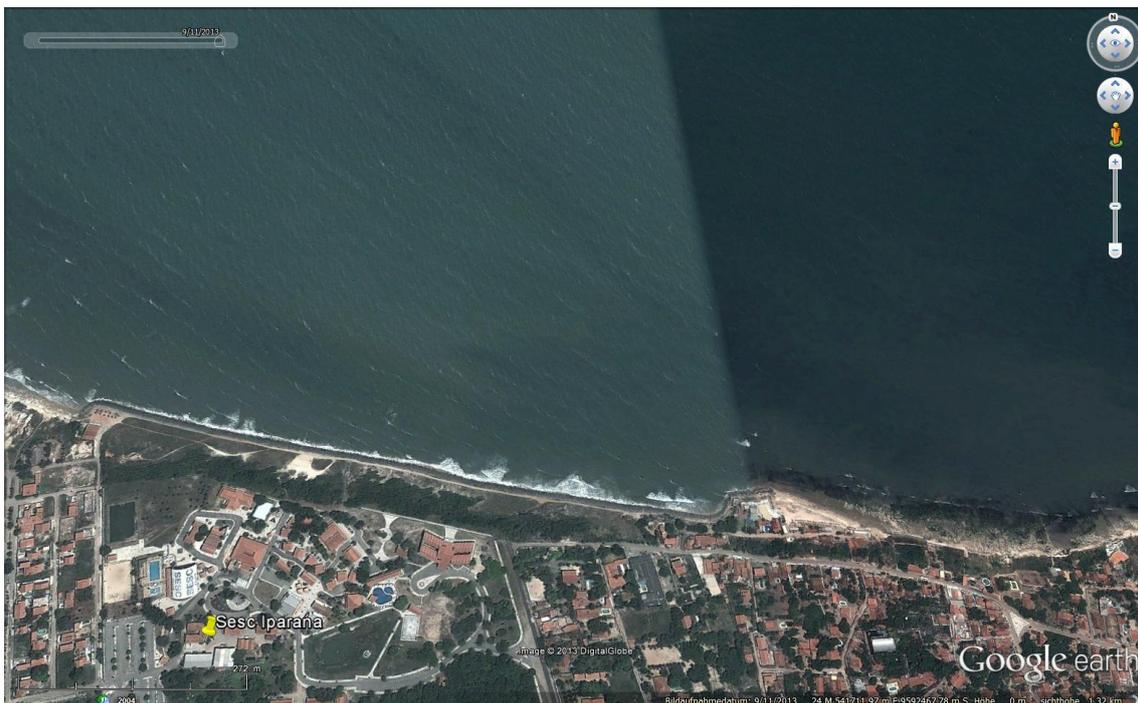


Figura 7 Imagem do Google Earth® tirada em 11/09/2013, na qual é possível visualizar a subida do Nível do Mar.

1.4 Solução do Problema

Na década de 1990, a Coppetec, contratada pelo Sesc, projetou uma estrutura protetora na interface do empreendimento com o oceano, uma vez que devido às ações do mar, o logradouro corria perigo de ser afetado pelas ondas violentas que ameaçavam a localidade. Essa obra consistiu na construção de um muro de pedra, de aproximadamente 1 quilômetro, na zona fronteira com o oceano, como pode ser observado na Figura 8.

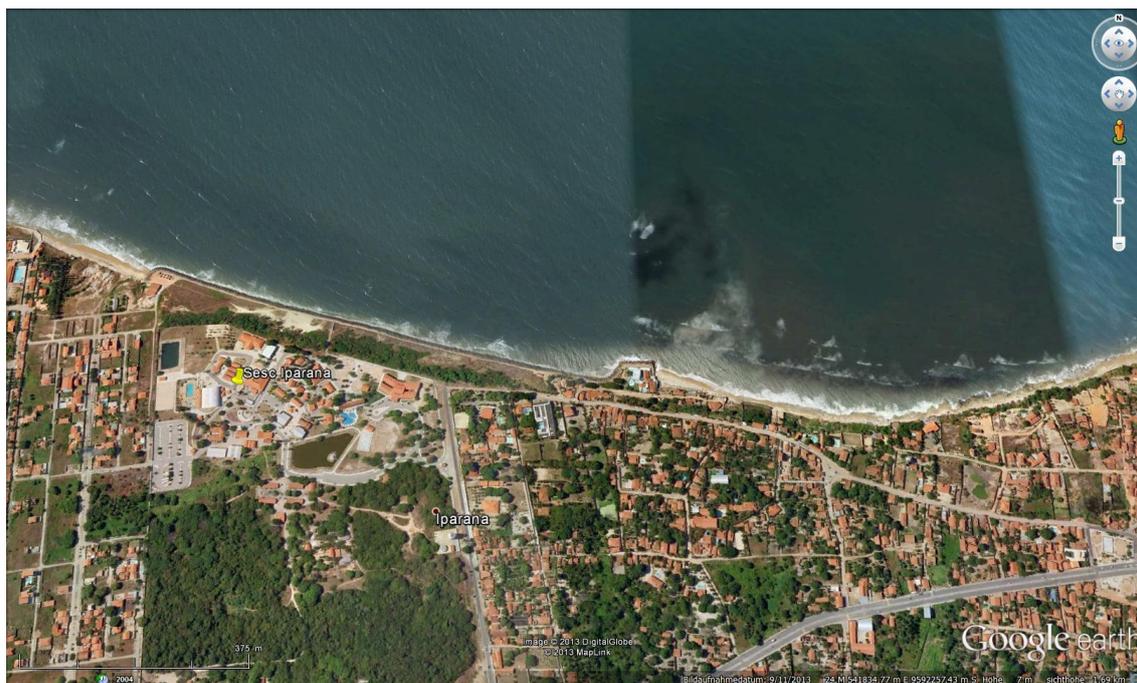


Figura 8 Imagem do Google Earth® onde é possível localizar a barreira artificial construída na fronteira do Sesc com o mar.

Esta medida preventiva assegura até os dias atuais as instalações do Sesc contra os possíveis danos causados pelo ataque das ondas. É importante destacar que essa medida de caráter emergencial surgiu como uma solução, uma vez que com o desaparecimento da zona de proteção natural, a praia, algo teria que ser feito para abrigar o local. Outro objetivo deste projeto foi a proteção do último pé de duna na área da propriedade.

Para o futuro pode-se, certamente, contar com um maior ataque das ondas nessa estrutura, uma vez que a tendência é uma progressiva erosão do fundo, o que afeta diretamente a hidrodinâmica do local. Como consequência, é esperado que ao longo dos anos uma série de intervenções de caráter corretivo sejam tomadas, de modo a manter e preservar a estrutura lá existente.

2. Objetivo

O objetivo desse trabalho é propor uma solução para o problema do Sesc Iparana no que diz respeito à retenção de sedimentos e ao comprometimento da estrutura de proteção ali já presente, bem como apresentar uma oportunidade econômica, utilizando a energia contida nas ondas como matéria prima para o aproveitamento elétrico, através da conversão pela Unidade Geradora de Energia (neste trabalho chamada de UGE), a qual seria ligada ao Sesc Iparana.

Além desses aspectos, outros objetivos específicos desta proposta são: a criação de uma zona de balneabilidade, acarretada pela “produção” de uma zona de menor energia e a criação de uma pipeline ideal para a prática de surfe. Deste modo, o estudo locacional para duas lentes, uma de amplificação de energia e outra para dissipação da mesma, é de grande importância para o sistema marinho da região. Assim sendo, estudou-se o local ideal para o assentamento do conjunto de estruturas supracitadas, com as quais pode-se contar com uma zona de maior energia (entre as duas lentes) e uma zona amortecida, de baixa energia, a sotamar da estrutura de dissipação de energia.

Para que os objetivos deste trabalho pudessem ser alcançados, foi necessário o uso de modelagem computacional, de modo que fosse possível fazer um prognóstico da situação em questão. Neste âmbito, o uso do SisBaHiA[®] – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, foi de vital importância, uma vez que o Modelo de Propagação de Ondas, contido no programa, possibilitou todo estudo desenvolvido.

Desta forma, esse trabalho se propõe a conceber um projeto básico de engenharia, no qual uma lente de amplificação e outra de dissipação foram instaladas para que os objetivos primários pudessem ser atingidos.

2.1 Vantagens Agregadas

A concretização desse projeto seria vantajosa sob a ótica, não só ambiental, mas também econômica. Abaixo serão explicadas as principais vantagens que essa engenharia propiciaria à localidade.

2.1.1 Vantagem Ambiental

Arrecifes artificiais são empregados na melhoria das pescarias, na redução de conflitos por uso de áreas, na economia de tempo e combustível durante as atividades pesqueiras, para reduzir o esforço de pesca, facilitar a localização de cardumes, assegurar a acessibilidade e a segurança nos portos e aumentar a abundância de peixes nos locais onde são assentados a partir da atração de peixes e do aumento de produção de biomassa (Bohnsack, 1989; Bohnsack et al., 1997; Chou, 1997 *apud* Netto & Zalmon, 2011).

Ecologicamente, os recifes artificiais podem influenciar tanto no comportamento dos organismos, particularmente de espécies de peixes vágéis (que não são fixos em uma determinada localidade), atraídos para as estruturas ou ainda devido a algum aspecto do ciclo de vida da espécie, modificando uma variável ambiental que possa ser limitante para ela, como, por exemplo, a oferta de abrigo e/ou abundância de alimento.

O assentamento dessas estruturas tem sido utilizado para aumentar o sucesso das pescarias sobre as espécies que ficam agregadas nesses locais, além de propiciar uma base consolidada para o aumento da biomassa de plantas, invertebrados e peixes. O incremento da biomassa ocorre quando o ambiente artificial realmente imita a estrutura ecológica e a função do ambiente natural (Seaman, 1997 *apud* Santos & Passavante, 2007).

Outra metodologia que, atualmente, anda sendo alvo de grandes discussões é o uso de pneus inservíveis para criação de recifes artificiais. Por ser tratar de um resíduo presente em todas as sociedades modernas, os pneus acabam se tornando um problema quanto a sua destinação final. Desta forma o acoplamento desses rejeitos à estrutura marinha se torna muito interessante, não só do ponto de vista ambiental, mas também econômico.

Com a atração e produção de fauna característica, os pescadores da cidade de Iparana teriam enormes vantagens, como por exemplo: redução de gastos com combustível e maior facilidade na obtenção do seu pescado. Estes fatores acarretariam impactos altamente positivos naquela região, bem como: maior renda família para a família dos pescadores e embaratecimento do pescado.

Outro aspecto ambiental que seria imensamente favorecido é a deriva litorânea de sedimentos, que, ao contrário do que acontece com a construção de espigões, não

seria impedida, uma vez que não existiria nenhuma barreira no eixo longitudinal, somente uma espécie de “ilha” responsável pela diminuição da energia da onda, que neste sentido contribui para uma maior sedimentação de material.

2.1.2 Vantagem Econômica

Soma-se às vantagens ambientais supracitadas, consequências socioeconômicas de altíssima importância. Um estudo realizado por (Tanyeri-Abur et al., 1998 *apud* Santos & Passavante, 2007) para a comunidade costeira do Texas (EUA) concluiu que cada dólar gasto por um mergulhador-turista resulta, em média, em um rendimento de US\$ 1,81 para a comunidade da região, US\$ 0,75 para a renda per capita e US\$ 1,15 em valor agregado para a economia estadual. Deste modo, para cada milhão de dólares gastos, são gerados em média 37 empregos.

Além disso, a atração de turistas curiosos em visitar a estrutura marinha e sua sinergia com o ambiente na qual ela é disposta, também seria de grande relevância para a economia local. No Canadá, o naufrágio de um *destroyer* gerou o equivalente de US\$ 3,5 milhões em operações turísticas de mergulho e pesca esportiva, além de ter contribuído para a conservação de áreas naturais que vinham sofrendo impactos de uso pelos mergulhadores e pescadores (Milon et al., 2000 *apud* Santos & Passavante, 2007).

Deste modo, a concepção de uma estrutura com um design “interessante” aos turistas, na medida do possível, pode vir a ser um ótimo ganho em termos econômicos, uma vez que a obra de engenharia chamaria muito a atenção de curiosos. Para tanto, é preciso que tenha sido realizado um trabalho de *marketing* adequado.

A principal vantagem econômica associada a este empreendimento, é o aproveitamento elétrico possibilitado pela utilização da energia das ondas como matéria prima através da Unidade Geradora de Energia. O trabalho tem como objetivo a determinação do local ideal para o assentamento desta estrutura.

3. Lentes Multifocais

A fundamentação teórica em se construir um arrecife artificial para quebra de ondas é criar uma topografia irregular do leito, que causa a arrebentação da onda em uma forma conhecida e desejada. Com a propagação das ondas em direção à costa, verifica-se um empinamento de sua crista, no momento em que elas entram em águas mais rasas. Quando as ondas incidem sobre um arrecife artificial convencional, elas têm sua altura e, conseqüentemente, energia aumentada, devido à abrupta mudança de profundidade (West, 2002).

3.1 Estruturas de Amplificação

Estruturas para a amplificação de ondas são pretendidas para funcionarem como agentes responsáveis por alterar a altura da onda incidente, podendo somente amplificá-la, ou forçar sua quebra. Esses objetivos são alcançados alterando a topografia local, dado que é por causa da conformidade batimétrica, que a onda irá, ou não, arrebentar. Em princípio, essas estruturas atuam como lentes amplificadoras ao passo que as ondas incidentes refratariam para um ponto de convergência, como visto na Figura 9. A energia das ondas é focalizada para um ponto a sotamar da estrutura de amplificação, criando, deste modo, um aumento da altura da mesma, após sua propagação sobre o arrecife (West, 2002).

O objetivo de uma estrutura deste tipo é amplificar a altura, e conseqüentemente a energia, de modo que a mesma quebre em algum ponto *off shore*, ou tenha somente sua densidade energética aumentada, para um posterior aproveitamento da mesma. Este processo é chamado de “focalização de ondas” e, portanto, arrecifes que provocam esse fenômeno são chamados de “Arrecifes Focalizadores de Ondas” (West, 2002).

A amplificação da altura das ondas é um fenômeno intimamente relacionado com a profundidade do leito e no caso da presença de uma estrutura desse tipo, com a altura da estrutura em questão. Deste modo, o estudo dimensional do arrecife é condição “*sine qua non*” para a caracterização do efeito pretendido. Então, estudos para a determinação da altura, largura, comprimento e a localização do arrecife devem ser executados levando em consideração os objetivos do projeto.

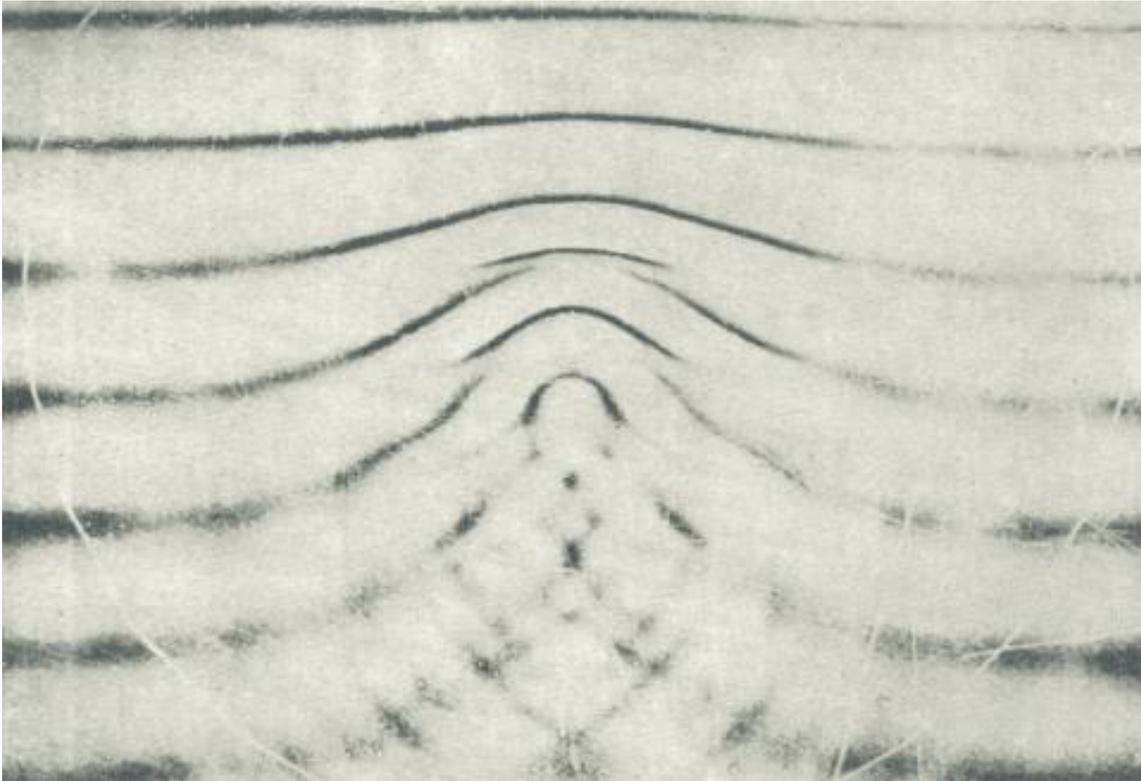


Figura 9 Exemplo da distorção da frente de onda causada pela focalização da mesma na presença da lente de amplificação.

3.2 Estruturas de Dissipação

Para o caso da função de estruturas deste tipo for puramente a dissipação das ondas através do método de arrebentação, elas devem ter uma configuração dimensional condizente com esse objetivo.

Em lentes deste tipo, é esperado que a onda adquira uma certa altura máxima, chamada de altura de arrebentação. São utilizadas quando se deseja obter uma linha de arrebentação *off shore* não paralela à linha de costa, favorecendo assim a prática de surfe, como visto na Figura 10. Outro objetivo de estruturas desse tipo é possibilitar ao surfista uma entrada mais cedo na crista da onda e, deste modo, permanecer lá por mais tempo.

Para que a arrebentação seja feita de modo controlado, é preciso chegar numa configuração geométrica ideal que propicie o efeito desejado. Parâmetros como ângulo

de quebra, modo de arrebentação, taxa de dissipação e altura de arrebentação são normalmente estudados e analisados.

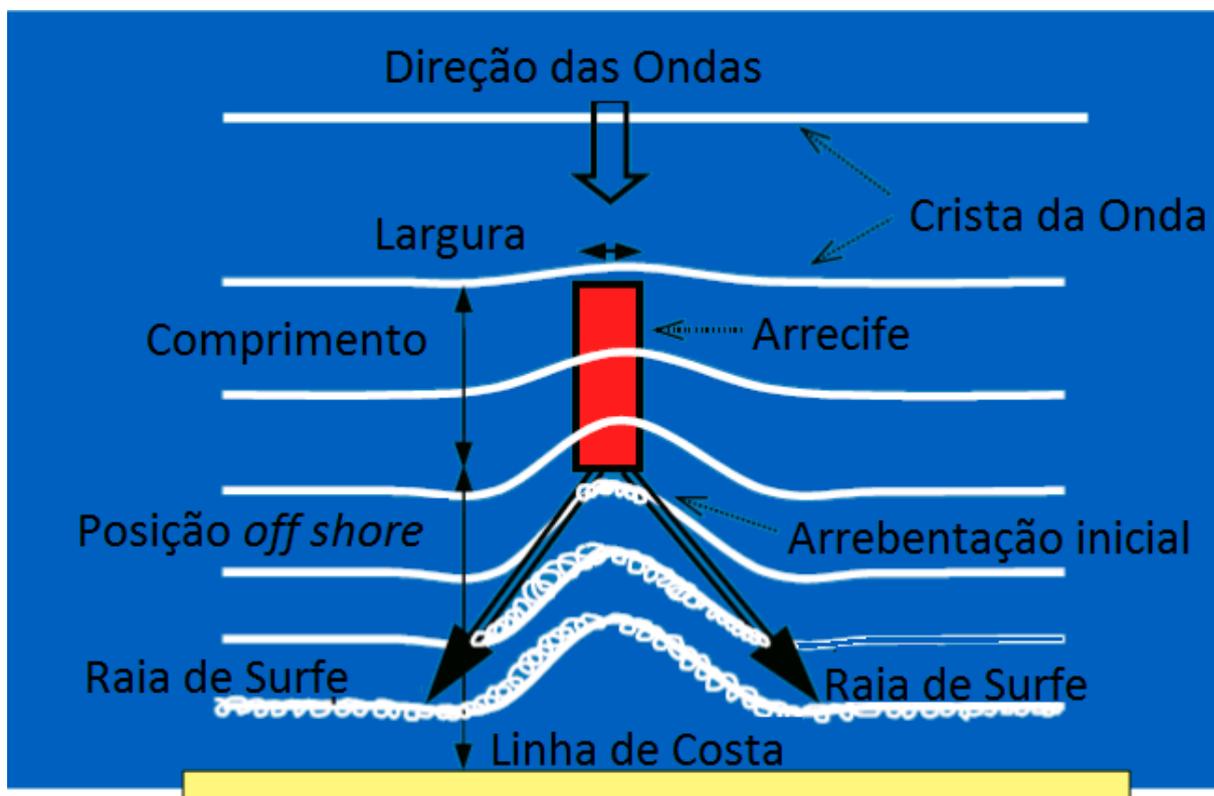


Figura 10 Distorção da linha de arrebentação ao passar pelo arrecife artificial.

3.3 Projeto “Macaé”

Macaé uma cidade do estado do Rio de Janeiro, situada a aproximadamente 200 quilômetros a nordeste da capital, na chamada Região dos Lagos. Por sua localização privilegiada e praias maravilhosas, a cidade recebe milhares de visitantes anualmente, sendo, portanto um importante centro de lazer do estado.

Essa importância fez com que o governo do estado se interessasse pela concepção de um “surfódromo”, que ao passo que a prática do surfe seria incentivada, a costa seria protegida, uma vez que estas estruturas são importantes também para a proteção costeira. Associado a essa estrutura, foi estudada uma estrutura de amplificação de energia das ondas para a geração de eletricidade.

3.3.1 Desenvolvimento de Estruturas Marinhas de Amplificação de Ondas para Geração de Energia Elétrica

Nesta etapa do projeto foi desenvolvido um estudo que resultou na indicação preliminar para o sítio das estruturas, a pesquisa foi devidamente embasada nos resultados obtidos com a modelagem computacional.

O trabalho desenvolvido descreve, através de modelagem, a propagação de ondas na praia Campista. Na primeira etapa do estudo, através do uso do modelo de propagação de ondas contido no SisBaHiA[®], objetivou-se avaliar as áreas com maior energia dentro da região de interesse para definição do sítio ideal para as estruturas de focalização, geração e dissipação de energia, os quais são objetivos finais do projeto em questão.

Na segunda etapa do projeto, foi feito um estudo, também utilizando modelagem, para fundamentar o dimensionamento preliminar do arrecife artificial móvel, que no trabalho em questão foi nomeado ARAM. Através do uso dessa ferramenta objetivou-se avaliar diferentes geometrias de arrecifes para amplificação da altura das ondas, a fim de gerar um aumento significativo na produção de energia elétrica pela unidade geradora de energia (UGE).

Duas concepções foram analisadas, ambas considerando que a UGE seria assentada sobre uma superfície a oito metros de profundidade, em relação ao zero hidrográfico (média das baixa-mares de sizígia). Na primeira concepção, a UGE é instalada sobre o ARAM, que tem dois metros de altura e é posicionado sobre o leito marinho a dez metros de profundidade, de modo que a coluna d'água sobre o seu platô é igual a oito metros.

Na segunda concepção, a UGE é instalada sobre o leito marinho, distante dez metros do ARAM, com ambas as estruturas instaladas sobre o leito marinho em oito metros de profundidade.

Em ambas as concepções, os desempenhos dos arrecifes foram avaliados tendo por base os resultados de propagação de uma onda de projeto, neste caso definida como a mais frequente da região.

Ao fim desta fase do projeto foi visto que a segunda concepção seria mais adequada ao empreendimento e que a configuração geométrica ideal seria aquela com um formato retangular, com 60 metros de comprimento por 40 metros de largura. Esta configuração fornece o ponto focal na posição prevista para a UGE, a 10 metros de distância do arrecife artificial. A maior altura testada cuja amplificação na posição da UGE é igual à amplificação máxima, é 3,5m.

3.3.2 Desenvolvimento de Estruturas Marinhas de Dissipação de Ondas para Geração de Energia Elétrica

Nesta fase do projeto, foram realizados estudos para a concepção estrutural de um arrecife artificial de dissipação de energia, chamado de ARAM- DISSIPACÃO.

Com auxílio de modelagem computacional avaliou-se o desempenho deste projeto preliminar, que tem por objetivo, diminuir a altura das ondas mais energéticas na praia Campista que também serão amplificadas pelo ARAM-AMPLIFICAÇÃO para aumentar a produção de energia elétrica pela UGE. Esta dissipação da energia das ondas se dará pelo processo de arrebentação, que deverá ocorrer de modo controlado pela geometria da estrutura a fim de proporcionar condições ideais à prática de surfe. Além disso, a arrebentação das ondas sobre o ARAM-DISSIPACÃO tem por objetivo diminuir os processos erosivos e melhorar a balneabilidade em uma faixa de praia a sotamar da estrutura, onde a altura das ondas será reduzida em relação à condição natural.

Dessa forma, foi concebida uma estrutura com aproximadamente 65 metros de comprimento (direção transversal à praia) por 83 metros de largura, com a altura variando entre 2 e 4 metros. A estrutura é composta por isobatas, que serão responsáveis pelo ângulo de quebra e o modo de arrebentação das ondas. Para avaliação do comportamento da estrutura, foram feitas simulações em modelo computacional de propagação de ondas.

4. Determinação do Sítio para o Assentamento do Conjunto de Estruturas

Para que os resultados fossem alcançados, diversas ondas foram estudadas e avaliadas. Ondas com diferentes períodos, alturas e direções foram simuladas através do uso de Modelagem Computacional, mais precisamente do Modelo de Propagação de Onda contido no SisBaHiA[®].

O Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA[®]) é um programa licenciado pela Fundação COPPETEC, órgão de gestão e fomento da COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, localizado na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Maiores informações acerca do uso e da licença do Software podem ser encontradas através do site <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>.

4.1 Modelagem Computacional

A aplicação de modelos para estudos, projetos, pesquisas e até mesmo à gestão de recursos hídricos é inquestionável frente à complexidade do ambiente em corpos de água naturais, especialmente em lagos, reservatórios, sistemas estuarinos e zonas costeiras. Modelos são ferramentas de integração, sem as quais, dificilmente uma visão dinâmica dos processos seria alcançada.

Como já foi dito anteriormente, o uso desse tipo de estudo é imprescindível para que um prognóstico e um diagnóstico sejam alcançados. Podemos destacar a importância para cada um deles da seguinte forma.

- **Em análises de diagnóstico:**
 - Otimização de custos de monitoramento e medição, integrando informações espacialmente dispersas, geralmente obtidas em estações pontuais de medição. (Só se pode gerir o que se conhece!).
 - Estender o conhecimento para regiões nas quais não há medições: somente através de modelos tem-se efetivamente um modo consistente de interpolar e extrapolar medições, viabilizando um conhecimento amplo

da região de interesse, minimizando e otimizando o monitoramento de variáveis ambientais.

- Entender processos dinâmicos, ajudando na interpretação de medições feitas em estações pontuais.
- **Em análises de prognóstico:**
 - Prever situações simulando cenários para estudos e projetos.
 - Indispensável para Licenciamento Ambiental: mapeamento de áreas de risco, determinação de destinos prováveis de contaminantes, etc.
 - Fundamental para Planos de Emergência, e definição de estratégias de ação em caso de acidentes com derrames de contaminantes por exemplo.
 - Fundamental na elaboração de Planos de Mitigação.
 - Prever evolução de eventos em tempo real.

De maneira geral podemos entender o processo de modelagem comparando-a com o processo de apreciação e avaliação de uma música, que nesse caso seria o nosso fenômeno de interesse. Mesmo desconhecendo a teoria musical (modelagem matemática), ou não sabendo tocar qualquer instrumento (outras modelagens posteriores à matemática) uma pessoa pode avaliar a qualidade de uma interpretação musical (resultados de modelos), se tiver um bom conhecimento (modelagem conceptual) da música sendo interpretada (modelada). Para conhecer bem uma música é necessário ouvi-la repetidas vezes (observação e medição). Da mesma forma que na música, o modelador não necessita conhecer o modelo matemático ou computacional, que fora usado, para poder avaliar os resultados que lhe são apresentados, porém não saberá criticar ou interpretar profundamente tais resultados. Uma análise mais profunda da situação só é possível se houver uma boa concepção dos fenômenos sendo modelados. (Rosman P. C., SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental).

O fluxograma abaixo apresenta, de maneira generalizada, as rotas que um modelador deve seguir para que um bom estudo possa ser realizado.

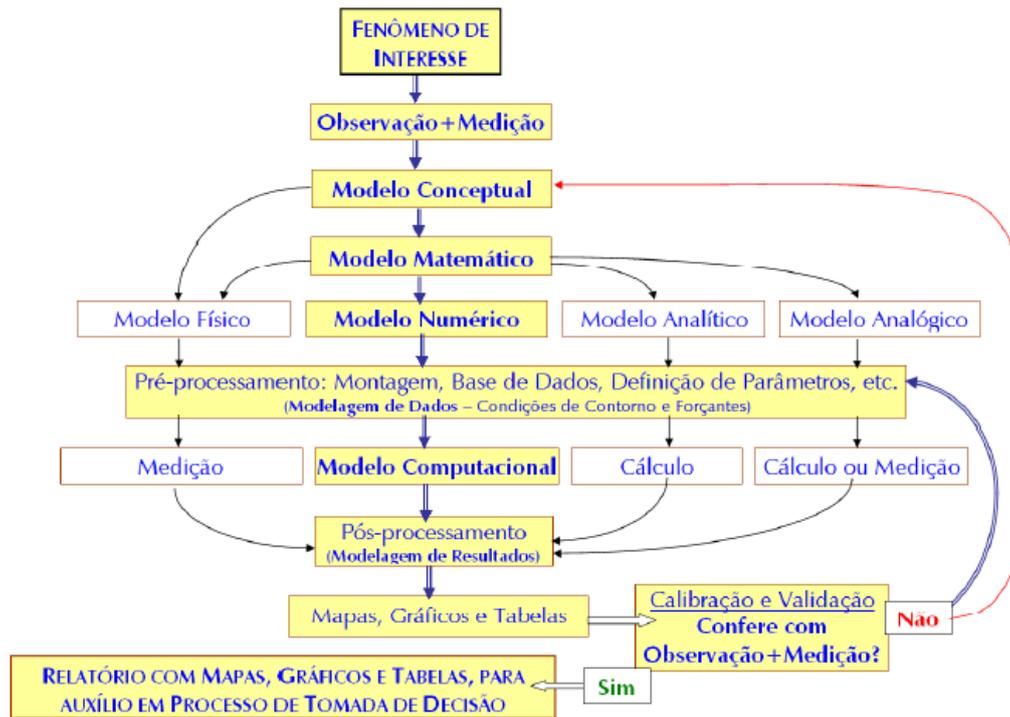


Figura 11 Fluxograma representativo das etapas que devem ser seguidas por um Modelador em um processo de Modelagem.

Existem quatro métodos de resolução dos modelos matemáticos (Machado & da Silva, 2010): analítico, analógico, físico, e numérico. As soluções analíticas são de difícil aplicação, pois muitas das equações matemáticas que descrevem um determinado fenômeno não possuem solução, a menos que simplificações sejam feitas, e daí só se tornam aplicáveis a situações muito peculiares, que geralmente não se observam em ambientes naturais. O mesmo acontece aos modelos analógicos, que também só servem para representar situações teóricas e de pouca aplicação prática (de Paula, 2009).

Os modelos físicos consistem em reproduzir o fenômeno de interesse em escala reduzida. Esses têm boa aplicação quando o fenômeno de interesse não possui tanta complexidade. Quando se trata de fenômenos de grande escala, sua reprodução pode se tornar muito dispendiosa. A outra resolução seria através de modelos numéricos, que transformam as equações analíticas do modelo matemático em equações numéricas, fazendo com que as variáveis contínuas se tornem variáveis discretas, de mais fácil operação (Peixoto & Duarte, 2012).

4.2 Modelo de Ondas

O Modelo de Ondas do SisBaHiA[®] é dividido em um Modelo de Propagação de Ondas e outro de Geração de Ondas. Neste trabalho foi usado somente o primeiro, uma vez que queremos saber como uma onda que vem de águas profundas se comporta na região de interesse, que, por ser uma zona de praia, é uma região de águas rasas.

É um modelo em diferenças finitas que calcula a propagação de ondas em águas costeiras considerando fenômenos de refração e difração. Para se obter um resultado confiável deve ser feita uma cuidadosa modelagem digital do terreno, topografia de fundo e dos terrenos secos (ilhas e região costeira). Diversos tipos de ondas podem ser propagadas pelo modelo, ondas unitárias, ondas de espectro direcional e ondas de outro modelo rodado.

Este modelo de diferenças finitas é baseado no modelo REF-DIF, desenvolvido a partir de modelo de equações de corrente de ondas para declives suaves, desenvolvidas por Kirby (1984). Esta equação pode ser escrita da seguinte forma

$$\frac{D^2\varphi}{Dt^2} + \nabla \cdot U \frac{D\varphi}{Dt} - \nabla \cdot (CC_g \nabla \varphi) + (\sigma^2 - k^2 CC_g)\varphi = 0$$

onde φ é a velocidade potencial na superfície livre e onde,

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + U \cdot \nabla$$

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$$

$$U = (U(x, y), V(x, y)) = \text{vetor de corrente ambiental}$$

$$\sigma = \omega - k \cdot U$$

$$C = \frac{\sigma}{k} = \text{celeridade da onda}$$

$$C_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \text{celeridade de um grupo de ondas}$$

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh)$$

Muitas outras características podem ser adicionadas ao modelo de modo a aumentar o seu campo de aplicabilidade.

Mais informações acerca desta equação que rege o funcionamento do modelo, bem como as outras peculiaridades que podem ser adicionadas, favor consultar o Capítulo 3 da parte 2, páginas 24 a 26 do Coastal Engineering Manual.

4.3 Região Modelada

A região modelada compreende parte da costa leste (Praia do Futuro, ao sul da região do Porto de Mucuripe) e se estende por aproximadamente 25 quilômetros no sentido da região noroeste do país. A Figura 12 mostra de forma mais simplificada qual é a região supracitada, no contexto geográfico da localidade.



Figura 12 Imagem do Google Earth® que ilustra a região que foi digitalizada e modelada.

4.4 Dados Considerados nas Simulações

No tópico a seguir serão apresentados os dados considerados nas modelagens feitas, bem como a razão de sua adoção. Três importantes parâmetros foram investigados, são eles: a batimetria; dados de maré e dados de onda.

4.4.1 Batimetria

Para que a Grade de Batimetria pudesse ser gerada, foram utilizados dados obtidos das cartas náuticas 710 (Proximidades do Terminal de Pecém e do Porto de Mucuripe) e 50 (Do Rio Parnaíba ao Recife).

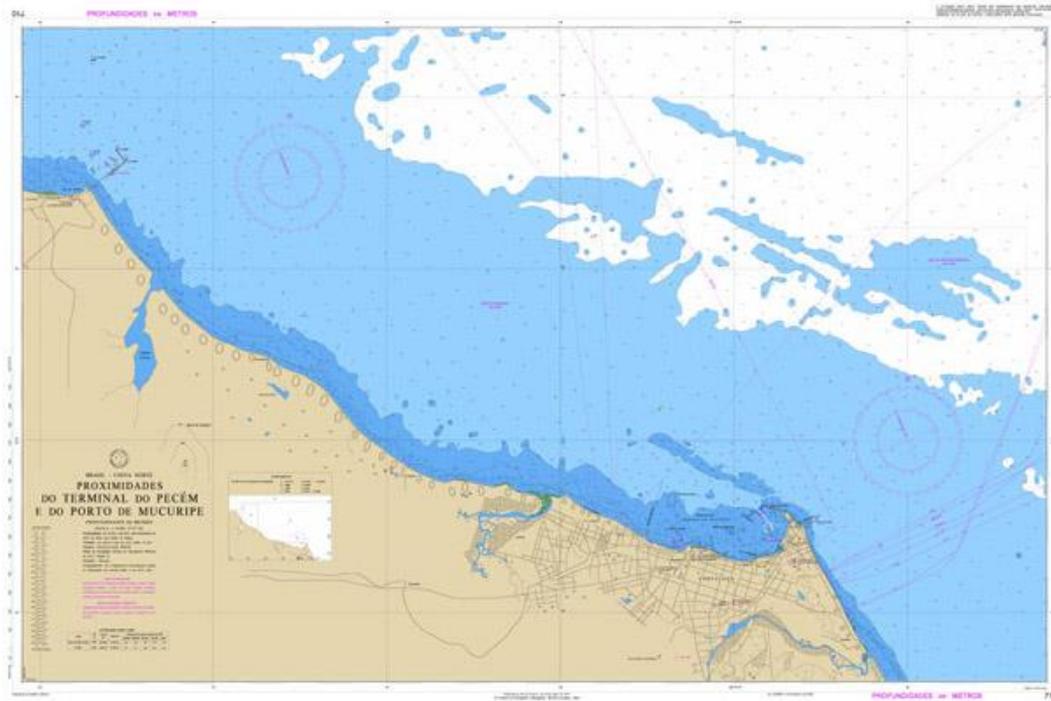


Figura 13 Carta Náutica de número 710 (Proximidades do Terminal do Pecém e do Porto de Mucuripe) utilizada para a criação da grade de Batimetria do Modelo de Propagação de Ondas.

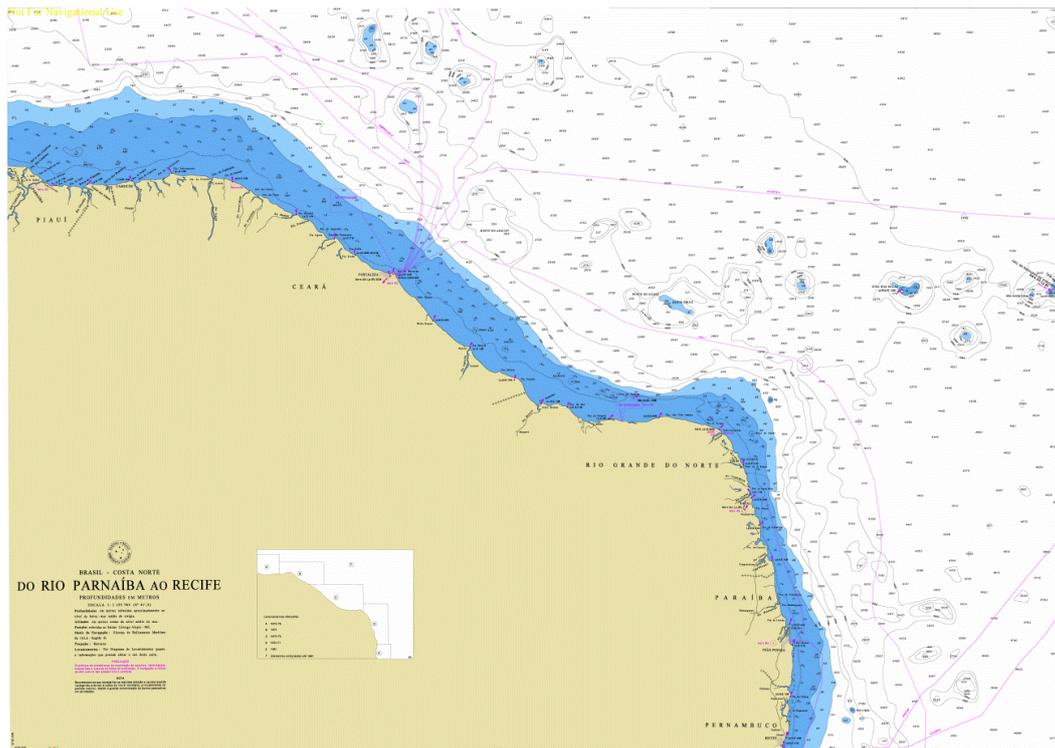


Figura 14 Carta Náutica de número 50 (Do Rio Parnaíba ao Recife) utilizada para a criação da grade de Batimetria do Modelo de Propagação de Ondas.

Foi necessário o uso de duas cartas náuticas, uma vez que a profundidade não varia muito até aproximadamente sessenta quilômetros da costa. Vale ressaltar, que para o pleno funcionamento do Modelo de Propagação de Ondas, é necessário que tenhamos dados de batimetria da região de águas profundas, que neste trabalho é de 132 metros de profundidade (onda de maior período é de 13 segundos), conforme a teoria linear. A partir de tal ponto as ondas começam a sofrer interferência do fundo e, deste modo, começam a refratar.

Como a informação da batimetria de todos os pontos da carta não está disponível foi necessário fazer a interpolação dos dados fornecidos. O cálculo de interpolação foi feito pelo próprio SisBaHiA[®] e o método escolhido foi o de Triangulação Linear.

Uma vez que todos os dados desejados foram obtidos, pode-se ter uma melhor noção da variação de profundidade na região. Na Figura 15 podemos identificar essa variação e perceber nitidamente a presença de um talude muito íngreme (interface azul/cinza) paralelo à costa.

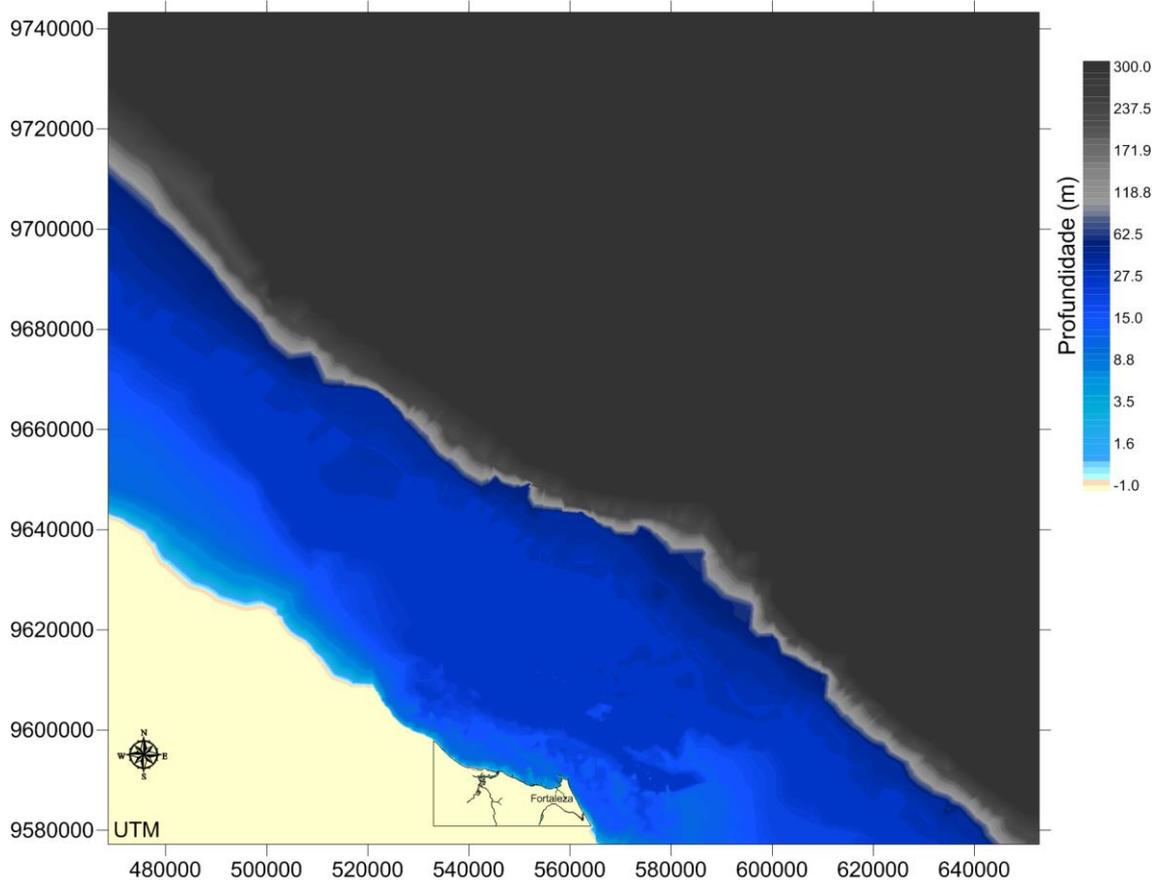


Figura 15 Mapa Batimétrico da região estudada.

4.4.2 Dados de Maré

Conforme as informações contidas em uma das cartas náuticas, foi considerada uma maré 1,6 m acima do Zero Hidrográfico (média das baixa-mares de sizígia).

4.4.3 Dados de Onda

Os dados de ondas que foram fornecidos foram dados medidos a 65 km de distância da costa, como visto na Figura 16. Para obtenção destes dados foi usado o modelo de ondas WWIII (Wave WatchIII), que é um software para a obtenção de dados oceanográficos para uma determinada região predefinida.

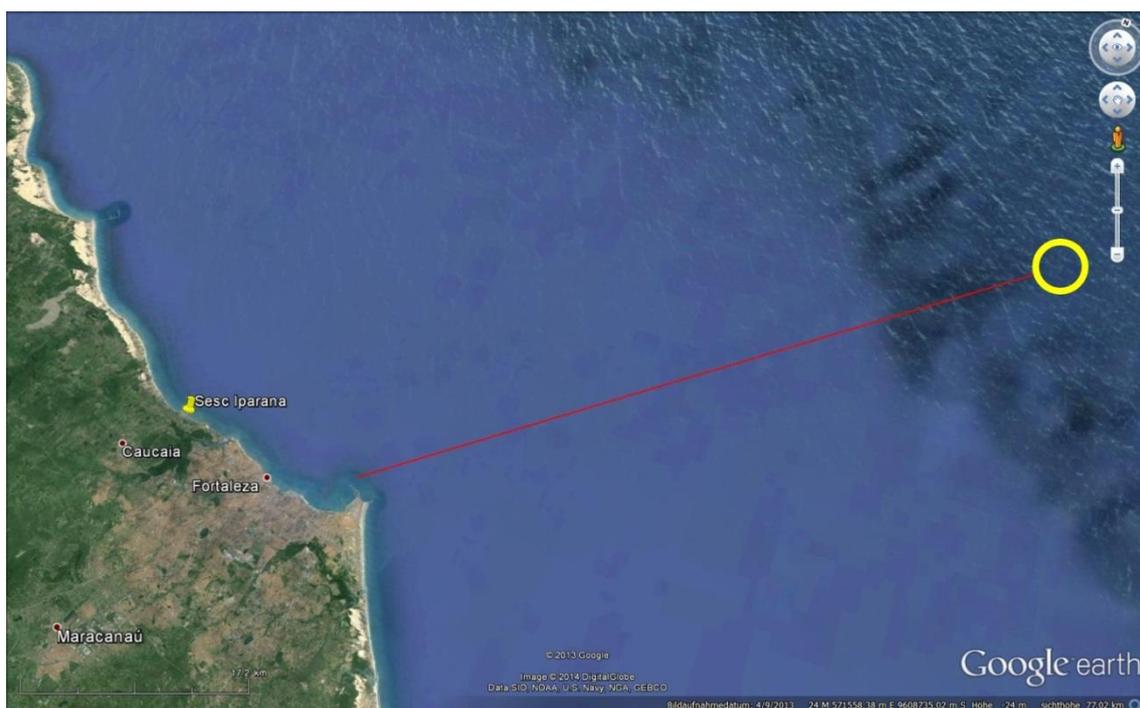


Figura 16 Ponto de medição de dados para alimentação do modelo WaveWatchIII®.

Os resultados gerados pelo modelo tem resolução espacial de 0,5° e resolução temporal de 3 horas. O conjunto de dados contém os seguintes parâmetros: altura de onda significativa H_s , período de pico espectral T_p e direção vetorial de onda média. A série temporal obtida contém dados de 8 anos, de Fevereiro de 2005 até Janeiro de 2013. A Tabela 1 resume os dados de ondas que foram obtidos.

	0%	8%	26%	17%	13%	7%	6%	6%	6%	5%	4%	1%	1%	0%	0%	0%	
Hs (m)	49	1814	6140	3929	3140	1641	1361	1517	1334	1210	840	286	122	78	4	3	23468
0.0 a 0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5 a 1.0	0	0	5	35	8	15	5	12	1	0	0	0	0	0	0	0	81
1.0 a 1.5	45	334	296	1027	1009	227	235	209	115	121	51	14	7	3	0	0	3693
1.5 a 2.0	4	1437	2653	1361	1786	993	784	993	833	587	417	119	55	29	1	0	12052
2.0 a 2.5	0	43	3068	992	326	351	298	266	365	477	303	120	41	39	3	3	6695
2.5 a 3.0	0	0	118	501	6	5	39	37	20	25	69	28	17	7	0	0	872
3.0 a 3.5	0	0	0	13	5	0	0	0	0	0	0	5	2	0	0	0	25
Tp (s)	4 a 5	5 a 6	6 a 7	7 a 8	8 a 9	9 a 10	10 a 11	11 a 12	12 a 13	13 a 14	14 a 15	15 a 16	16 a 17	17 a 18	18 a 19	>19	

Tabela 1 Tabela produzida a partir dos dados fornecidos pelo Modelo de Ondas Wave WatchIII® (NOAA).

Outra maneira de analisar os dados de onda foi através do site do Global Wave Statistics. Neste site é possível escolher retângulos do globo terrestre onde estão contidas informações de ondas e ventos médios na região. A área escolhida para o estudo da região é a área 66 (em amarelo), como pode ser visto na Figura 17.

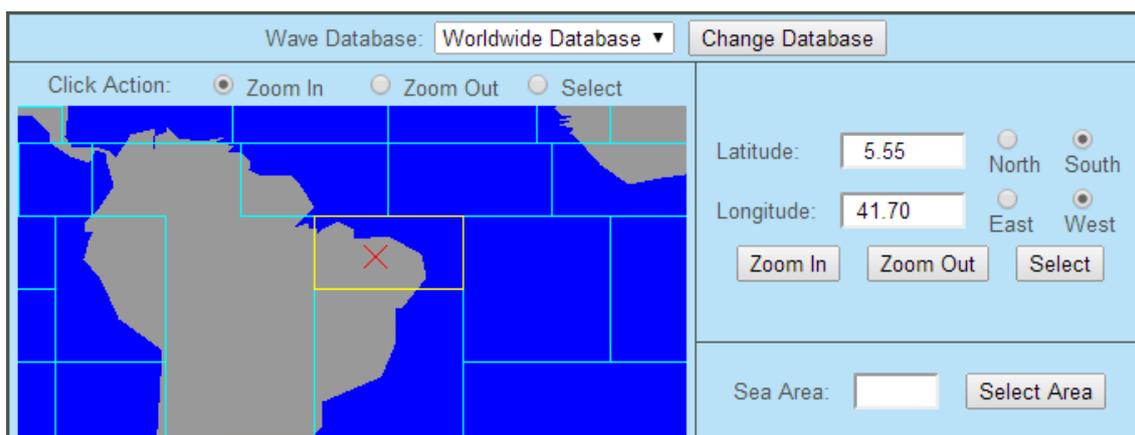


Figura 17 Imagem da Interface do Site do Global Wave Statistics

A diferença entre a tomada de dados dessas duas fontes é, principalmente, a escala temporal com a qual os dados são fornecidos. Enquanto o site da GWS nos fornece dados relativos a um ano de medição, a série temporal obtida do site da NOAA é de 8 anos. De qualquer forma, a análise e comparação das duas fontes nos dá uma ideia das condições marinhas com um maior grau de acurácia.

4.4.3.1 Comparação dos Dados

Dispondo dessas duas fontes, pode-se comparar as medições dessas duas fontes e, desta forma, foi possível escolher aqueles que serão utilizados no desenvolvimento do trabalho.

Foram comparados dados não só para a determinação de altura e período de onda, mas também, para a escolha da melhor da direção, que é aquela que mais incide na região de interesse.

Para determinação de altura de período foi utilizada a Tabela 1, que é uma tabela de dispersão feita com base nos dados retirados do modelo WaveWatchIII®. Deste modo, pode-se traçar uma comparação com aquela fornecida pelo site do Global Wave Statistics (Tabela 2).

Wave Scatter Table
Worldwide Database , Sea Area 66, Jan - Dec , ALL DIRECTIONS

Sig Hgt (m)	2	35	162	270	260	164	76	28	9	3	1	Obs
> 14												1000
13 to 14												
12 to 13												
11 to 12												
10 to 11												
9 to 10												
8 to 9												
7 to 8												
6 to 7												
5 to 6						1	1	1				3
4 to 5				2	4	6	5	3	1			21
3 to 4			3	16	29	29	19	9	3	1		110
2 to 3		3	30	89	112	79	37	13	4	1		366
1 to 2	1	20	97	151	110	48	15	4	1			447
0 to 1	1	12	21	13	4	1						52
	< 4	4 ~ 5	5 ~ 6	6 ~ 7	7 ~ 8	8 ~ 9	9 ~ 10	10 ~ 11	11 ~ 12	12 ~ 13	> 13	
Zero Crossing Period (s)												

Tabela 2 Tabela de Dispersão retirada do site do Global Wave Statistics.

O mesmo foi feito para a determinação do azimute da onda de projeto, porém com a geração de gráficos do tipo Rosa dos Ventos, como visto nas Figura 18 e Figura 19, que foram comparados com a tabela de probabilidades acumuladas, Tabela 3, fornecida pelo site do Global Wave Statistics.

Sea Area 66 - Probability of Wind and Wave Direction

	All Year	Mar - May	Jun - Aug	Sep - Nov	Dec - Feb
ALL DIRECTIONS	100.00 %	100.00 %	100.00 %	100.00 %	100.00 %
North-East	4.61 %	7.23 %	1.60 %	3.53 %	6.21 %
East	33.69 %	31.08 %	25.59 %	38.81 %	39.38 %
South-East	53.08 %	48.56 %	62.73 %	53.22 %	48.60 %
South	5.98 %	7.31 %	9.03 %	3.87 %	3.74 %
South-West	0.41 %	0.88 %	0.47 %	0.09 %	0.22 %
West	0.22 %	0.60 %	0.09 %	0.03 %	0.18 %
North-West	0.25 %	0.75 %	0.06 %	0.03 %	0.21 %
North	0.77 %	2.03 %	0.13 %	0.17 %	0.82 %
Direction Unknown	0.97 %	1.57 %	0.29 %	0.24 %	0.64 %

Tabela 3 Probabilidades Acumuladas de direção de ondas e ventos.

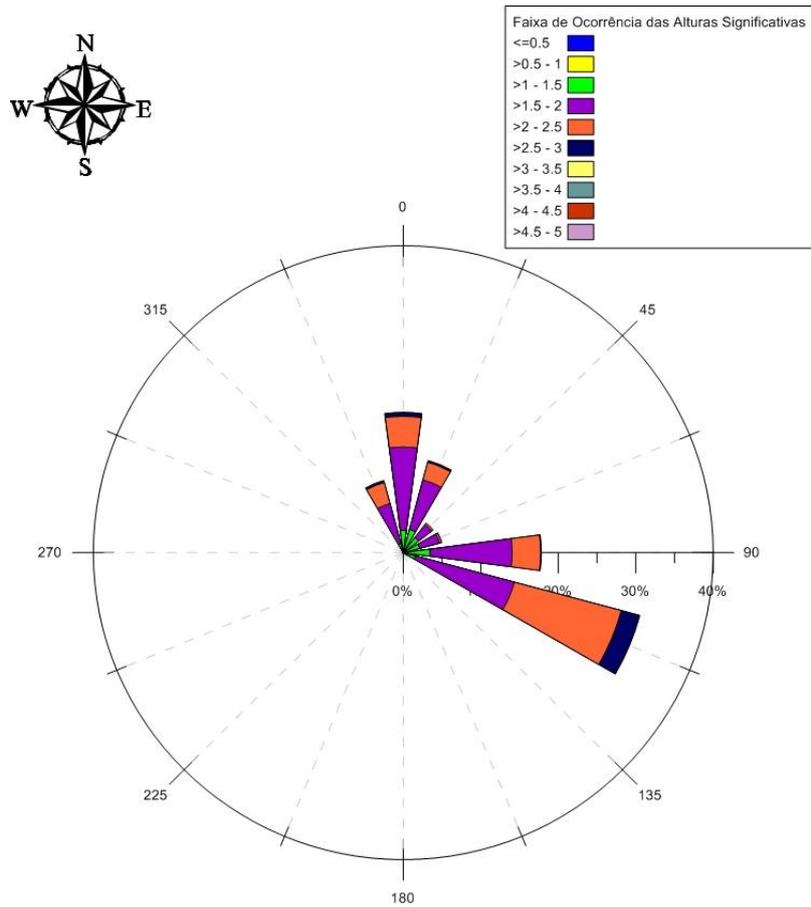


Figura 18 Ilustração que representa a Faixa de Ocorrência das Alturas Significativas.

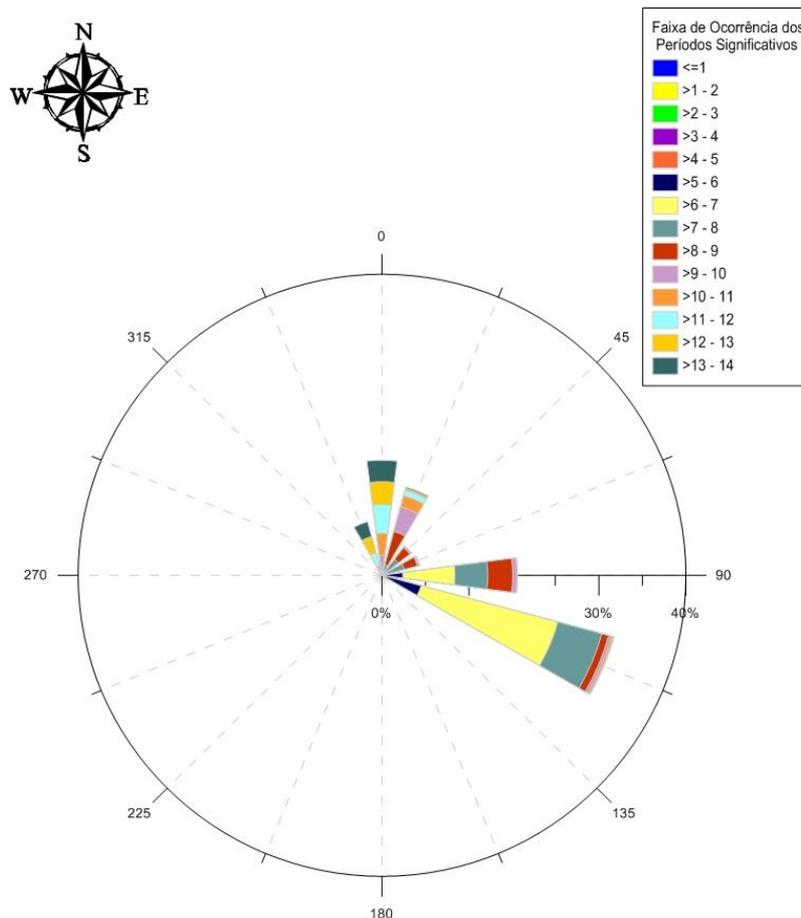


Figura 19 Ilustração que representa a Faixa de Ocorrência dos Períodos Significativos.

Estas comparações foram muito importantes, uma vez que, por serem muito semelhantes, validaram a utilização de qualquer uma das fontes para a caracterização da Onda inserida no SisBaHiA[®]. Deste modo, interpretações das duas fontes foram utilizadas ao longo deste trabalho.

4.5 Cenário de Ondas Modeladas

Para determinação do cenário ideal para a execução do modelo de propagação de ondas foi levado em conta, não só os fatores intrínsecos, como altura, período e direção das ondas mais frequentes, mas também aspectos físicos da costa, como a existência de um “pontão”, onde está situado o Porto de Mucuripe. Tais características foram determinantes na concepção das Grades de Propagação de Ondas.

Na Figura 20 pode-se observar que esta simples análise mostra que as direções principais, aquelas que não encontram obstáculos significativos em seus caminhos até a região de interesse, estão entre leste (90°) e norte-noroeste (337,5°).

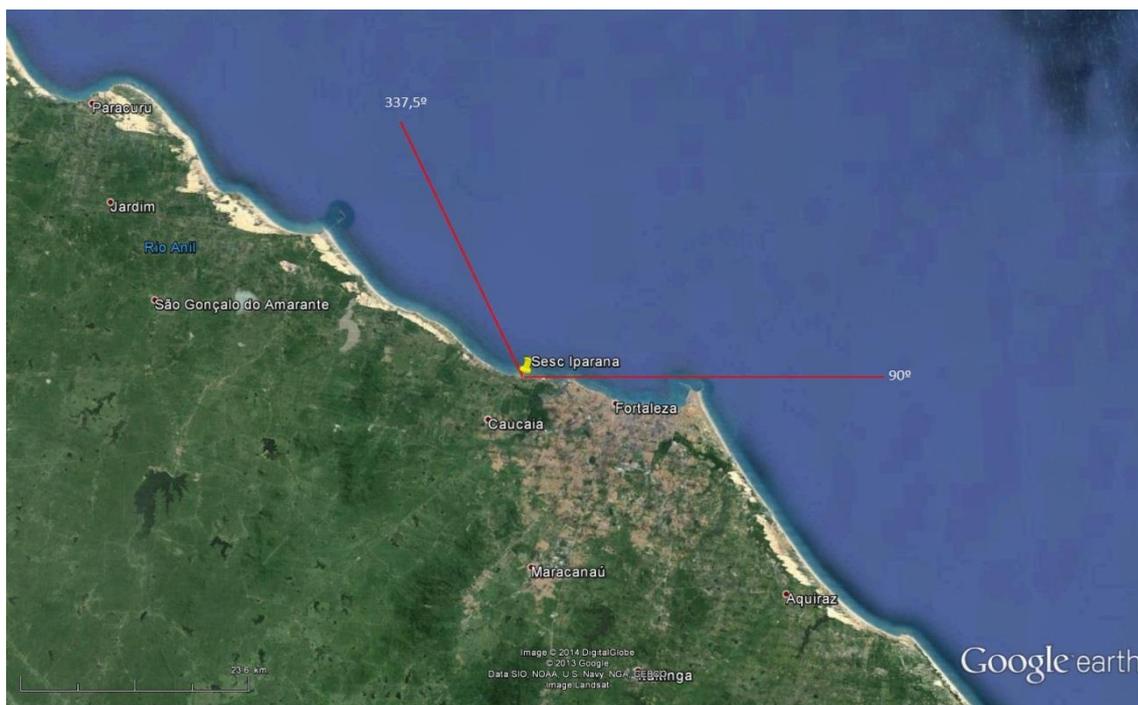


Figura 20 Imagem do Google Earth © que mostra a gama de ângulos utilizados para a modelagem.

- **Altura de onda:** Foi adotada em todas as simulações, uma altura unitária para a onda de entrada. Isso permite que, considerando a linearidade do fenômeno (desprezando-se efeitos não-lineares como interações onda-onda e onda-corrente), ter os resultados obtidos não como alturas de onda, mas como fatores de amplificação, que multiplicados pela altura ao largo resulta na altura da onda em cada ponto da grade. Esta onda, com essas características, foi denominada Onda Paramétrica.
- **Período de onda:** As ondas vindouras dos quadrantes norte, nordeste e leste foram associadas aos períodos que estão entre 6s e 13s.
- **Direção de propagação:** entre norte-noroeste (NNW) e leste (E).
- **Nível do mar:** 1,6m acima do nível de referência da DHN (nível médio do mar).

A Tabela 4 resume os principais parâmetros considerados para a concepção da Grade de Propagação de Ondas.

Azimuthes das Ondas de Projeto para GPO (°)	Alturas de Onda (m)	Períodos de Zero Ascendente (s)
N (337.5;22.5), NE (22.5;67.5) E (67.5; 90)	1,0	6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13

Tabela 4 Principais Características das Ondas Simuladas.

4.6 Grades de Propagação de Onda

De modo a preservar a confiabilidade dos resultados do Modelo de Propagação de ondas, foram criadas diversas Grades de Propagação de Ondas – GPO, para que o ângulo de incidência da onda na fronteira ao largo fosse igual ou inferior a $22,5^\circ$ (em relação ao eixo Lado Transversal à Costa – LTC). Este aspecto é um fator limitante intrínseco do modelo escolhido.

Outra restrição adotada foi que a profundidade na fronteira ao largo de GPO fosse igual ou maior à metade do comprimento de onda da onda de maior período simulada (teoria linear), uma vez que em profundidades maiores o fundo não interfere na propagação daquela onda.

A Tabela 5 apresenta os comprimentos de ondas em águas profundas (L_0) de cada período simulado (T), bem como a metade desses valores ($L_0/2$). Esta fração representa a profundidade em que o fundo do mar começa a interferir na propagação das ondas.

T (s)	L_0 (m)	$L_0/2$ (m)
6	56	28
7	77	38
8	100	50
9	126	63
10	156	78
11	189	94
12	225	112
13	264	132

Tabela 5 Períodos simulados e seus respectivos comprimentos de onda em águas rasas e profundas.

A seguir são apresentadas as respectivas Grades de Propagação de Ondas com seus parâmetros determinantes.

Por motivos geográficos, não foram consideradas neste estudo ondas com azimute de propagação característico dos quadrantes leste (superior a 90°), sudeste, sul, sudoeste e oeste. Ondas provenientes destas direções, ou são embarreiradas pelo “pontão” em Fortaleza, ou não existem.

4.6.1 GPO para Ondas do Quadrante Norte

As ondas vindas do quadrante norte possuem azimute que variam de 337,5° até 22,5°. É importante frisar que a costa do Ceará não apresenta nenhum tipo de barreira natural ou de origem antrópica que influencie ondas vindas dessa direção.

Os parâmetros determinantes para a configuração da respectiva Grade de Propagação de Ondas foi resumida na Tabela 6. A Figura 21 apresenta um mapa batimétrico com a localização da respectiva GPO.

GPO	LTC-N (°)	Δ-LTC (m)	Nº linhas	Δ-LIO (m)	Nº linhas	Subdiv. LIO	Azimutes (°)
Norte	180	94	1600	72	1400	15	337,5-22,5

Tabela 6 Tabela com os parâmetros determinantes para a configuração da GPO para o Quadrante Norte.

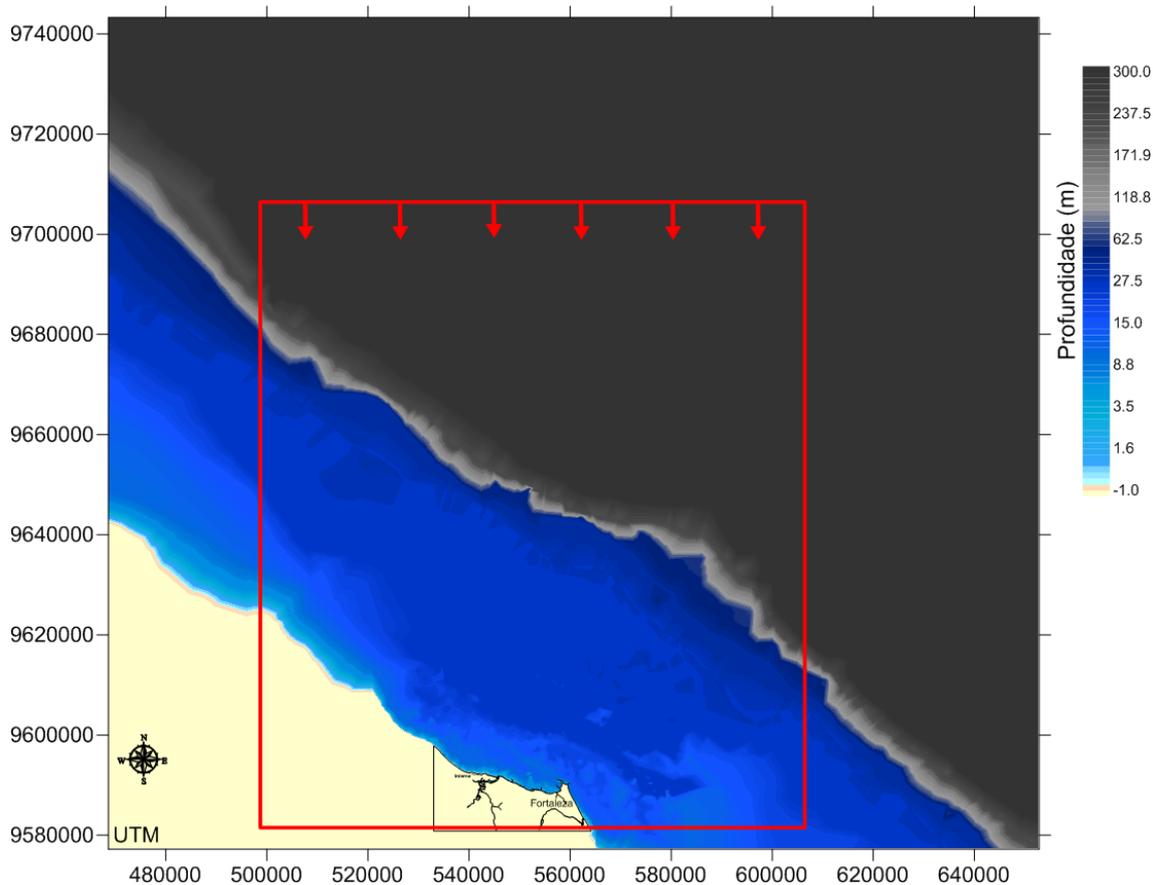


Figura 21 Mapa batimétrico com a representação da Grade de Propagação de Ondas para o Quadrante Norte.

4.6.2 GPO para Ondas do Quadrante Nordeste

As ondas vindas do quadrante nordeste possuem azimute que variam de $22,5^\circ$ até $67,5^\circ$. Ondas vindouras desta direção também não encontram nenhuma barreira que interfiram em sua propagação natural.

Os parâmetros determinantes para a configuração da respectiva Grade de Propagação de Ondas foi resumida na Tabela 7. A Figura 22 apresenta um mapa batimétrico com a localização da respectiva GPO.

GPO	LTC-N ($^\circ$)	Δ - LTC (m)	Nº li- nhas	Δ - LIO (m)	Nº li- nhas	Subdiv. LIO	Azimu- tes ($^\circ$)
Nor- deste	135	35	4176	36	4389	20	22,5-67,5

Tabela 7 Tabela com os parâmetros determinantes para a configuração da GPO para o Quadrante Nordeste.

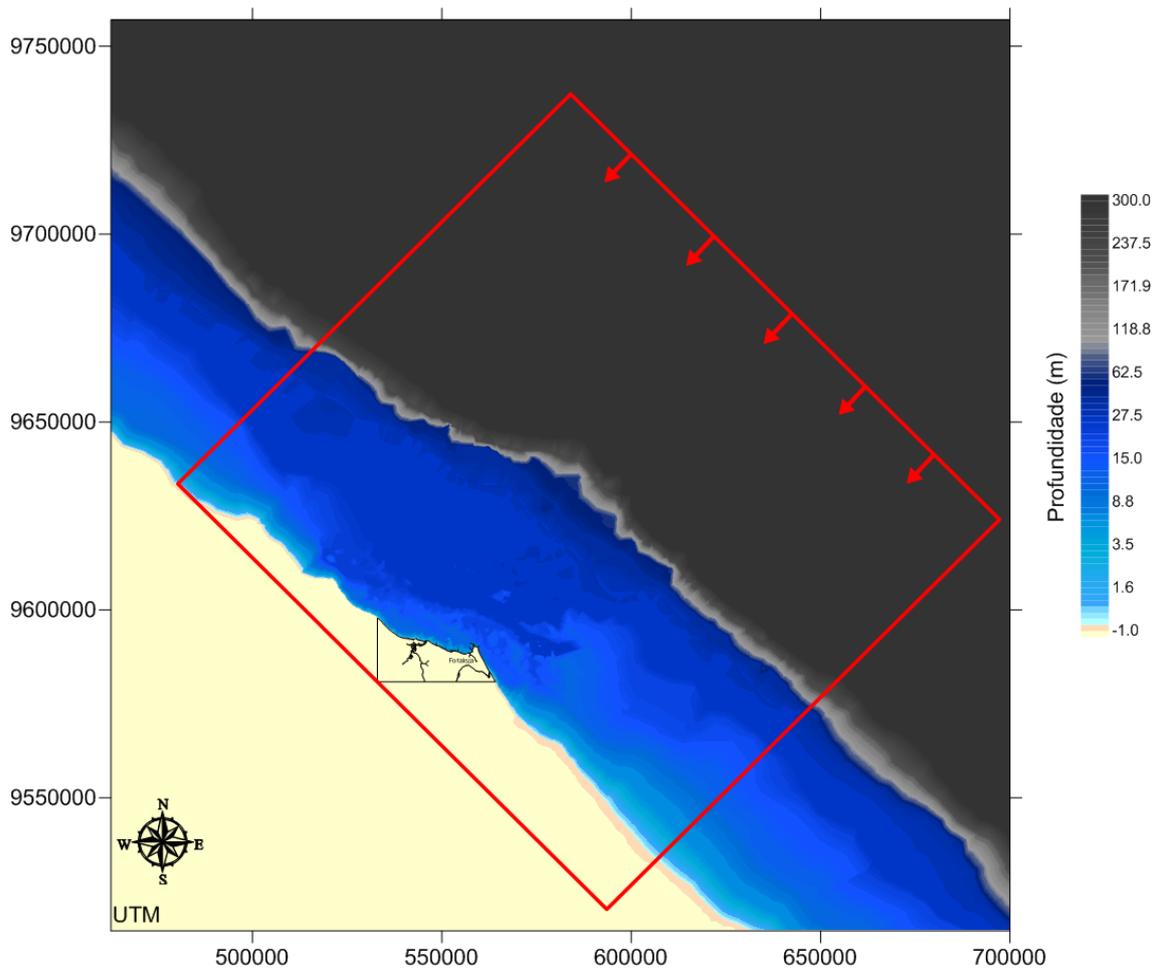


Figura 22 Mapa batimétrico com a representação da Grade de Propagação de Ondas para o Quadrante Nordeste.

4.6.3 GPO para Ondas do Quadrante Leste

As ondas vindas do quadrante leste possuem azimute que variam de $67,5^\circ$ até 90° . Nesta direção as ondas encontram obstruções, não só de origem natural, que é a própria geografia do litoral daquela região, mas também de origem antrópica, que são as obras costeiras construídas ao longo da costa, como por exemplo o molhe do Porto de Mucuripe, em Fortaleza.

Os parâmetros determinantes para a configuração da respectiva Grade de Propagação de Ondas foi resumida na Tabela 8. A Figura 23 apresenta um mapa batimétrico com a localização da respectiva GPO.

GPO	LTC-N (°)	Δ -LTC (m)	Nº linhas	Δ -LIO (m)	Nº li- nhas	Subdiv. LIO	Azi- mutes (°)
Leste	90	80	1700	70	1600	15	67,5-90

Tabela 8 Tabela com os parâmetros determinantes para a configuração da GPO para o Quadrante Leste.

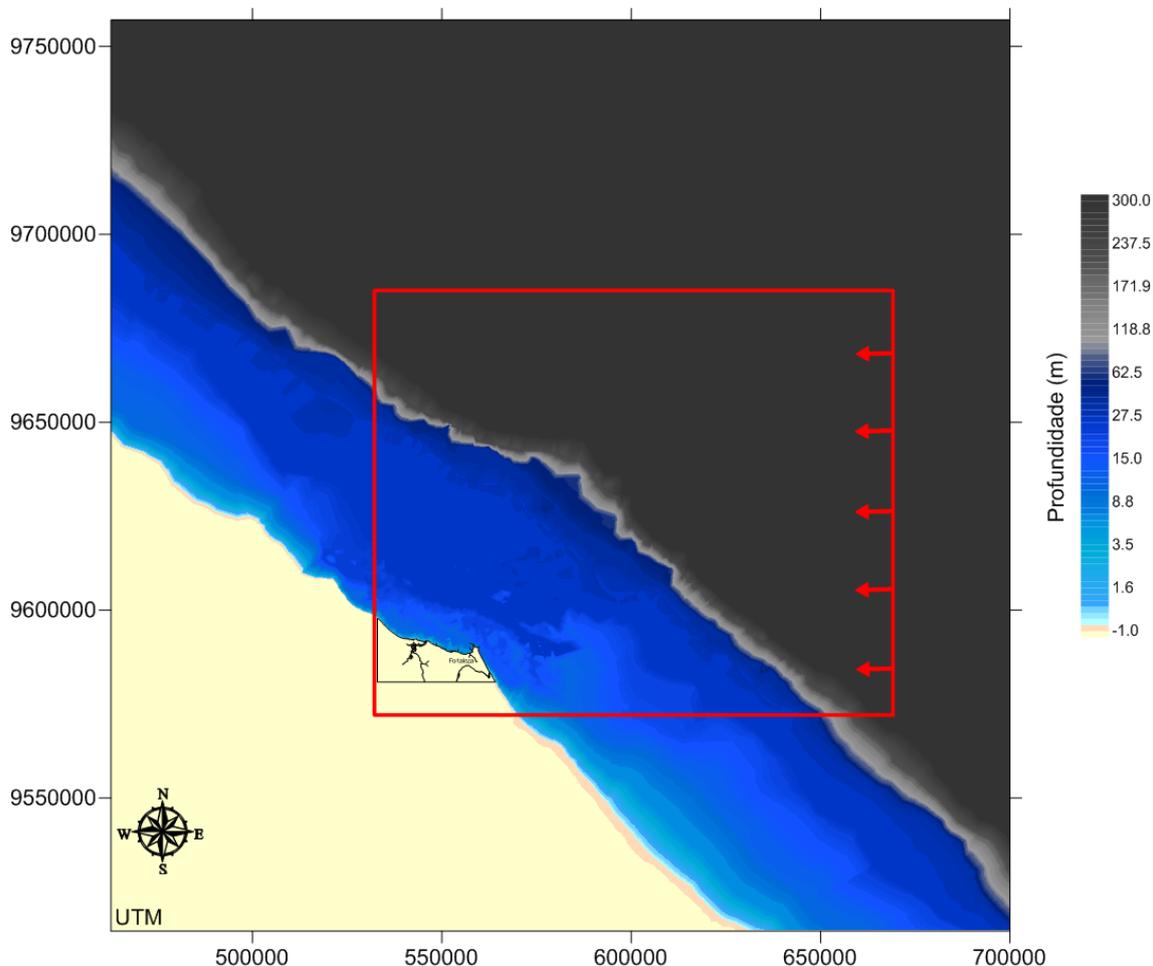


Figura 23 Mapa batimétrico com a representação da Grade de Propagação de Ondas para o Quadrante Leste.

4.7 Resultado do Modelo de Propagação de Ondas

No mapa abaixo estão representadas em vermelho, duas localizações hipotéticas para o assentamento da estrutura de amplificação. Estas regiões, que estão distantes cerca de 630 metros entre si, foram consideradas adequadas, uma vez que a profundidade varia de 8 a 9 metros sendo assim, uma região plana, o que confere à localidade uma condição ideal para a instalação da estrutura. A ausência de pedras e ou matacões também confere às regiões uma característica favorável para a sua escolha.

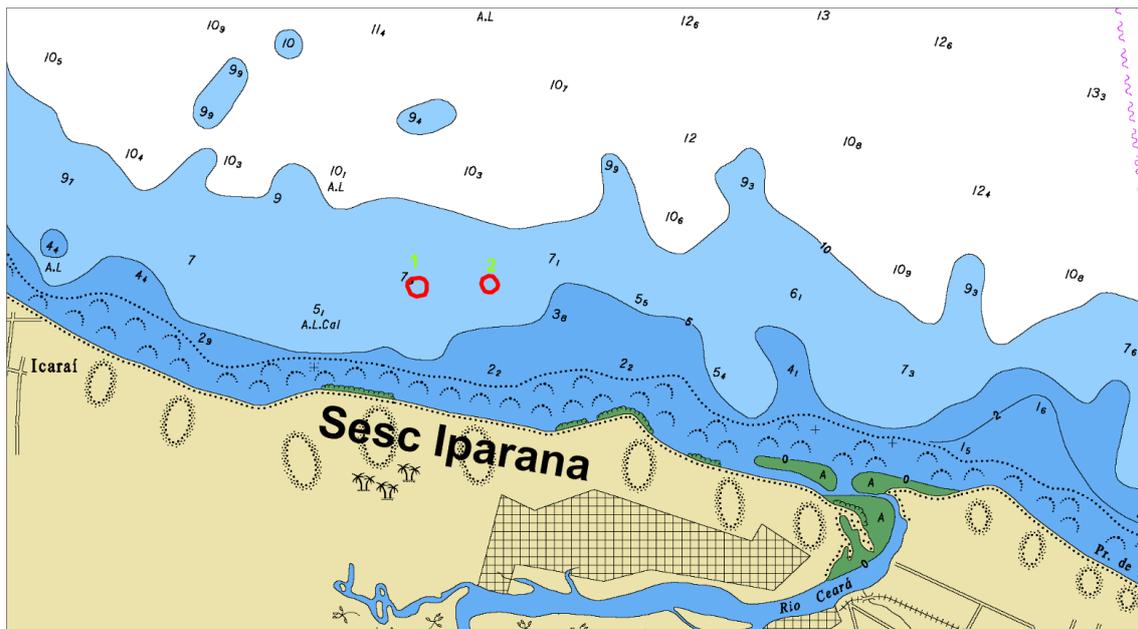


Figura 24 Carta Náutica com as duas possíveis áreas consideradas para o assentamento da lente de amplificação de onda.

A seguir são dispostos os principais resultados obtidos através do modelo de propagação de ondas. Foram dispostos mapas que apresentam a distribuição do fator de amplificação da altura de onda.

4.7.1 Fatores de Amplificação para Ondas vindas do Quadrante Norte

As ondas provenientes do quadrante Norte, com azimute $22,5^\circ$ atingem a costa com fator de amplificação próximo de zero e, portanto não foram representadas neste capítulo (disponíveis em no anexo), da mesma forma que ondas com azimute $337,5^\circ$. Na Figura 25 foi representado esse fenômeno para uma onda com período de 6 segundos.

O mesmo acontece de forma semelhante para os demais períodos. Os principais resultados obtidos com o modelo de propagação de ondas foram apresentados a seguir. Os demais resultados estão disponíveis no Anexo A.

Como pode ser visto as ondas com azimute igual a 0° chegam com maior fator de amplificação à parte da costa em questão.

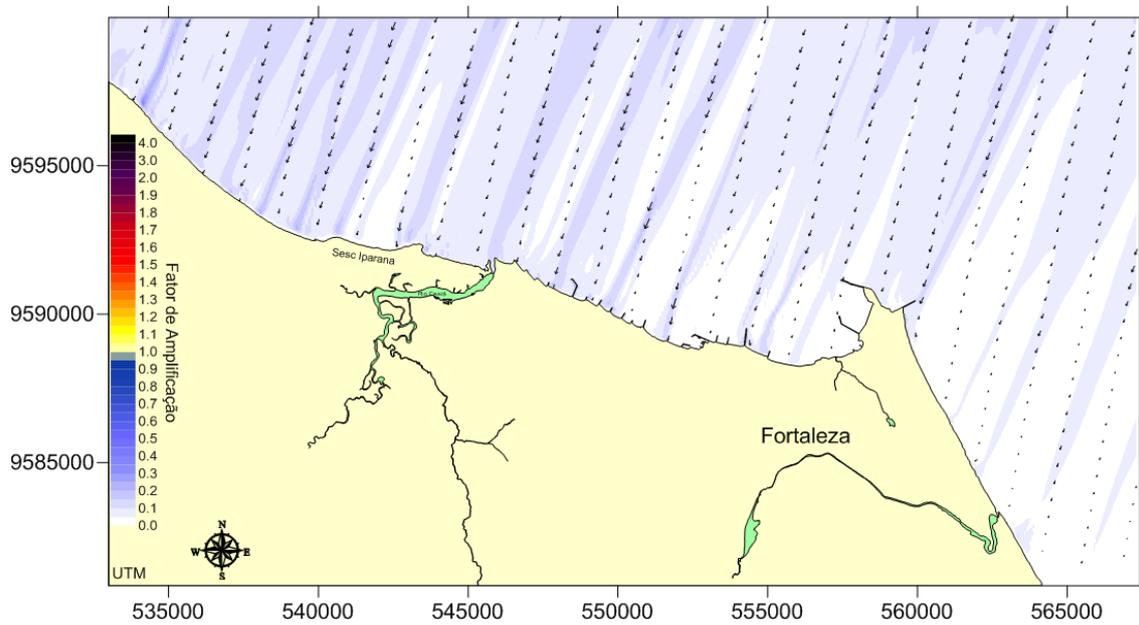


Figura 25 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 22,5° e período 6 segundos.

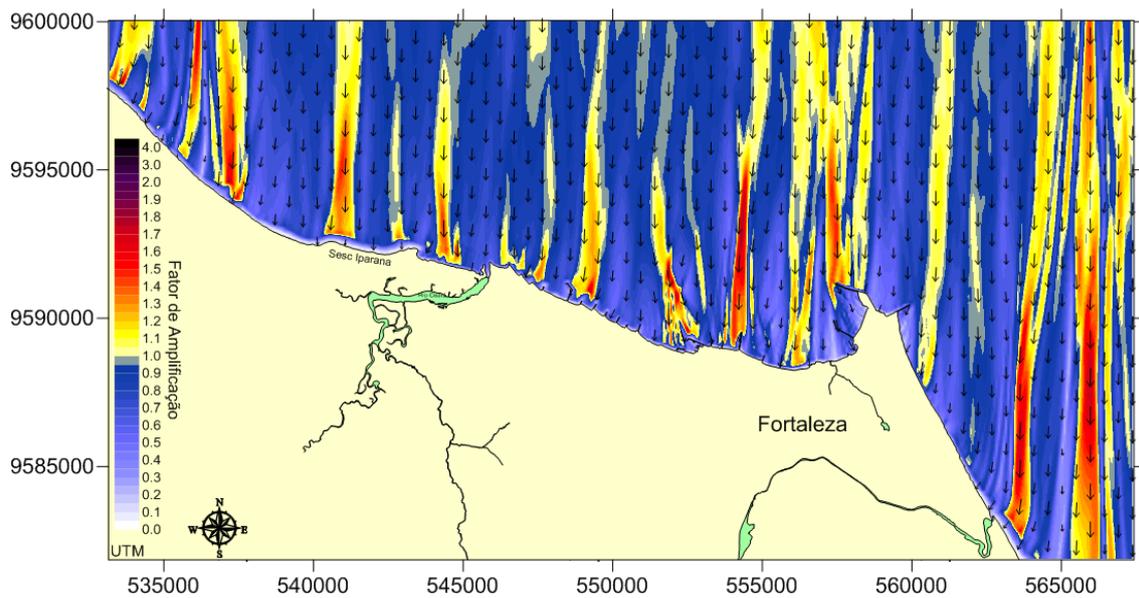


Figura 26 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 0° e período 6 segundos.

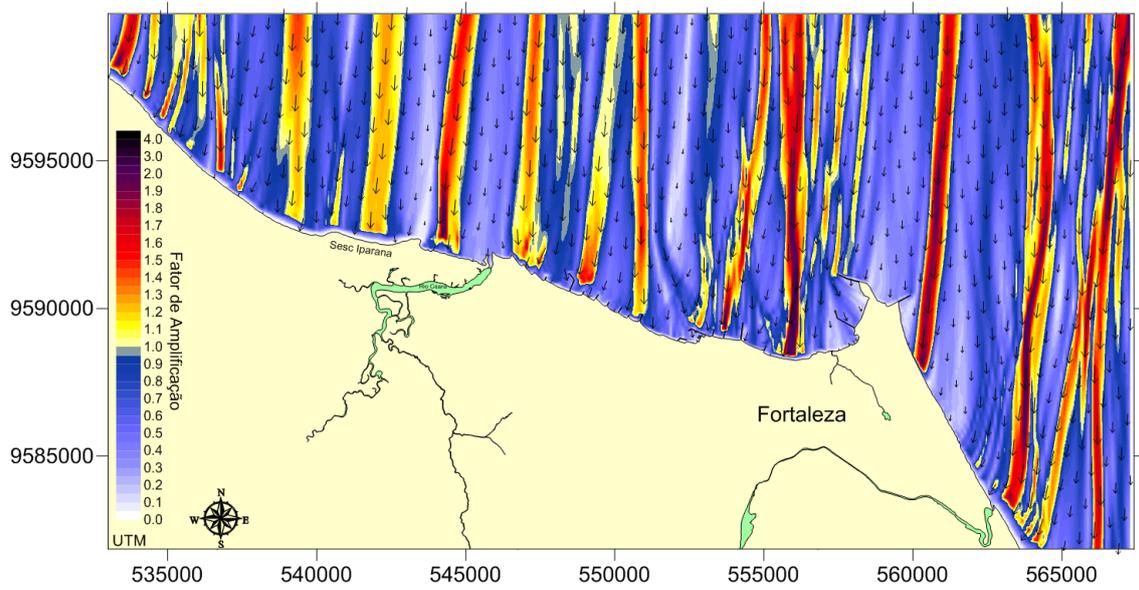


Figura 27 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 0° e período 7 segundos.

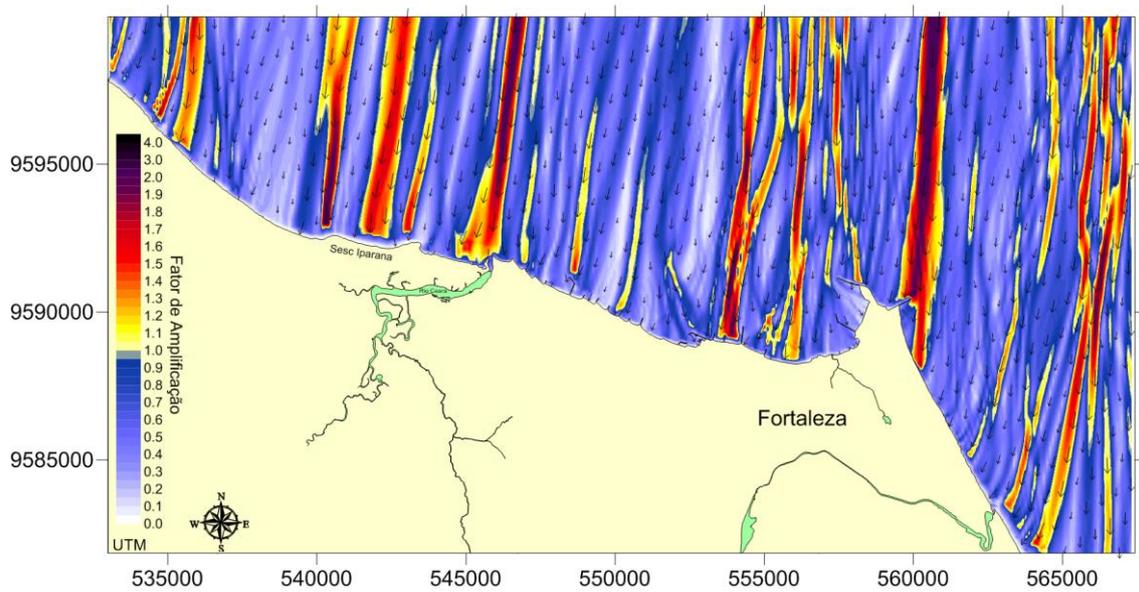


Figura 28 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 0° e período 9 segundos.

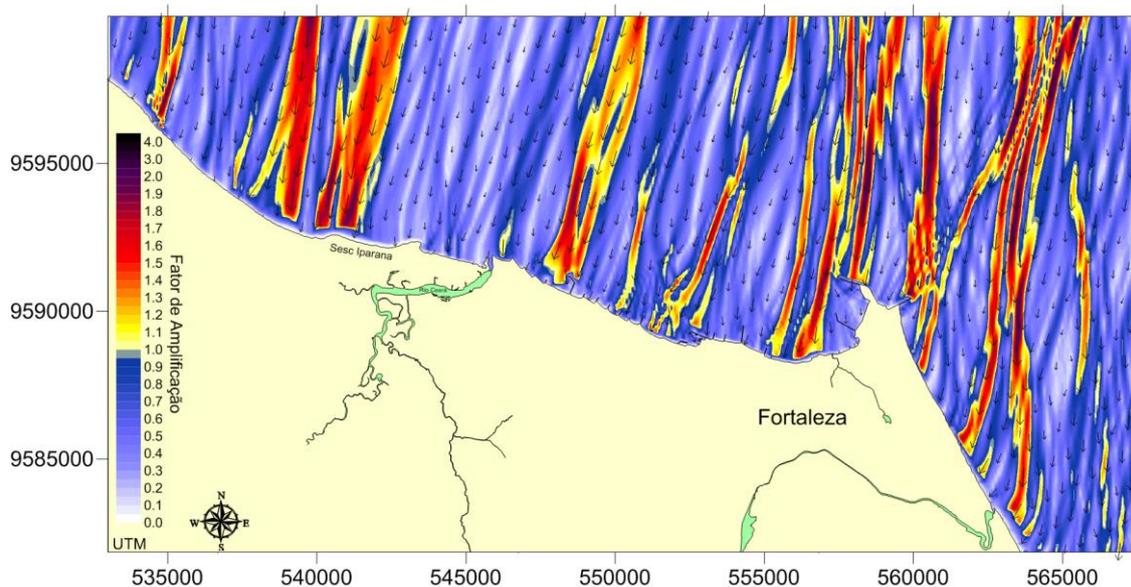


Figura 29 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 0° e período 12 segundos.

4.7.2 Fatores de Amplificação para Ondas vindas do Quadrante Nordeste

As ondas com azimute 45° atingem a costa com os maiores valores de fatores de amplificação observados no estudo. Pode-se perceber que todos os períodos com essa direção chegam com intensidade na região de interesse. As Figuras 30, Figura 31 e 32 mostram os principais resultados obtidos com o modelo de propagação de ondas. Os demais resultados estão disponíveis no Anexo A.

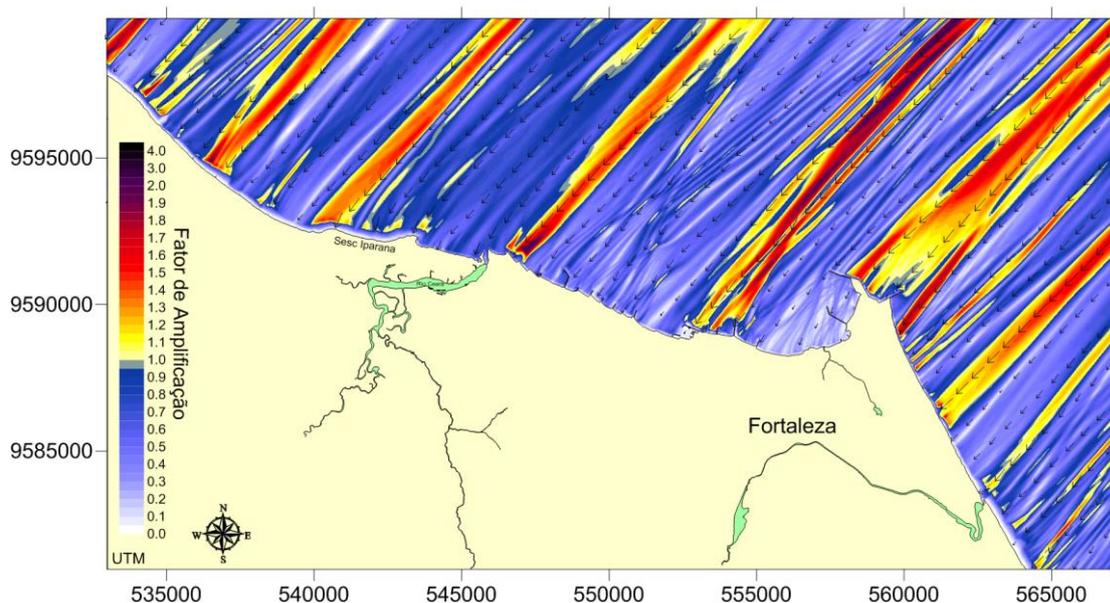


Figura 30 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 45° e período 7 segundos.

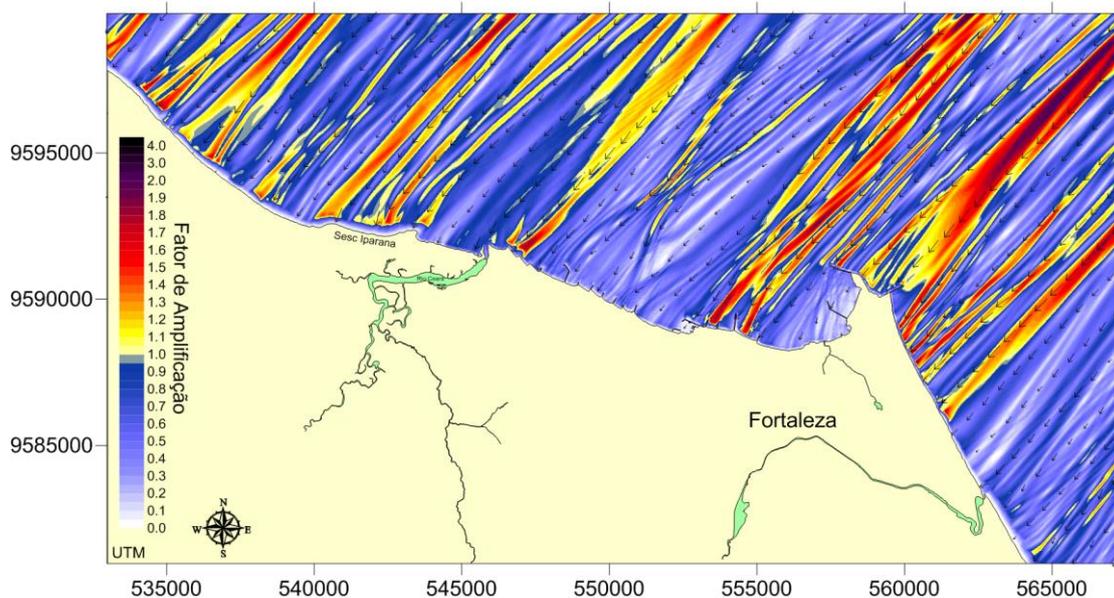


Figura 31 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 45° e período 8 segundos.

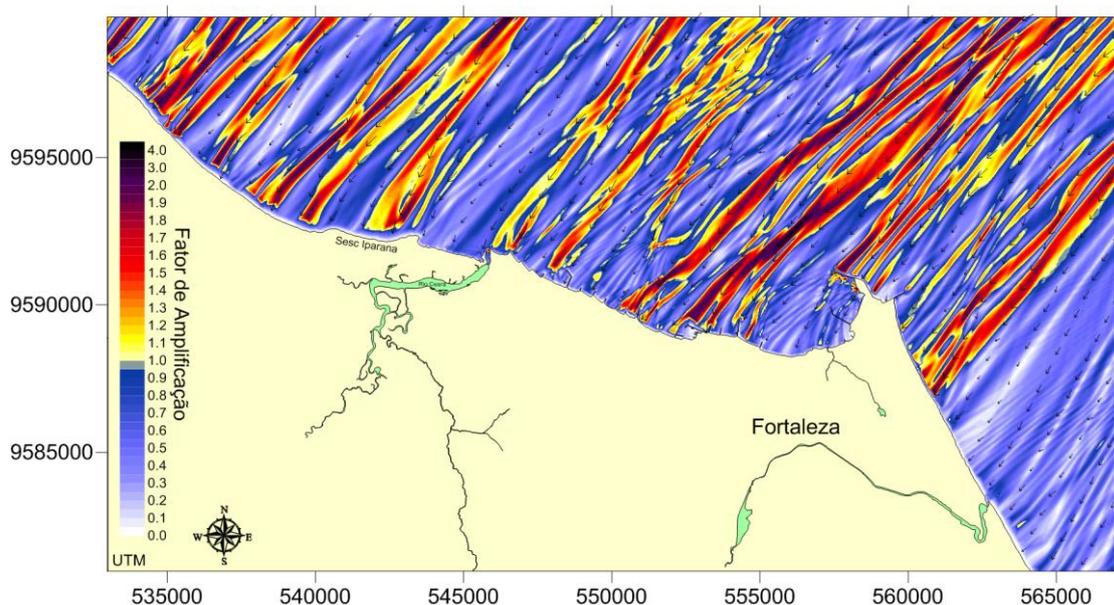


Figura 32 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 45° e período 13 segundos.

4.7.3 Fatores de Amplificação para Ondas vindas do Quadrante Leste

Abaixo são apresentados os mapas de distribuição de fatores de amplificação em toda a área modelada para ondas de azimutes 67,5 e 90°. Os principais resultados obtidos com o modelo de propagação de ondas foram apresentados nas Figuras 33, 34, 35, 36, 37 e 38. Os demais resultados estão disponíveis no Anexo A.

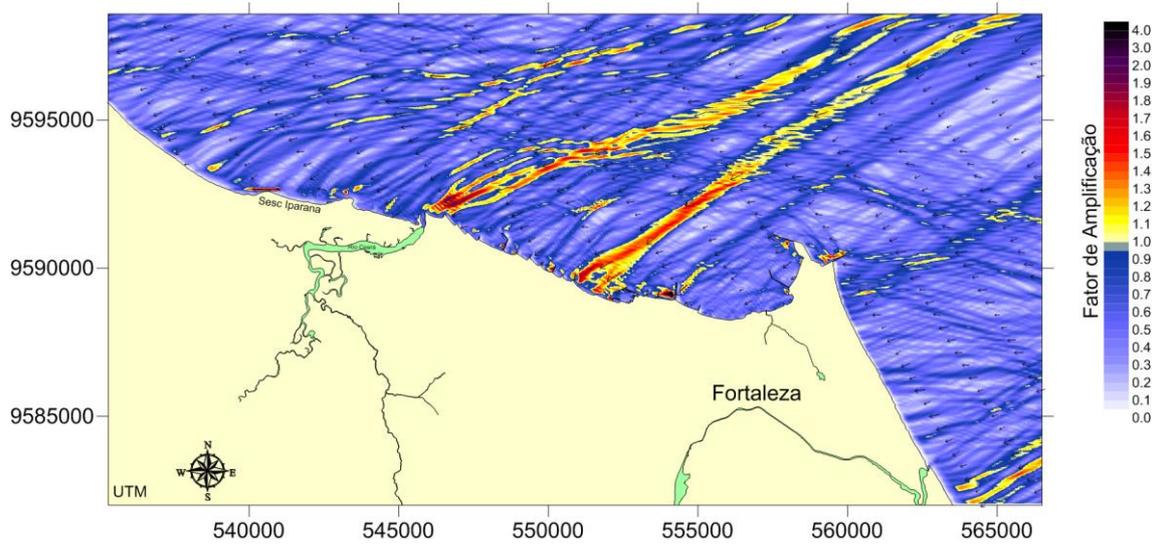


Figura 33 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 67,5° e período 11 segundos.

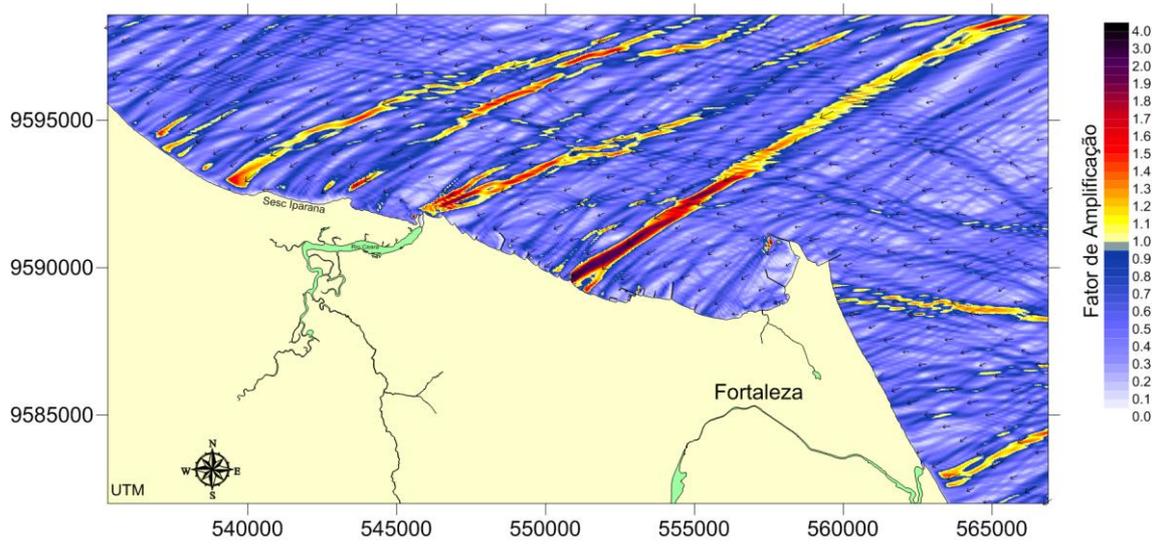


Figura 34 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 67,5° e período 12 segundos.

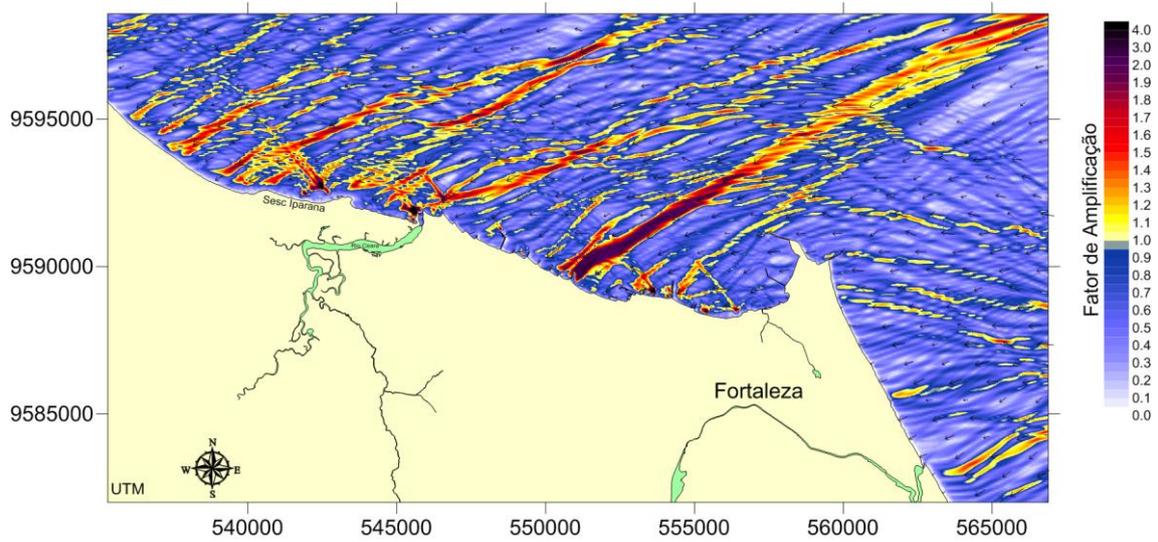


Figura 35 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute $67,5^\circ$ e período 13 segundos.

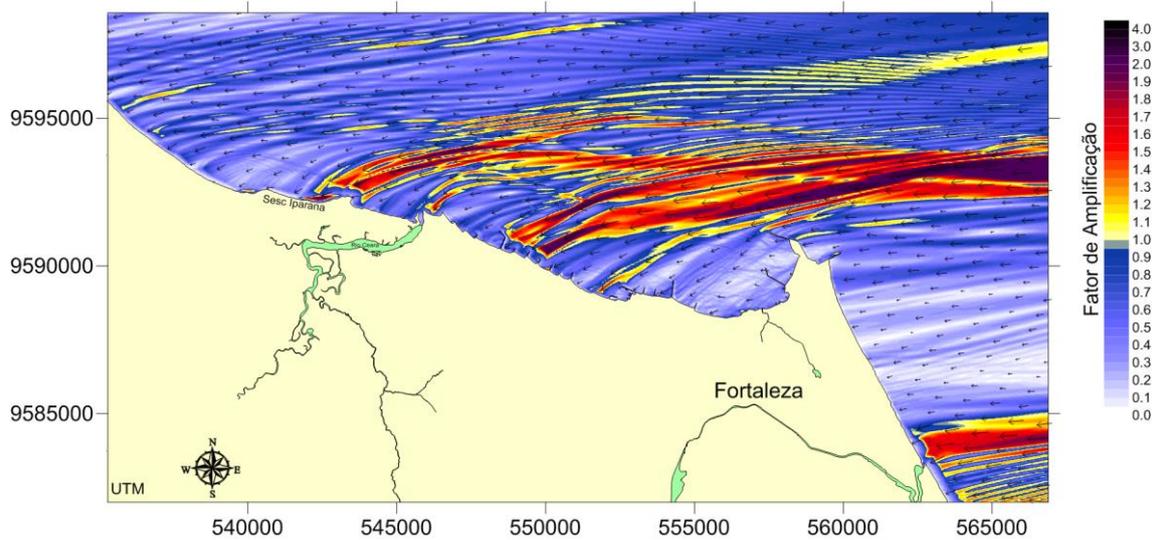


Figura 36 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 90° e período 6 segundos.

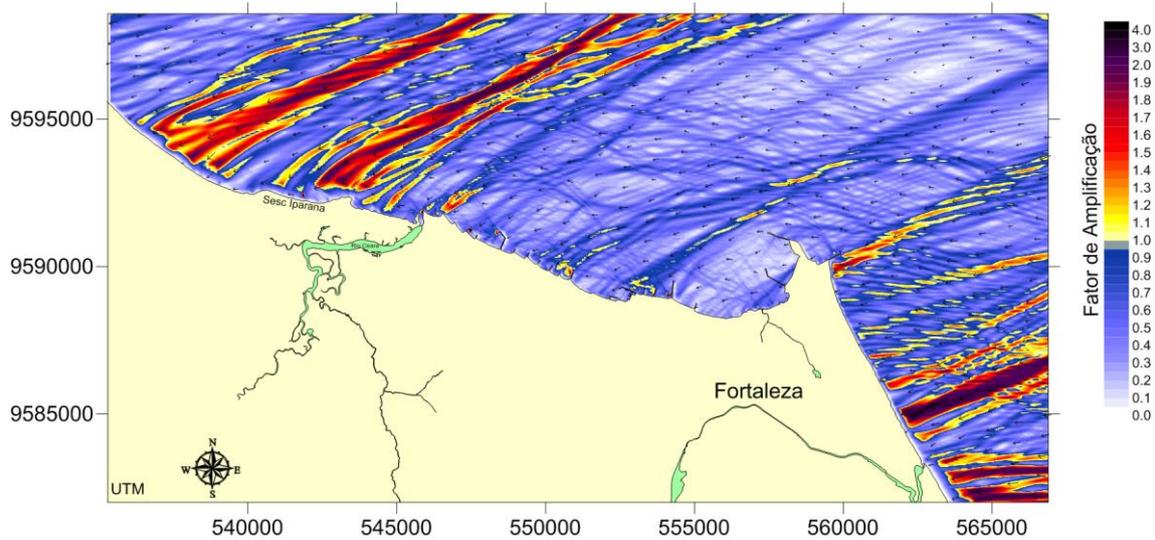


Figura 37 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 90° e período 11 segundos.

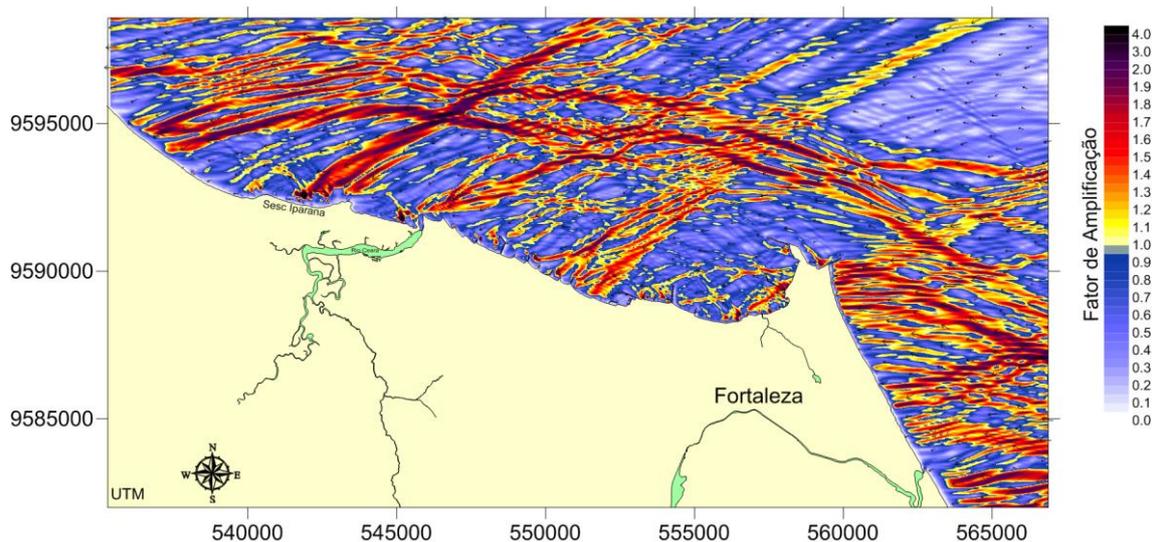


Figura 38 Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 90° e período 13 segundos.

4.8 Análise dos Resultados do Modelo de Propagação de Ondas

Para que uma análise dos resultados obtidos com modelagem pudesse ser feita, foi concebida a Tabela 9, que apresenta as características das ondas mais relevantes na área, com os seus respectivos fatores de amplificação, além do cálculo do fator de amplificação médio dos principais quadrantes sobre as áreas de interesse. Na tabela estão descritas como Área 1 (centro) e Área 2 (leste) as regiões no mar idealizadas para o assentamento das estruturas, como visto na Figura 24.

N	Azimute (°)	T (s)	FA (Área 1)	FA (Área 2)	FA médio
1	337.5	6	0.04	0.05	0.69
2	337.5	7	0.07	0.06	
3	337.5	8	0.14	0.18	
4	337.5	9	0.70	0.55	
5	337.5	10	1.70	0.40	
6	337.5	11	0.80	0.90	
7	337.5	12	0.90	0.80	
8	337.5	13	0.70	1.02	
9	0	6	1.00	1.25	
10	0	7	1.20	1.75	
11	0	8	0.90	1.45	
12	0	9	1.60	1.40	
13	0	10	1.10	1.50	
14	0	11	1.00	0.80	
15	0	12	1.50	0.50	
16	0	13	1.30	1.20	
17	22.5	6	0.05	0.13	0.89
18	22.5	7	0.10	0.20	
19	22.5	8	0.15	0.25	
20	22.5	9	0.25	0.26	
21	22.5	10	0.35	0.20	
22	22.5	11	0.50	0.35	
23	22.5	12	0.55	0.45	
24	22.5	13	0.50	0.55	
25	45	6	1.20	1.08	1.09
26	45	7	1.45	1.00	
27	45	8	1.40	1.40	
28	45	9	1.80	1.15	
29	45	10	1.80	1.80	
30	45	11	1.65	1.35	
31	45	12	1.00	1.76	
32	45	13	1.00	1.61	
33	67.5	6	0.45	0.95	1.09
34	67.5	7	0.80	0.80	
35	67.5	8	0.70	0.95	
36	67.5	9	0.75	0.70	
37	67.5	10	0.90	0.60	
38	67.5	11	1.00	0.75	
39	67.5	12	1.35	1.05	

40	67.5	13	2.00	1.50
41	90	6	0.95	1.20
42	90	7	0.75	0.55
43	90	8	0.80	0.88
44	90	9	0.75	0.95
45	90	10	0.75	1.05
46	90	11	1.25	1.95
47	90	12	1.85	1.80
48	90	13	2.15	2.00

Tabela 9 Tabela contendo os principais azimutes e períodos considerados com seus respectivos Fatores de Amplificação para cada área, além do Fator de Amplificação Médio para cada um dos três quadrantes em questão.

As direções mais frequentes que incidem na região de interesse e que mais nos interessam são provenientes dos quadrantes Norte (N), Nordeste (NE) e Leste (E), com respectivamente 63%, 23% e 14%. Considerando que as principais direções são das ondas vindouras dos quadrantes Norte e Nordeste, temos que as do quadrante nordeste têm o maior fator de amplificação médio, com valor próximo a 0.89, enquanto aquelas provenientes do quadrante norte possuem valor de aproximadamente 0.69.

Na Tabela 10 e demais tabelas, foram dispostas as alturas significativas médias das ondas em águas rasas, calculadas a partir do produto do valor médio das faixas de alturas pelo fator de amplificação médio de cada direção principal.

Para os cálculos das alturas máximas multiplicou-se a altura média da maior faixa de alturas aferidas em águas profundas pelo fator de amplificação máximo observado nos resultados das modelagens.

H_s (águas profundas)		H_s (águas rasas)	Ocorr.	FA	
Classe	Média			0.69	
0.5 ~ 1.0	0.75	0.5175	0.20%		
1.0 ~ 1.5	1.25	0.8625	4.90%		
1.5 ~ 2.0	1.75	1.2075	19.00%		
2.0 ~ 2.5	2.25	1.5525	8.00%		
2.5 ~ 3.0	2.75	1.8975	0.90%	FA máx.	H_s máx.
3.0 ~ 3.5	3.25	2.2425	0.03%	1.75	5.6875

Tabela 10 Tabela contendo as alturas significativas e percentuais de ocorrência das ondas de norte em águas rasas.

H _s (águas profundas)		H _s (águas rasas)	Ocorr.	FA	
Classe	Média			0.89	
0.5 ~ 1.0	0.75	0.6675	0.10%		
1.0 ~ 1.5	1.25	1.1125	5.20%		
1.5 ~ 2.0	1.75	1.5575	5.80%		
2.0 ~ 2.5	2.25	2.0025	1.10%	FA máx.	H _s máx.
2.5 ~ 3.0	2.75	2.4475	0.01%	1.8	4.95
3.0 ~ 3.5	3.25	2.8925	0.00%		

Tabela 11 Tabela contendo as alturas significativas e percentuais de ocorrência das ondas de nordeste em águas rasas.

H _s (águas profundas)		H _s (águas rasas)	Ocorr.	FA	
Classe	Média			1.09	
0.5 ~ 1.0	0.75	0.8175	0.04%		
1.0 ~ 1.5	1.25	1.3625	3.00%		
1.5 ~ 2.0	1.75	1.9075	4.00%		
2.0 ~ 2.5	2.25	2.4525	0.60%	FA máx.	H _s máx.
2.5 ~ 3.0	2.75	2.9975	0.01%	2.15	5.9125
3.0 ~ 3.5	3.25	3.5425	0.00%		

Tabela 12 Tabela contendo as alturas significativas e percentuais de ocorrência das ondas de leste em águas rasas.

De maneira geral, a maior altura significativa encontrada é de 5,9 metros, proveniente do quadrante leste, o qual tem uma taxa de ocorrência de 0,01%. Considerando os dados obtidos do modelo WWIII, esta altura é característica da pior onda que pode atingir a região estudada,. Considerando um índice de arrebentação igual a 0,78, tem-se que a profundidade mínima que o conjunto de lentes deve estar é a 8 metros de profundidade.

Para ondas provenientes do quadrante norte (mais frequente na região) a maior onda que incide sobre aquela parte da costa, possui altura significativa de aproximadamente 5,7 metros a uma taxa de ocorrência de 0,03%.

Nas figuras abaixo foram destacados os principais pontos nos quais há uma maior focalização de energia, para as diversas direções de ondas simuladas. Observa-se que existe uma distribuição equilibrada ao longo da faixa da costa em estudo, a qual fica evidenciada pela presença dos pontos coloridos. Cada cor está relacionada a uma direção. Desta forma é possível observar que as ondas que mais impactam a costa naquele

ponto, são aquelas com azimutes 0° , 45° , $67,5^\circ$ e 90° . É importante notar, que essa distribuição de energia nessa região ocorre devido à refração que a onda sofre por conta da batimetria característica.

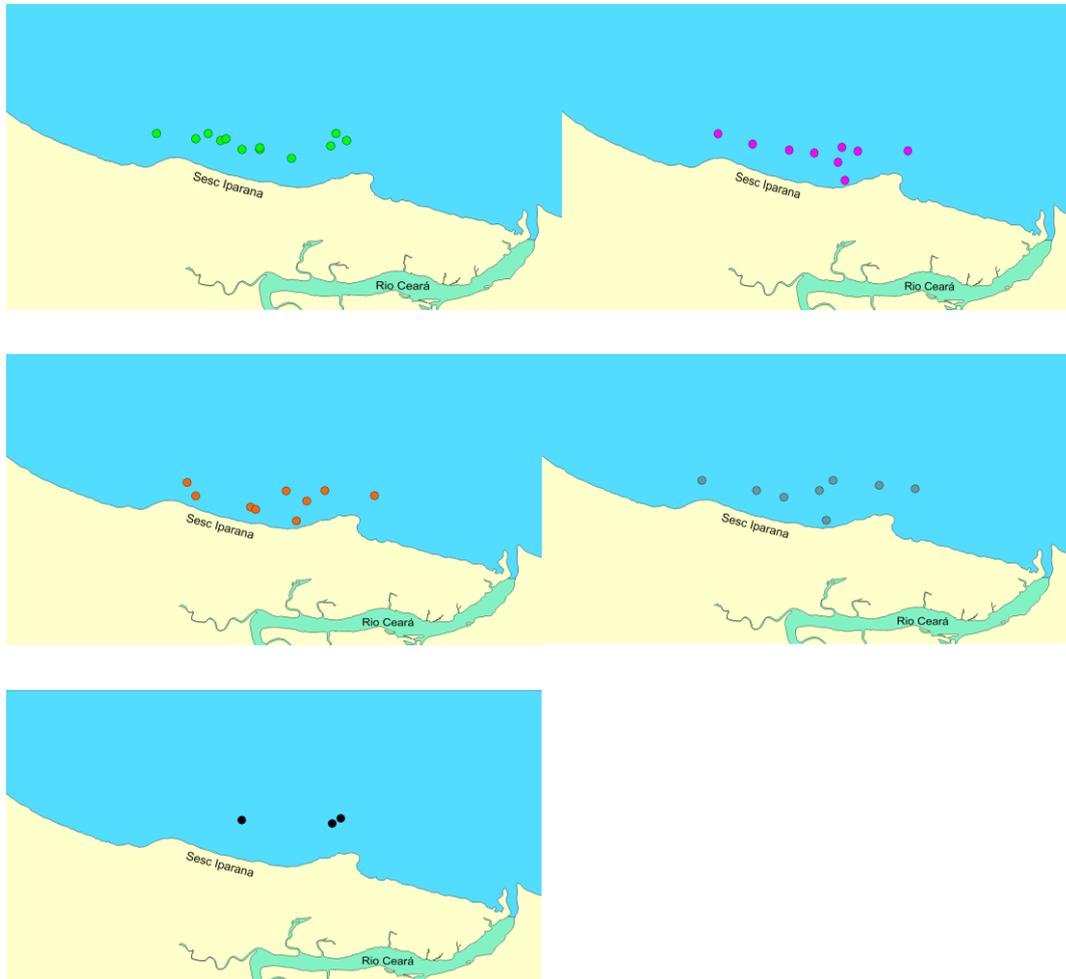


Figura 39 Pontos de maior concentração de energia na linha de costa para os quatro períodos simulados para cada direção 0° ENE (verde), 45° E (roxo), $67,5^\circ$ (laranja), e 90° (cinza), $337,5^\circ$ (preto).

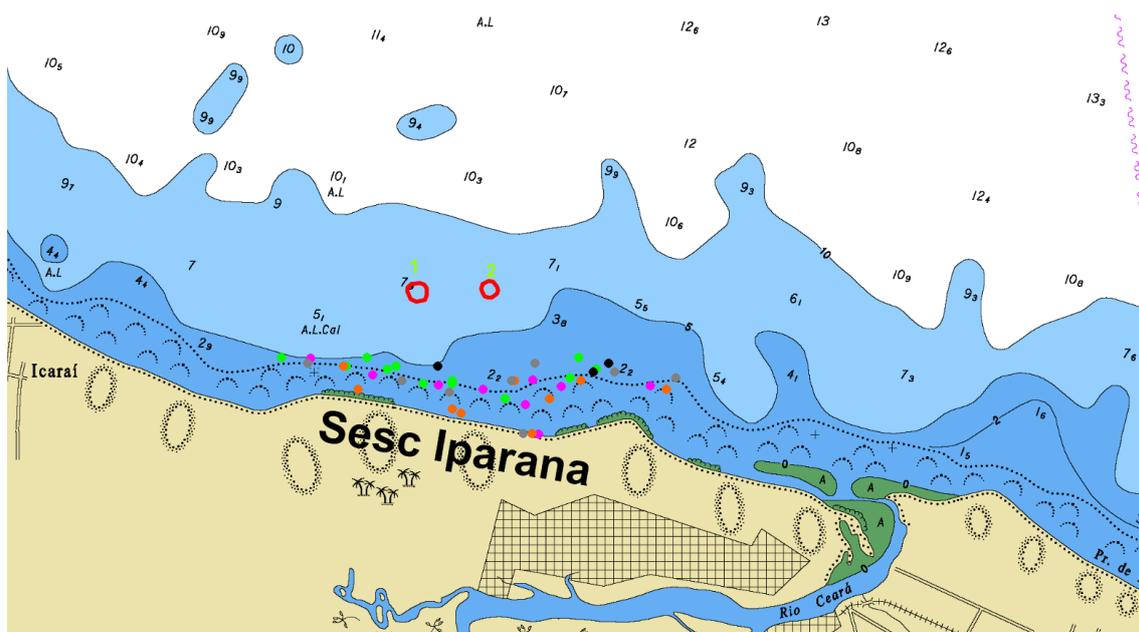


Figura 40 Carta Náutica com representação dos pontos de maior energia das ondas mais relevantes, bem como a posição das duas áreas estudadas.

4.9 Conclusão

O estudo dos resultados mostra que ambas as regiões (Áreas 1 e 2) possuem uma boa localização, uma vez que são alvos de grande parte das ondas que atingem aquela região. A facilidade de assentamento devido a pouca irregularidade do leito confere, também, uma vantagem geomorfológica dessas localidades, mesmo que de forma preliminar.

A principal diferença entre esses dois pontos de maior interesse, reside no fato que a Área 1 (centro) recebe com maior intensidade as ondas vindas do quadrante norte e a Área 2 (leste) recebe preponderantemente ondas vindouras do quadrante leste.

Outra análise que deve ser feita é com relação à distribuição de energia ao longo da costa, que ocorre de forma semelhante. Assim sendo, essa análise não nos fornece informação suficiente para a escolha do local ideal destinado ao assentamento do conjunto de estruturas.

As médias dos fatores de amplificação das duas Áreas são aproximadamente iguais a 0,95, portanto este parâmetro também não é ideal para a escolha de uma melhor localidade. Desta forma, a escolha do lugar deve ser feita em função da taxa de ocorrência das ondas mais incidentes sobre as duas áreas.

A Tabela 13 fornece informação sobre os quadrantes mais relevantes, apresentando a frequência de ocorrência das ondas com essas direções e seus respectivos fatores de amplificação.

Quadrante	Azimutes (°)	Frequência	FA médio
Norte	337.5-22.5	63%	0.69
Nordeste	22.5-67.5	23%	0.89
Leste	67.5-90	14%	1.09

Tabela 13 Tabela com a frequência de ocorrência de ondas vindouras dos principais quadrantes em questão.

Como o esperado, as ondas provenientes do quadrante norte representam a maioria da série medida, conferindo, desta forma, uma maior importância à Área 1 (centro), uma vez que esta é atingida majoritariamente por ondas com essas direções.

Outro fator extremamente importante para a escolha da melhor área para instalação do grupo de estruturas, diz respeito ao fato de que um dos objetivos do projeto é a surfabilidade das ondas a serem “produzidas”. Deste modo, as ondas vindas do quadrante norte são mais interessantes por propiciarem melhores condições à prática desta modalidade, uma vez que incidem frontalmente sobre costa.

Para que o local sugerido possa ser confirmado, recomenda-se um levantamento geomorfológico e sedimentológico mais adequado, de modo que os grãos da região sejam devidamente estudados.

5. Metodologia para a concepção da estrutura de Amplificação de Ondas

O arrecife artificial proposto tem por objetivo amplificar a altura das ondas que mais incidem naquela região da costa do Sesc, afim de aumentar a energia das ondas e deste modo propiciar condições para geração de energia elétrica pelo módulo responsável por esta função, que neste trabalho é chamado de UGE (Unidade Geradora de Energia).

Levando em conta os componentes estruturais deste módulo, a respectiva UGE deve ser instalada fora da zona de arrebentação de ondas. O local exato para instalação desta unidade tem por base resultados previamente obtidos, os quais mostraram que a onda com maior altura é proveniente do quadrante leste, com valor máximo de aproximadamente seis metros, conforme pode ser observado na Tabela 12. Tendo em vista um índice de arrebentação médio de praias arenosas (igual a 0,78), esta onda extrema arrebenta em uma profundidade em torno de oito metros.

Para que o efeito do arrecife pudesse ser mensurado e avaliado foi feito um novo estudo de modelagem hidrodinâmica. Desta forma, o efeito desejado pode ser visualizado e validado.

Com este intuito, (Aguiar, 2012) desenvolveu um estudo para a escolha da melhor geometria para um arrecife artificial para amplificação de energia das ondas, bem como a melhor configuração do conjunto. Naquele estudo, duas concepções foram consideradas, ambas partindo do pressuposto que a UGE seria alocada sobre uma superfície a oito metros de profundidade, em relação ao zero hidrográfico (média das baixa-mares de sizígia). Na primeira, a UGE é alocada sobre o arrecife, na segunda, a UGE é instalada diretamente sobre o leito marinho, portanto, separado do arrecife. A restrição adotada era que ambas as estruturas fossem instaladas sobre o leito a, no mínimo, oito metros de profundidade.

No presente estudo, o desempenho dos arrecifes foi avaliado tendo por base os resultados da simulação do modelo de propagação de ondas rodado para uma determinada onda, chamada de Onda Paramétrica, a qual fora definida como sendo aquela mais frequente na região, com uma altura unitária. Para chegar nessa onda foram feitos cálculos probabilísticos descritos no capítulo anterior.

Em relação à direção de propagação, temos que as ondas que mais incidem naquela faixa da costa cearense, são aquelas provenientes dos quadrantes norte e nordeste, que somam aproximadamente 86% das ondas que chegam à costa em questão e 45% de todas as medições feitas pelo modelo WaveWatchIII®. A faixa de período de 5 a 8 segundos soma aproximadamente 51% do total, sendo assim a mais frequente.

Com base nos estudos feitos para a determinação da Onda Paramétrica, constatou-se que, para a concepção de tais estruturas, ela é aquela com um período de 6 segundos e com azimute 0°, uma vez que segundo os dados obtidos, essas são as características das ondas mais frequentes na região escolhida.

A Tabela 14 mostra os parâmetros da Onda Paramétrica para a construção do módulo de amplificação.

Azimute (°)	Período (s)	Altura (m)	NM (m)
0	6	1,0	1,6

Tabela 14 Tabela com os parâmetros da Onda Paramétrica.

5.1 Concepção da Estrutura de Amplificação de Energia

Para a concepção de uma estrutura de amplificação de altura de ondas foi utilizado o modelo de propagação de ondas, deste modo o fenômeno pode ser observado, mensurado e avaliado.

A concepção da estrutura de amplificação de energia com melhor configuração geométrica baseou-se nos resultados encontrados por (Aguiar, 2012), como pode ser visualizado na Figura 41.

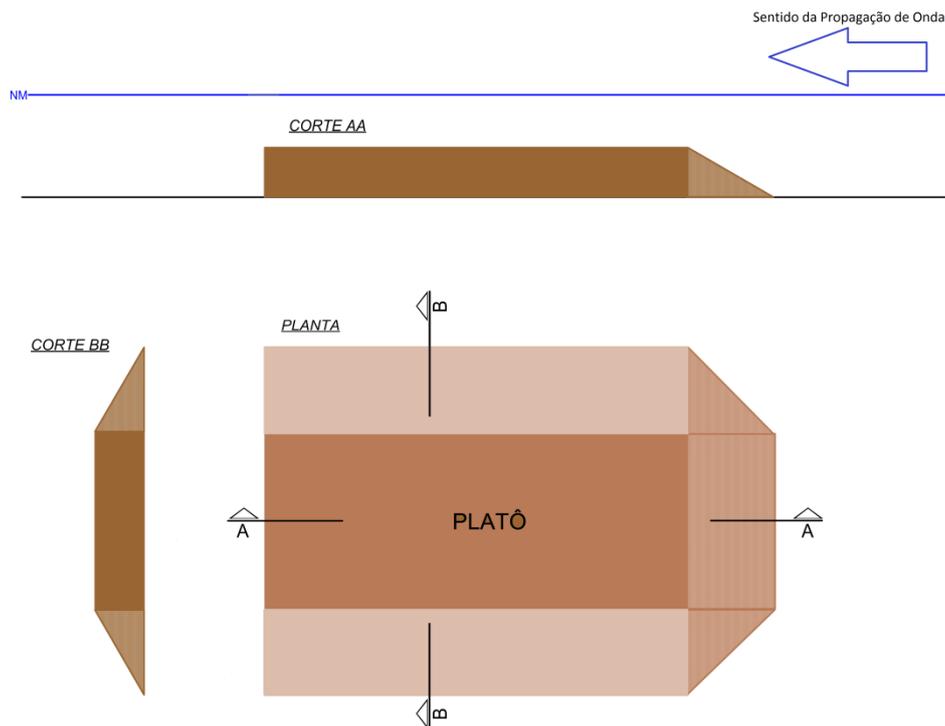


Figura 41 Vista superior e cortes transversais da lente de amplificação de energia.

Devido a algumas facilidades estruturais e construtivas para o arrecife, o referido estudo determinou que a melhor geometria para a amplificação de altura da onda é aquela com geometria retangular, com aproximadamente, 60 metros de comprimento por 40 de largura e 3,5 de altura. Observou-se que o arrecife com essas características fornece a máxima amplificação na posição da Unidade Geradora de Energia (UGE). Neste conjunto, a UGE é assentada à sotamar da estrutura de amplificação, distante aproximadamente 10 metros da mesma. A unidade se encontra, também, a uma profundidade adequada (superior a 8 metros de profundidade), de modo que ela não sofre interferências da arrebentação das ondas mais extremas.

5.2 Metodologia para Modelagem Computacional da Região com a Estrutura Assentada

Para que uma simulação computacional do fenômeno pudesse ser feita, utilizou-se o modelo de ondas de forma acoplada, o qual, deste modo, usa resultados de modelos previamente rodados e os utiliza para novas simulações. Desta forma, pode-se obter um

maior detalhamento da área em questão e, assim, representar com maior nível de precisão o efeito provocado pelos arrecifes.

De modo a se ter uma noção maior do que acontece com outras ondas estatisticamente prováveis, variou-se em 10° o ângulo de incidência da onda, bem como o seu período. Deste modo, ondas com azimutes entre 350° e 10° , com períodos de 6 e 7 segundos foram modeladas e estudadas.

Vale ressaltar que se escolheu variar em somente 10° a onda de projeto, uma vez que, como visto na Tabela 9, ondas com azimutes 337.5° e 22.5° não são representativas, no sentido de não apresentarem um Fator de Amplificação tido como desejável (acima de 1,0).

Nesta etapa, uma nova região, representada em verde na Figura 42 foi considerada para o possível assentamento da lente de amplificação. Esta nova localidade se encontra a oeste da Área 1 (central), distante 620 metros, e foi levada em consideração nas simulações uma vez que apresentou grande quantidade de energia na propagação da Onda Paramétrica (6 segundos de período, altura unitária e azimute igual a 0°).

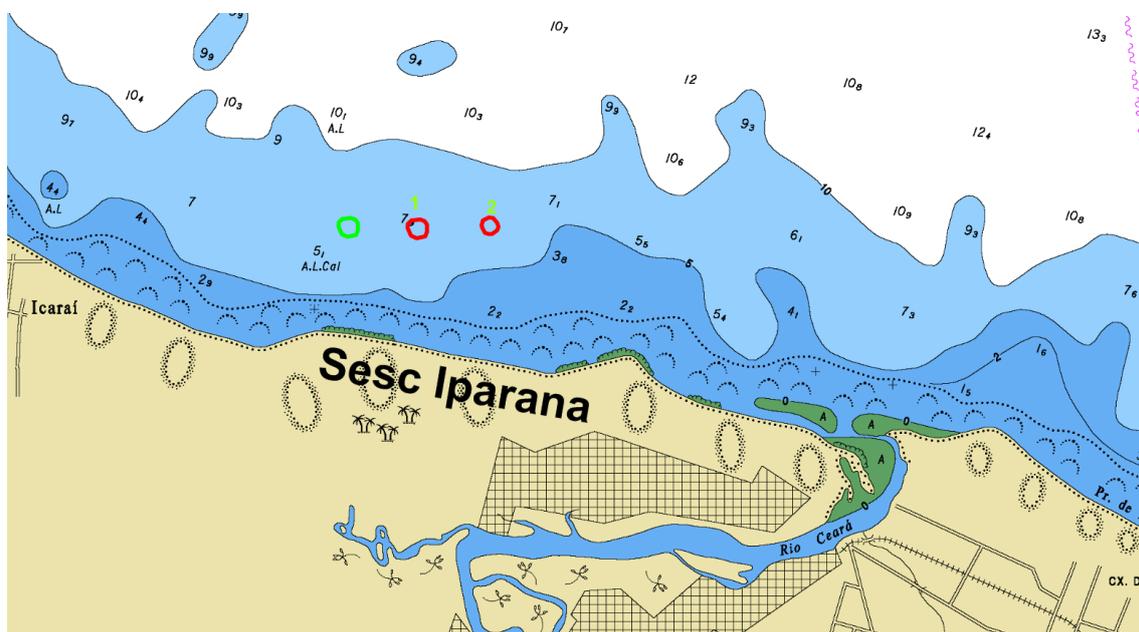


Figura 42 Representação da nova área estudada (em verde) para o assentamento da estrutura de amplificação de energia.

5.3 Grades de Propagação de Ondas para o quadrante Norte

Para que o maior grau de detalhamento e precisão fosse obtido acoplaram-se duas GPOs, de modo que a interna fosse capaz de ler os resultados obtidos na GPO externa e a utilizasse na propagação da mesma onda na região de interesse. Com uma menor Grade de Batimetria (GPO interna), é possível que um maior detalhamento da região possa ser alcançado. Os principais parâmetros determinantes dessas grades estão resumidos na tabela a seguir

GPO Norte	LTC-N (°)	Δ-LTC (m)	N° linhas	Δ-LIO (m)	N° linhas	Subdiv. LIO	Azimuthes (°)
Externa	180	60	2082	93	1377	20	350-10
Interna	180	6	799	5	2064	20	

Tabela 15 Tabela com os parâmetros determinante das Grades de Propagação de Ondas (intera e externa).

Uma representação das Grades de Propagação de Ondas utilizadas nesta etapa do trabalho na modelagem está disposta na Figura 43.

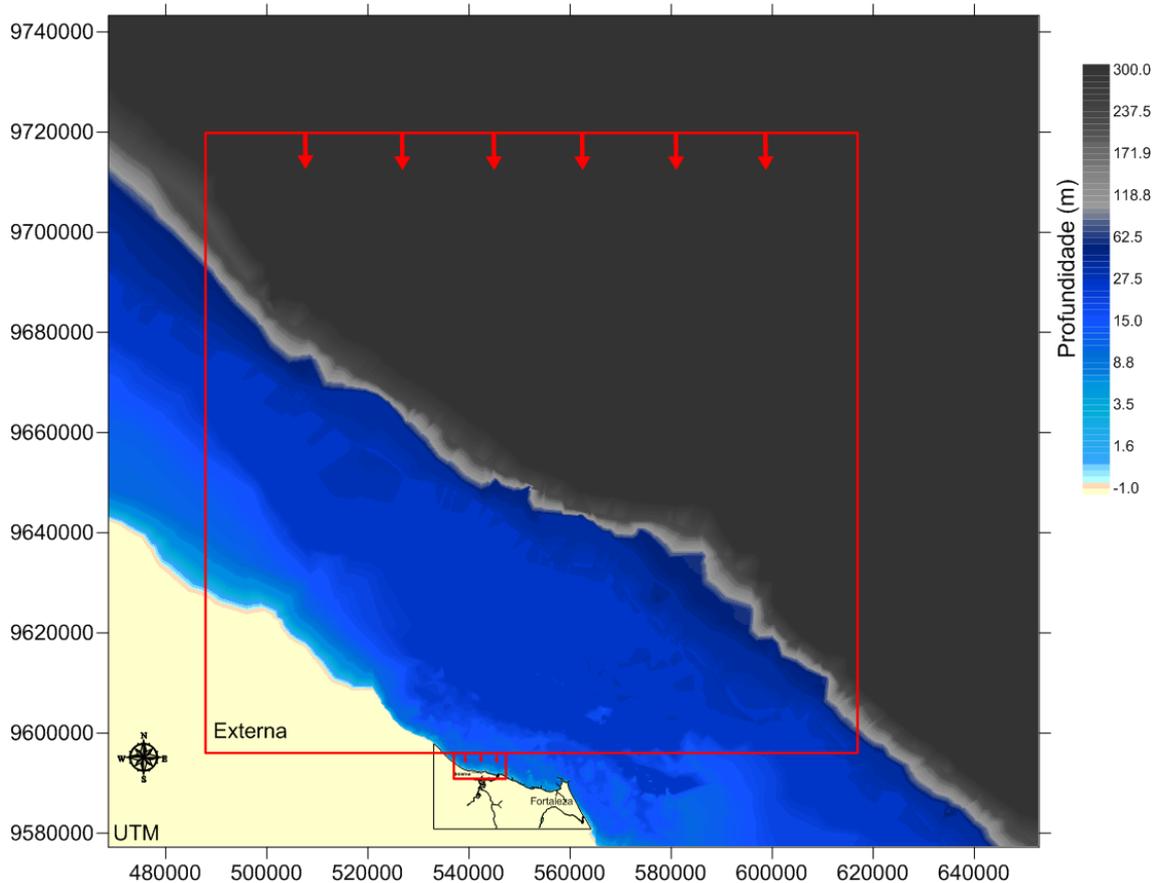


Figura 43 Mapa batimétrico com a representação das GPOs externa e interna acopladas.

5.4 Resultados da Propagação de Ondas com a instalação da Estrutura de Amplificação

Nos itens abaixo estão apresentados o efeito sentido pela onda com a instalação do referido arrecife.

5.4.1 Resultados das ondas com azimute 0° sobre as lentes do Centro e Oeste

Na primeira figura é apresentado o resultado obtido com a utilização das grades acopladas. Neste exemplo, é apresentado o resultado obtido para uma onda de período igual a 6 segundos com azimute 0° sobre uma estrutura de amplificação. O mesmo resultado é repetido de forma mais detalhada na sequência de figuras, as quais representam o efeito sofrido pela onda ao passar pela lente de amplificação central e pela mais a oeste.

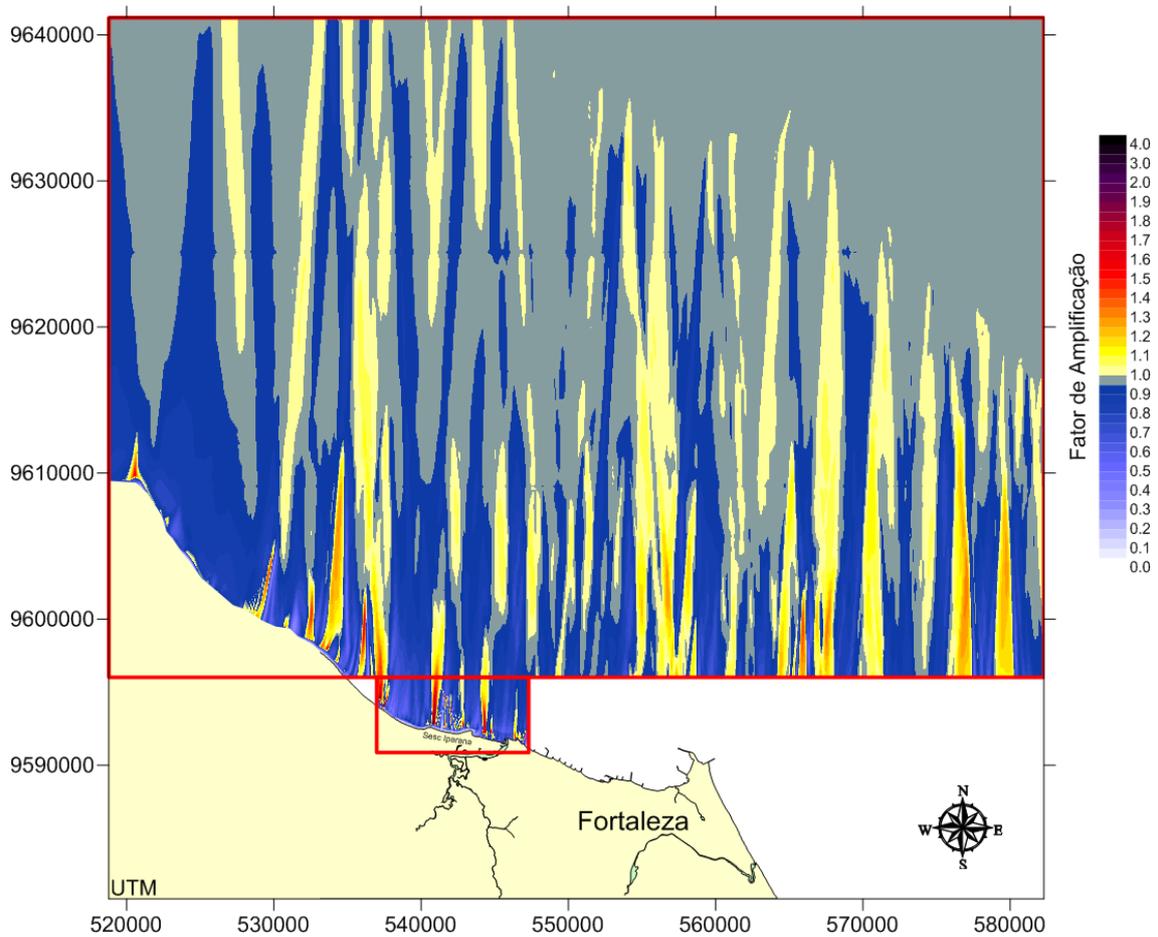


Figura 44 Mapa de Fator de Amplificação para a onda de azimute 0° (N) e período 6s nas Grades de Propagação de Ondas acopladas de Norte.

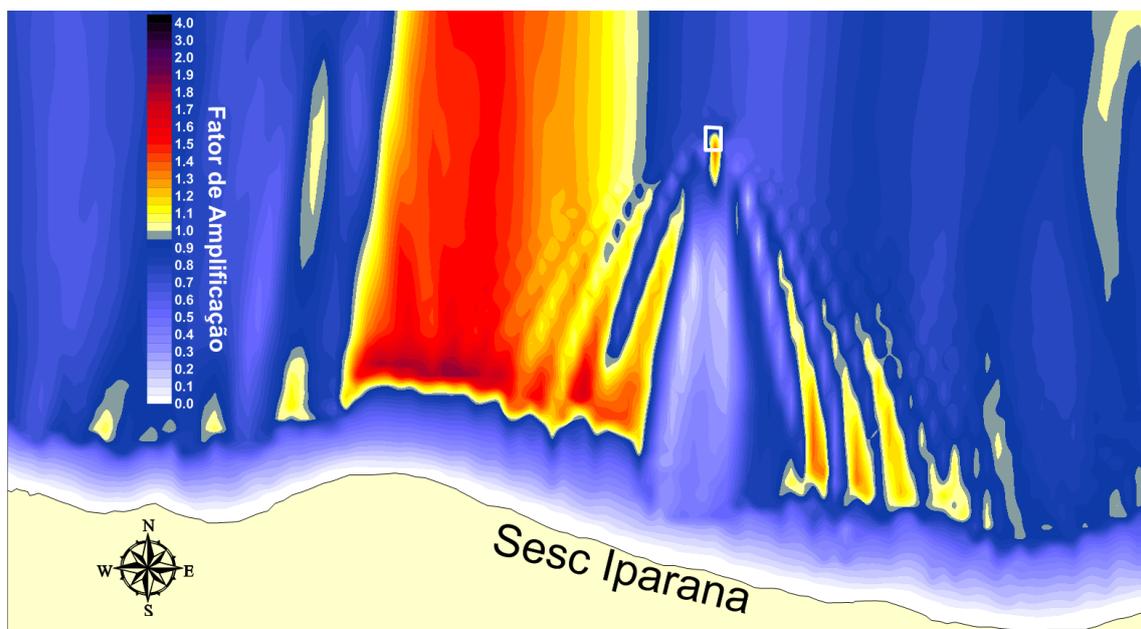


Figura 45 Fator de amplificação da onda com azimute 0° e período 6 segundos para a lente de amplificação central.

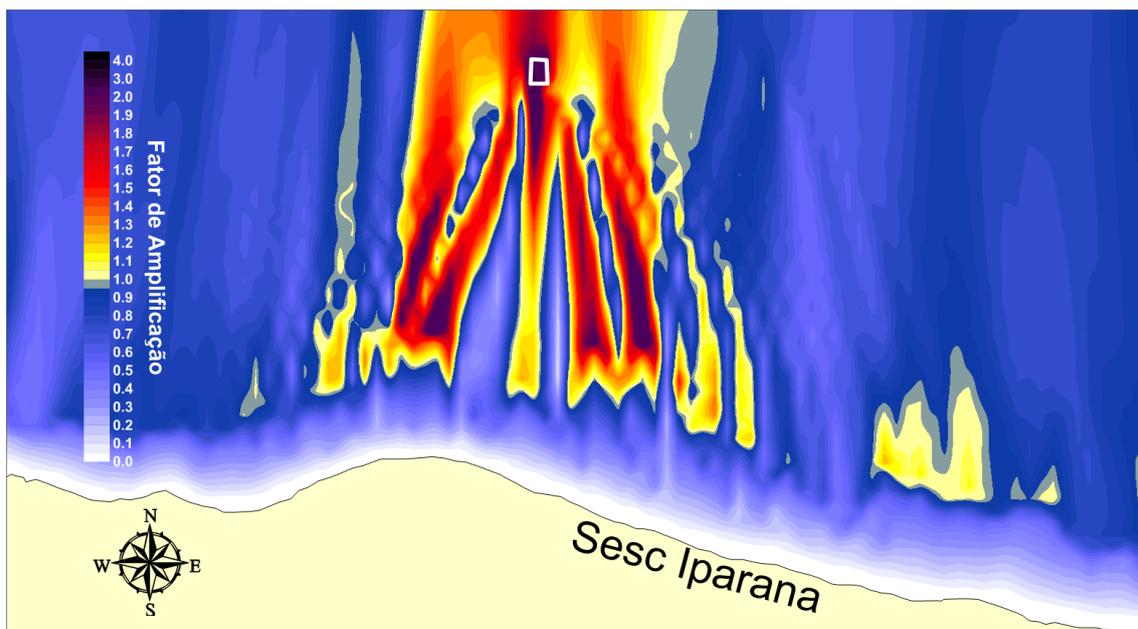


Figura 46 Fator de amplificação da onda com azimute 0° e período 6 segundos para lente de amplificação oeste.

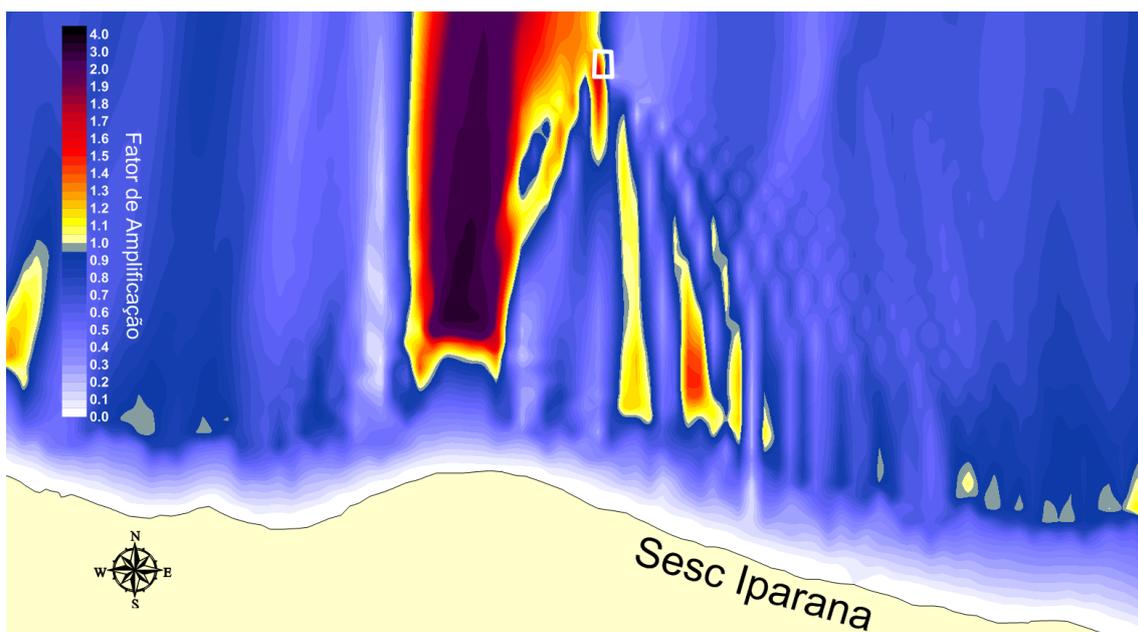


Figura 47 Fator de amplificação da onda com azimute 0° e período 7 segundos para lente de amplificação oeste.

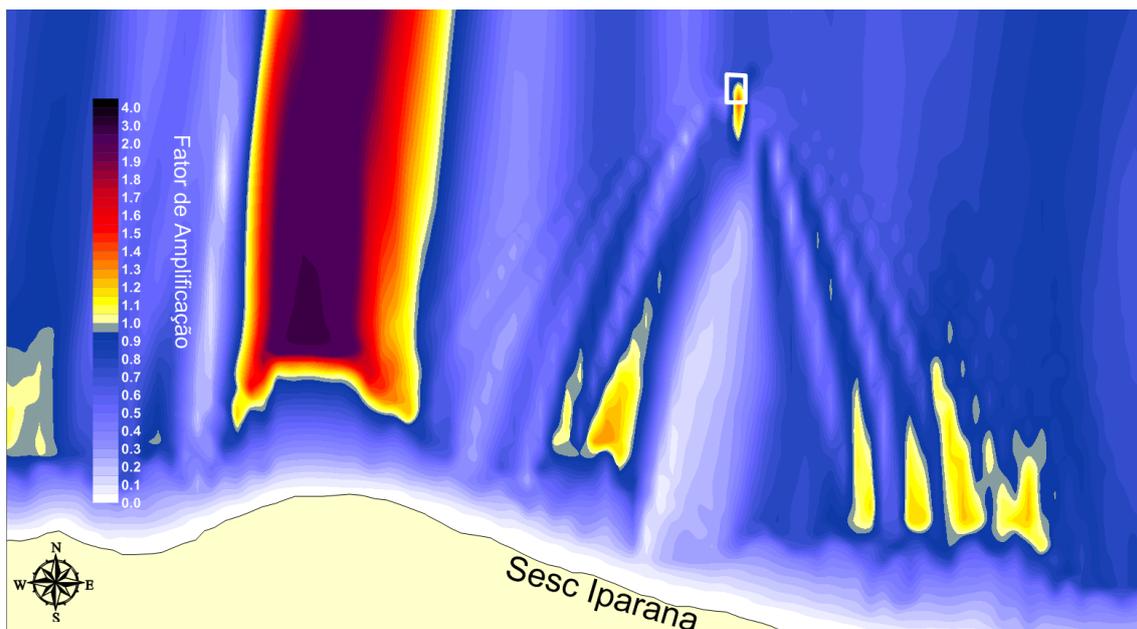


Figura 48 Fator de amplificação da onda com azimute 0° e período 7 segundos para lente de amplificação central.

5.4.2 Resultados das ondas com azimute 10° sobre as lentes do Centro e Oeste

Na primeira figura é apresentado o resultado obtido com a utilização das grades acopladas. Neste exemplo, é apresentado o resultado obtido para uma onda de período igual a 6 segundos com azimute 10° sobre uma estrutura de amplificação. O mesmo resultado é repetido de forma mais detalhada na sequência de figuras, as quais representam o efeito sofrido pela onda ao passar pela lente de amplificação central e oeste.

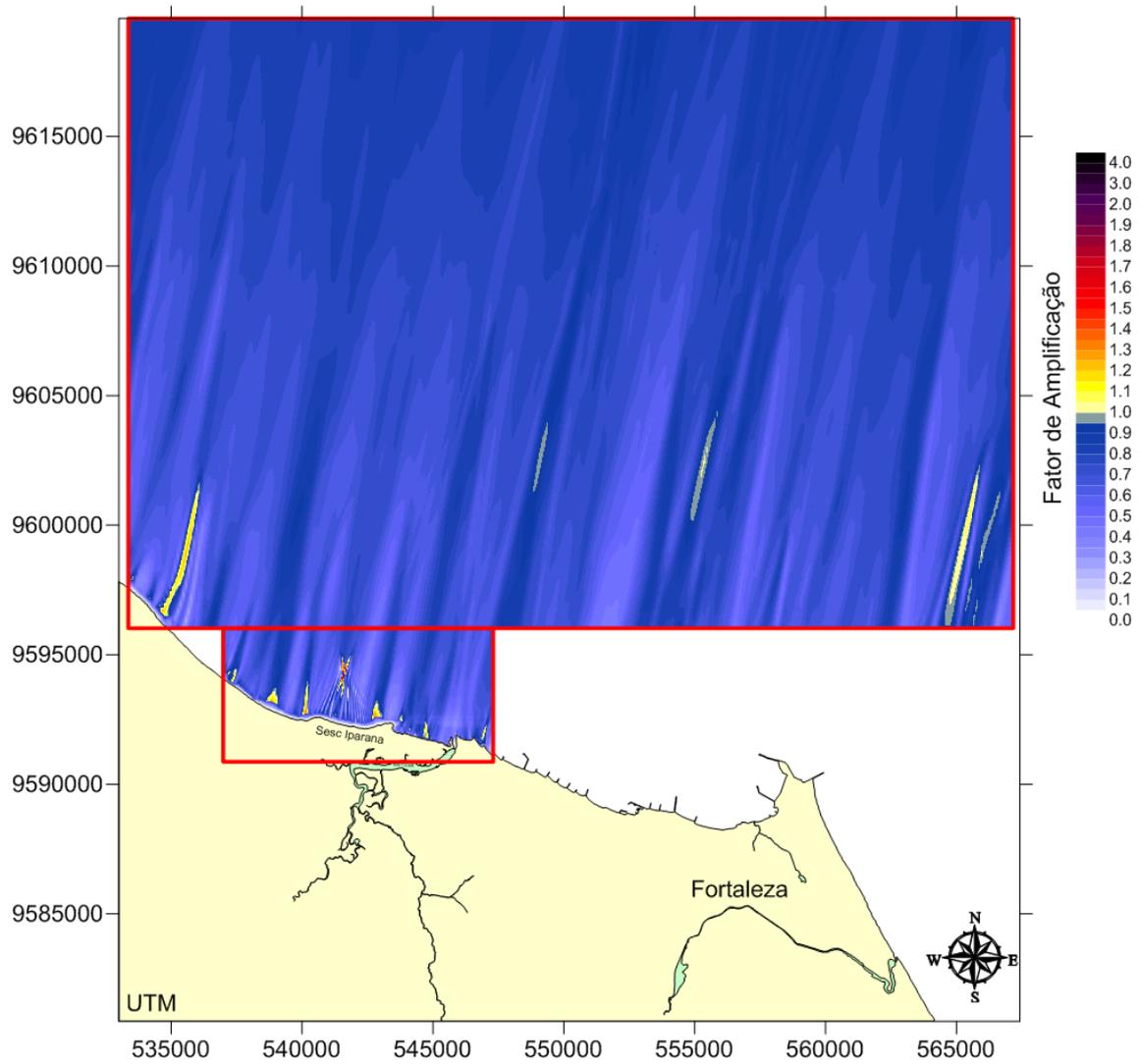


Figura 49 Mapa de Fator de Amplificação para a onda de azimute 10° (N) e período 6 segundos nas Grades de Propagação de Ondas acopladas de Norte.

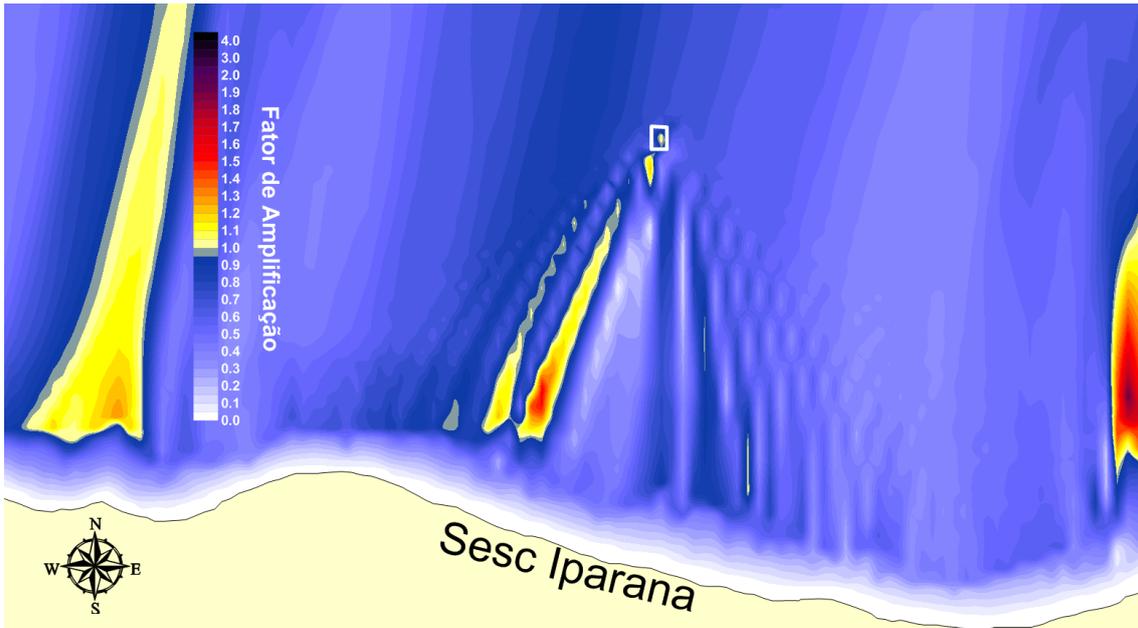


Figura 50 Fator de amplificação da onda com azimute 10° e período 6 segundos para lente de amplificação central.

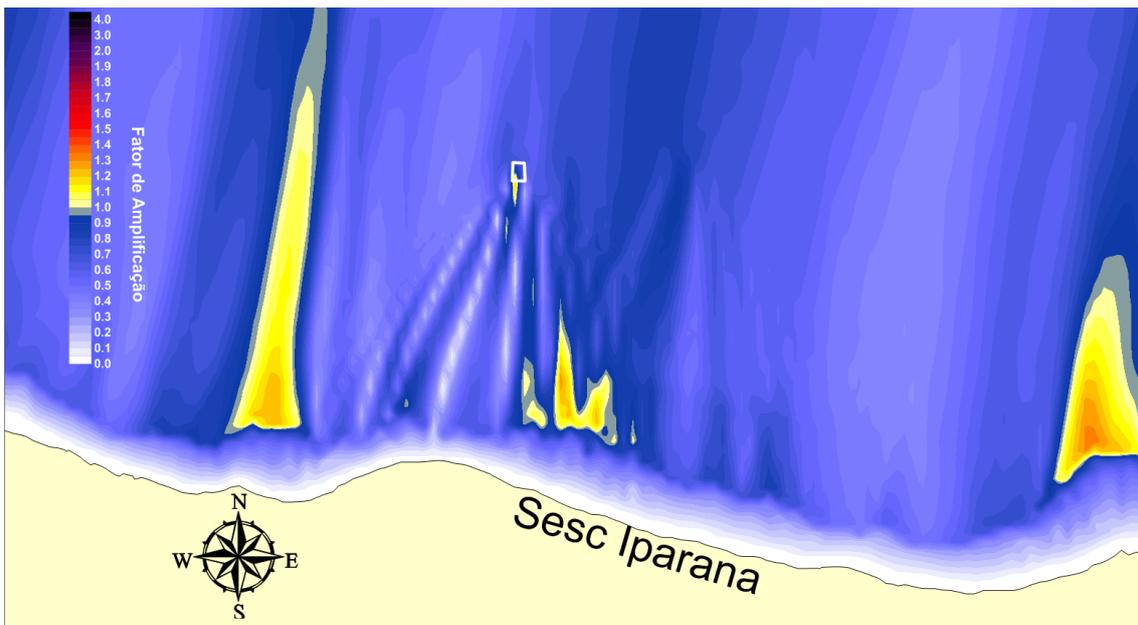


Figura 51 Fator de amplificação da onda com azimute 10° e período 6 segundos para lente de amplificação oeste.

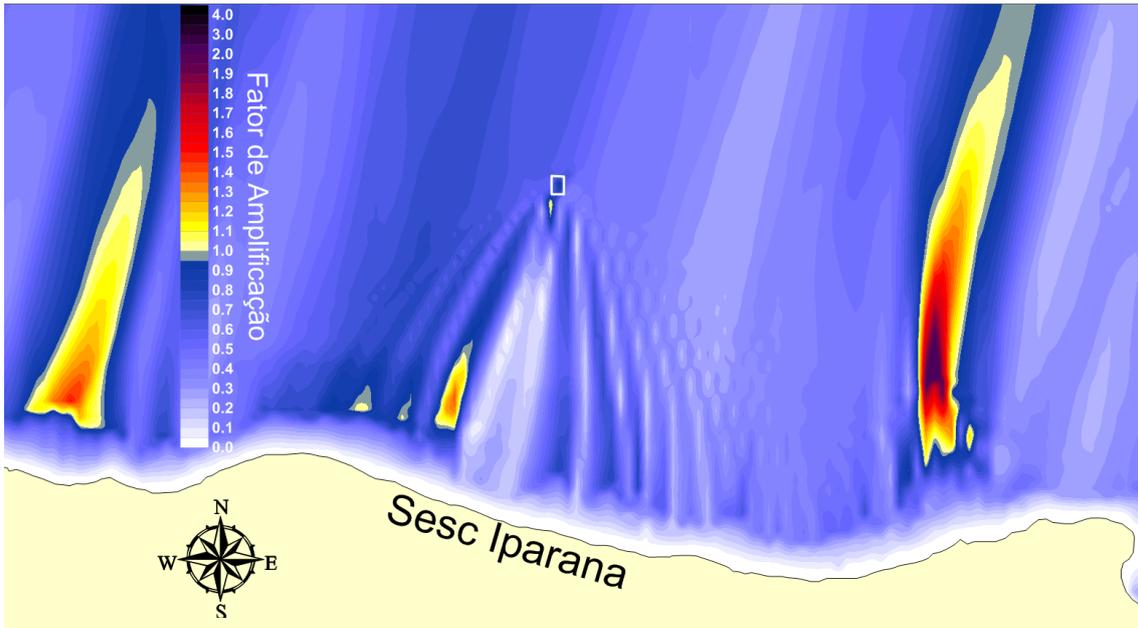


Figura 52 Fator de amplificação da onda com azimute 10° e período 7 segundos para lente de amplificação central.

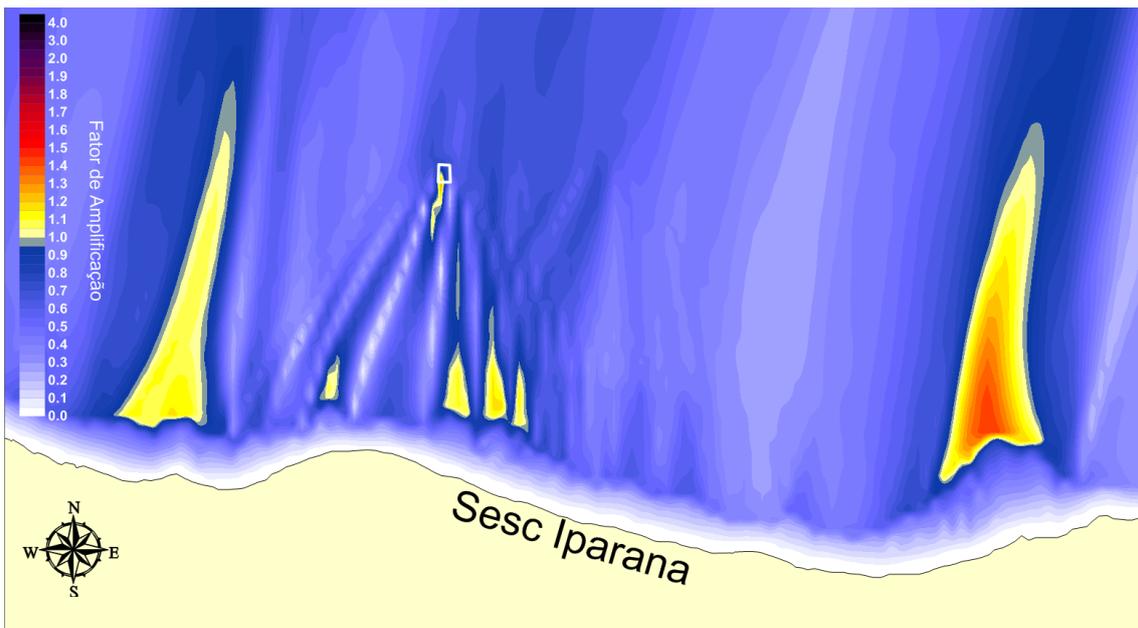


Figura 53 Fator de amplificação da onda com azimute 10° e período 7 segundos para lente de amplificação oeste.

5.4.3 Resultados das ondas com azimute 350° sobre as lentes do Centro e Oeste

Na primeira figura é apresentado o resultado obtido com a utilização das grades acopladas. Neste exemplo, é apresentado o resultado obtido para uma onda de período igual a 6 segundos com azimute 350° sobre uma estrutura de amplificação. O mesmo resultado é repetido de forma mais detalhada na sequência de figuras, as quais representam o efeito sofrido pela onda ao passar pela lente de amplificação central e pela mais a oeste.

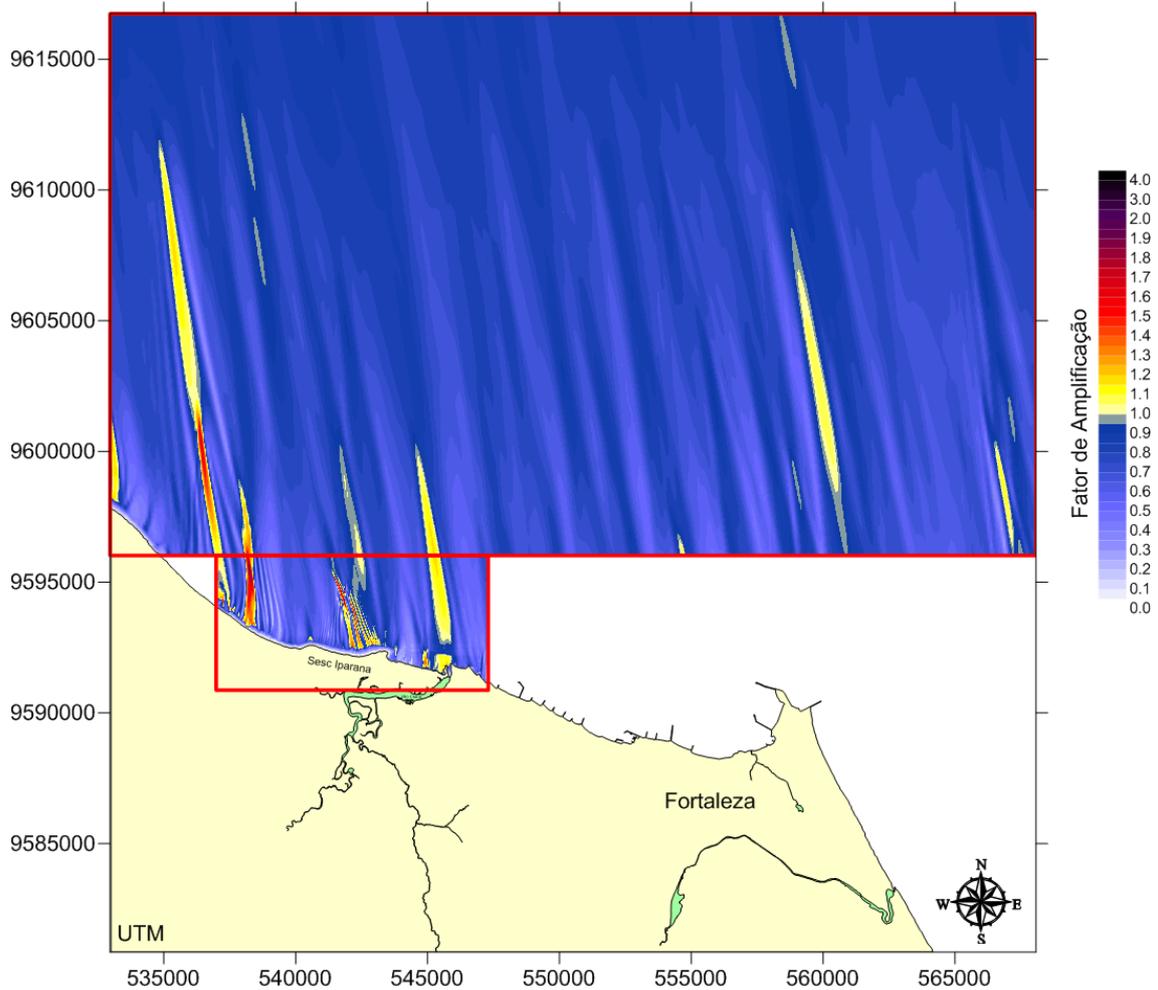


Figura 54 Mapa de fator de amplificação para a onda de azimute 350° (N) e período 6 segundos nas Grades de Propagação de Ondas acopladas de Norte.

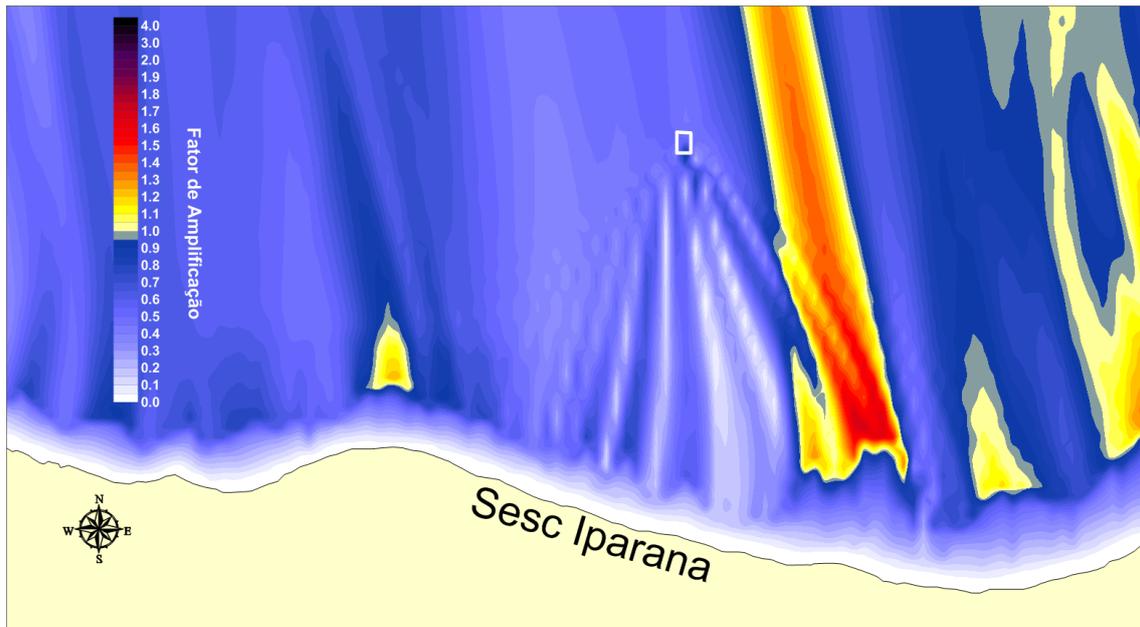


Figura 55 Fator de amplificação da onda com azimute 350° e período 6 segundos para lente de amplificação central.

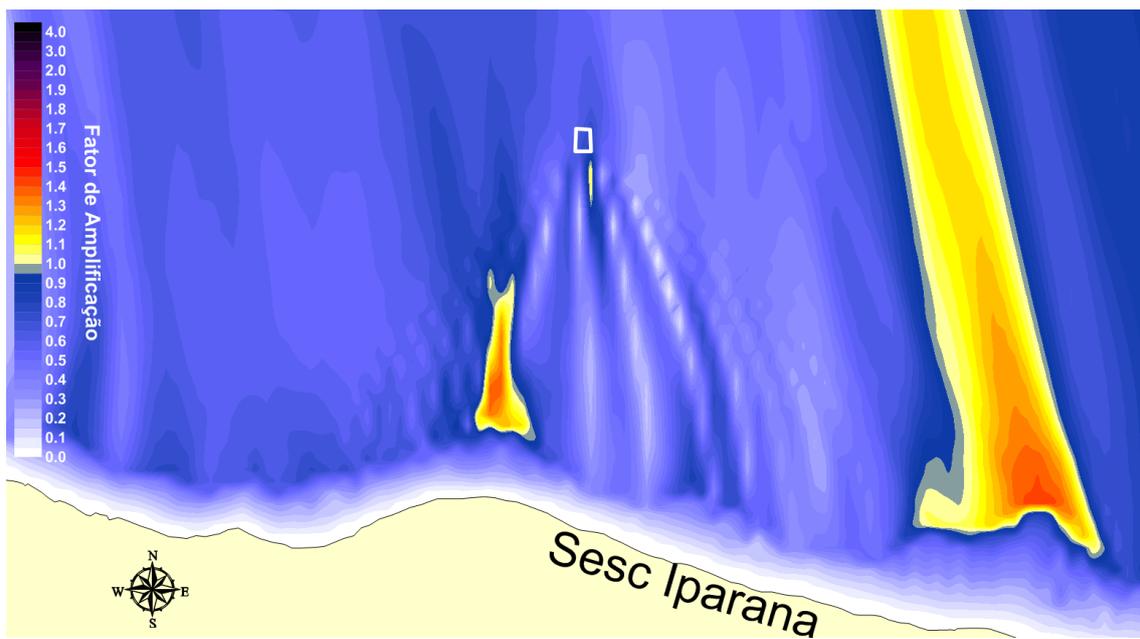


Figura 56 Fator de amplificação da onda com azimute 350° e período 6 segundos para lente de amplificação oeste.

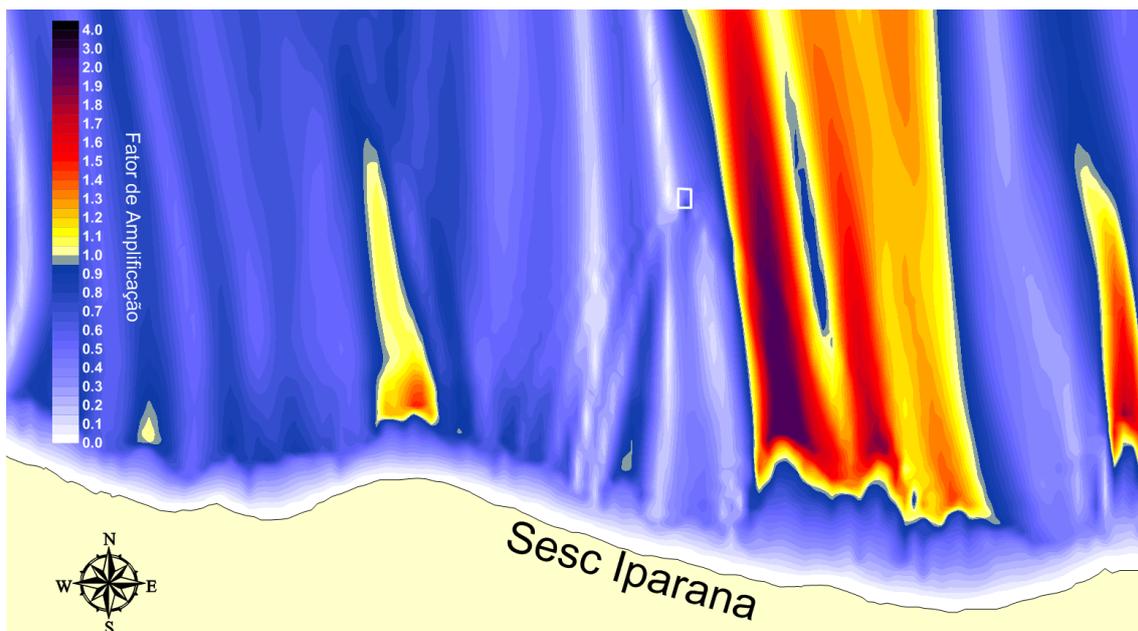


Figura 57 Fator de amplificação da onda com azimute 350° e período 7 segundos para lente de amplificação central.

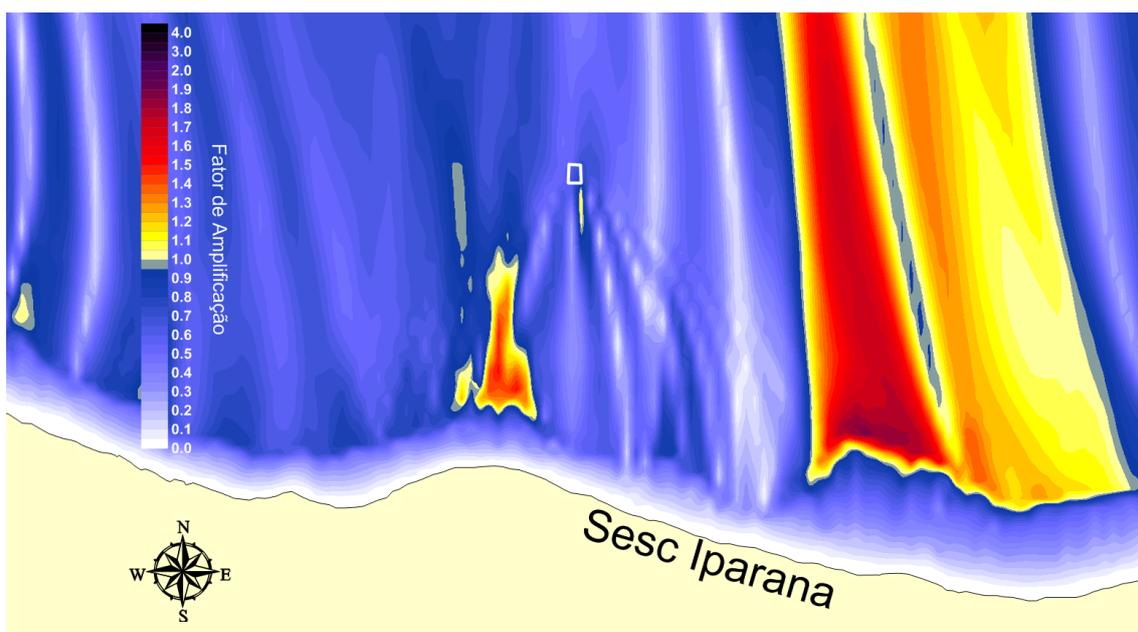


Figura 58 Fator de amplificação da onda com azimute 350° e período 7 segundos para lente de amplificação oeste.

5.5 Análise dos Resultados das Simulações para Concepção da Estrutura de Amplificação

Para que os resultados obtidos pudessem ser devidamente analisados e estudados, mediu-se a variação, em termos percentuais, do Fator de Amplificação. Foram analisados os valores dos fatores de amplificação médios na posição do ponto focal, antes de depois do assentamento da estrutura. A Tabela 16 fornece os Fatores de Amplificações para os resultados obtidos com a presença do arrecife. O mesmo foi feito na Tabela 17, porém sem a estrutura.

Fatores de Amplificação Médio (Com a Estrutura)					
		Lente Oeste		Lente Central	
FA	2.68	1,77	1.36	1,35	
	6	7	6	7	
Período (s)					

Tabela 16 Fatores de Amplificação de Onda com a presença da estrutura.

Fatores de Amplificação Médio (Sem a Estrutura)					
		Área Oeste		Área Central	
FA	1.31	0.75	0,79	0.64	
	6	7	6	7	
Período (s)					

Tabela 17 Fatores de Amplificação de Onda sem a presença da estrutura.

A Tabela 18 apresenta a variação porcentual obtido pelas lentes simuladas para a Onda Paramétrica, período de 6 segundos, altura unitária e azimute igual a 0°, e para uma onda, também com azimute 0° e altura de 1 m, porém de período igual a 7 segundos.

Fatores de Amplificação Médio					
		Área Oeste		Área Central	
Variação (%)	104	136	72	110	
	6	7	6	7	
Período (s)					

Tabela 18 Variação Porcentual dos Fatores de Amplificação Médio para as duas áreas.

Com uma simples análise dessas tabelas é possível notar que a área oeste apresenta melhores resultados na amplificação da energia das ondas que a área central, uma

vez que sua variação em termos percentuais, tanto para o período de 6, quanto para o período de 7 segundos são significativamente maiores.

5.6 Conclusão

Este capítulo foi destinado à caracterização dos parâmetros conceituais do arrecife artificial (profundidade de assentamento e localização) para que o melhor resultado na amplificação de altura da onda pudesse ser alcançado e, deste modo, a geração de energia na Unidade Geradora de Energia (UGE) pudesse ser maximizada.

Tomando como base conclusões encontradas em estudos anteriores, partiu-se de geometrias e dimensões já definidas. Além disso, 3 variações de ondas incidentes, foram simuladas, de modo que fosse possível encontrar o melhor resultado para a localização do arrecife artificial com a propagação da onda escolhida (onda mais frequente na região de interesse, com altura unitária).

Observou-se que a onda responsável para os melhores resultados é aquela proveniente do quadrante norte, com azimute igual a 0° e período de 6 segundos. O estudo da amplificação da altura da onda à sotamar da estrutura foi o parâmetro decisivo para que a região situada à esquerda da área central pudesse ser escolhida como a mais indicada para o assentamento do conjunto, uma vez que no ponto focal daquela região o fator de amplificação é de aproximadamente 2,68.

Além disso, foi diagnosticado que para o presente caso a distância focal (distância entre o último ponto à sotamar da estrutura e a UGE) é de aproximadamente 13 metros. Essa distância ainda é aceitável uma vez que nesta posição a Unidade Geradora de Energia se encontraria a uma profundidade de aproximadamente 8 metros de profundidade.

Um fato importante que deve ser posteriormente estudado é a influência do talude no efeito de propagação de ondas, uma vez que o Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA[®] não incorpora o efeito de reflexão de energia na direção contrária à direção de propagação da onda, o que pode resultar em efeito importantes no caso de taludes mais íngremes que 1:3 (Aguiar, 2011). Desta forma, o talude da estrutura do arrecife deve ser projetado de acordo com estudos na fase de modelagem experimental.

Recomenda-se que seja feito um modelo físico de modo a ratificar todos os estudos aqui apontados, não só para validar os resultados encontrados, mas também para a investigação da influência na unidade geradora de energia da arrebentação de ondas extrema sobre o arrecife artificial. Com esses experimentos será possível, caso necessário, redefinir a posição da UGE em relação à estrutura. Outro fato que também é essencial de ser analisado é a relação entre os diversos custos presentes na concepção da estrutura e as vantagens obtidas com aquela escolha. Este estudo é parte indispensável no estudo de viabilidade do projeto e deve ser devidamente investigado na etapa de modelagem física.

6. Metodologia para a concepção da estrutura de Dissipação de Energia

Neste capítulo do projeto foi feito o estudo para a concepção de uma estrutura de dissipação de energia da onda, que é essencial para a proteção costeira da região em estudo e para a criação da esperada zona de balneabilidade e surfabilidade.

A presença desta estrutura é de fundamental importância, também no que concerne à deriva litorânea, uma vez que esse efeito de dissipação de energia, provocado pela estrutura proposta, trabalha para a criação de uma zona de baixa energia à sotamar do conjunto de lentes. Nesta região os sedimentos tendem a se assentar no fundo, contribuindo, desta forma, para a retenção sedimentológica.

A estrutura, posicionada mais próxima à costa, trabalha através do processo de arrebatamento, para a diminuição da altura das ondas mais energéticas. Este processo acontece de forma controlada e é influenciado pela geometria da estrutura, que acarreta também na formação de uma zona propícia à prática de surf.

6.1 Concepção da Estrutura

A concepção da estrutura foi baseada em estudos anteriores sobre Fundos Artificiais Multifuncionais, desenvolvida na COPPE/UFRJ por Aguiar (Em Busca da Forma Ideal de um Fundo Artificial para Surfe, 2006) e em (Modelagem Computacional de Propagação de Ondas para Projeto de Estrutura Marinha de Dissipação de Ondas, 2012).

Nesta etapa, foi definido o posicionamento e a geometria da estrutura de modo que os resultados obtidos atendam às perspectivas do projeto. Com essa estrutura espera-se que ocorra a proteção de uma faixa de praia correspondente a 150 metros de extensão, bem como uma dissipação média de aproximadamente 60 % da energia contida na onda à barlar da estrutura em questão (sotamar da estrutura de amplificação). Quanto à surfabilidade, que é um dos objetivos primários deste trabalho, foram desenhadas isóbatas com o intuito de formar raias de surfe com diversos níveis de dificuldade, tornando apta a localidade a receber eventos esportivos.

O estudo prévio supracitado, considerou uma situação com os mesmos objetivos e condições ambientais parecidas e, desta forma, foi concebida uma geometria com ca-

racterísticas semelhantes às da Figura 59. Para o desenvolvimento do presente trabalho partiu-se destes resultados de modo que os objetivos pudessem ser alcançados.

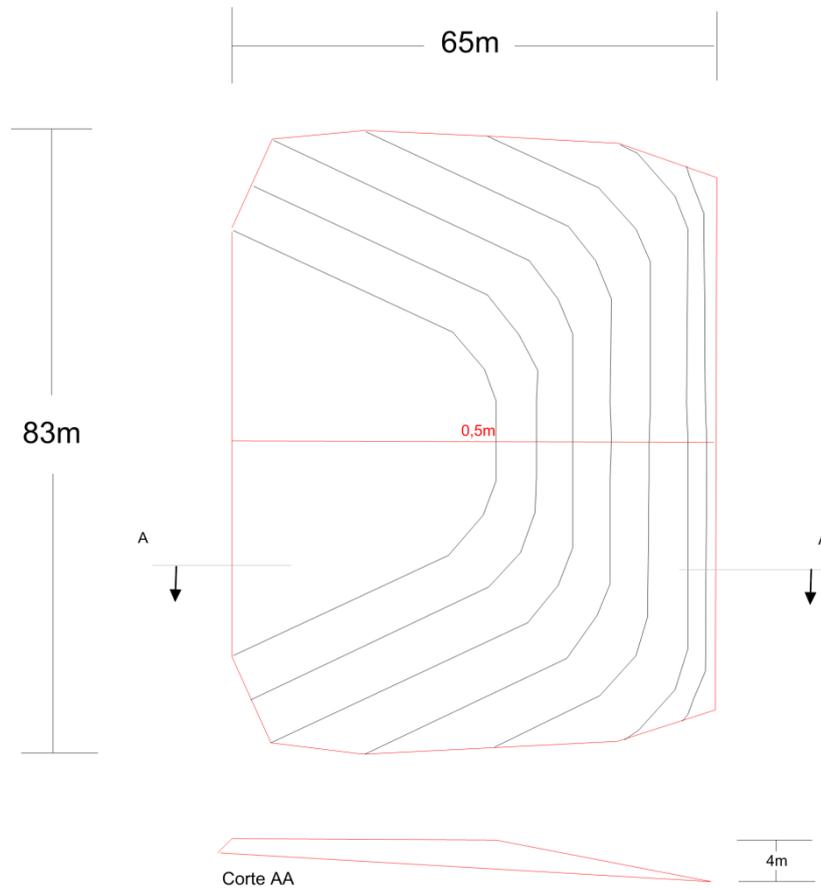


Figura 59 Vista Superior e corte transversal da lente de dissipação de ondas.

Naquele estudo, foi projetada uma estrutura, conforme pode ser visto na Figura 59, com 65 metros de comprimento (no eixo transversal à praia), 83 de largura e com uma altura que varia de 2 a 4 metros.

A Tabela 19 resume todas as características dimensionais da estrutura.

Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Profundidade do platô (m)
65	83	4	0.5

Tabela 19 Tabela com as características dimensionais para a concepção do arrecife de dissipação de energia.

Para avaliação do comportamento da estrutura para o presente trabalho, foram feitas simulações em modelo computacional utilizando o modelo de propagação de ondas. Nos testes, o Arrecife foi assentado sobre o leito plano, em uma região com apro-

ximadamente 9 metros de profundidade (em relação ao zero hidrográfico) a uma distância de aproximadamente 870 metros da costa.

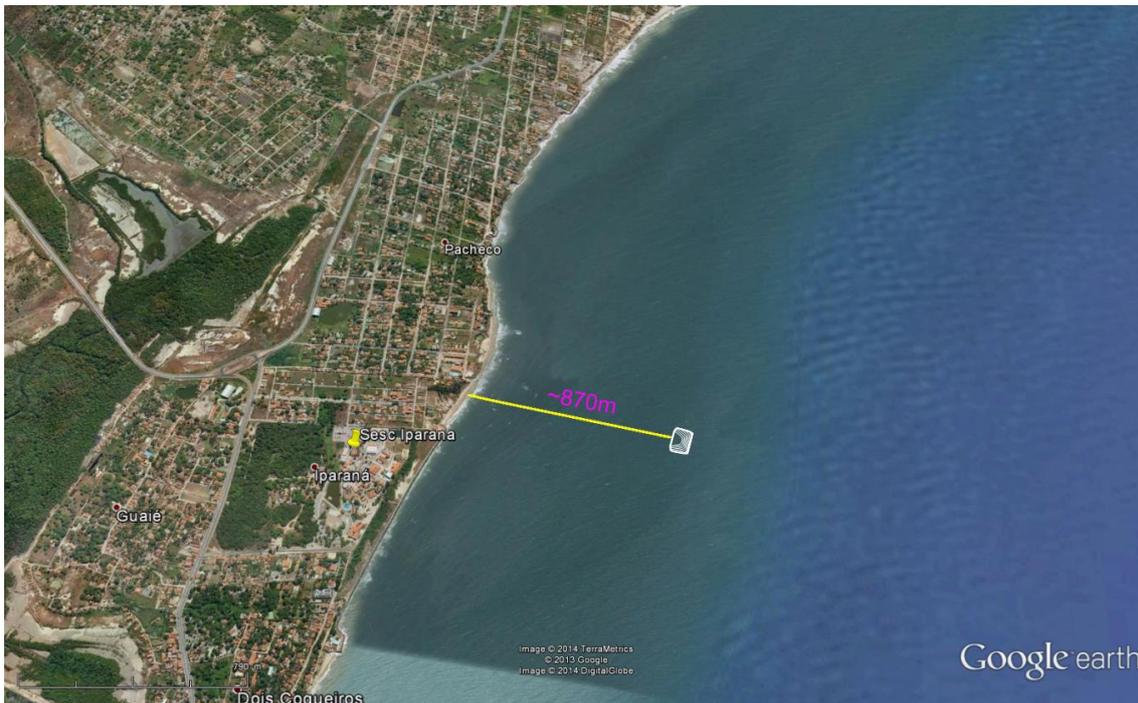


Figura 60 Imagem do Google Earth representando a distância da lente de dissipação de ondas da costa.

Foram feitas algumas simulações para a validação do modelo de propagação de ondas na condição de fundo sem o pretendido arrecife instalado e na presença do mesmo. Como o esperado, o empinamento e a subsequente arrebentação da onda ocorreram homogeneamente em toda a extensão da faixa de praia, para o caso da ausência da estrutura de dissipação. Este resultado pode ser observado melhor na Figura 61, o qual é um mapa de amplificação da altura da onda, direção de propagação e linha de arrebentação (onde a altura da onda é aproximadamente 0,78 vezes a profundidade) da Onda Paramétrica. No caso apresentado, a arrebentação da onda (linha preta) ocorre simultaneamente ao longo de toda a linha de arrebentação, que nessa situação se apresenta paralelamente à faixa de praia, o que significa que a onda “quebra” de uma forma que não propicie à prática de surfe.

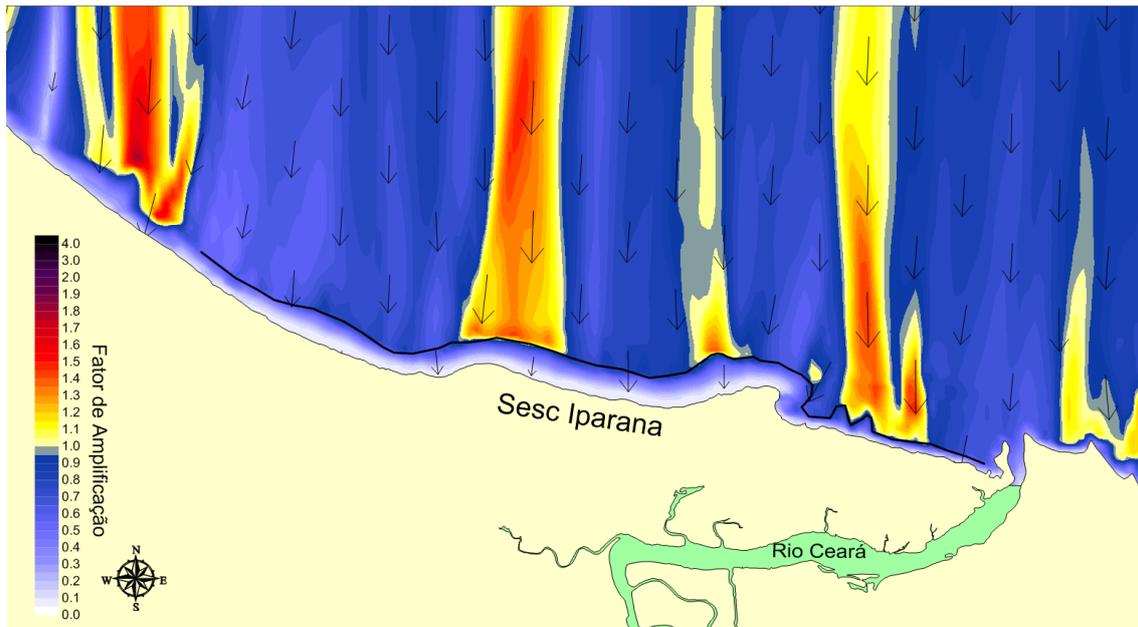


Figura 61 Representação da linha de arrebentação sem a presença da estrutura de dissipação de energia.

Para a situação de fundo com o arrecife devidamente assentado, como apresentado na Figura 62, pode-se perceber que há uma transformação da linha de arrebentação natural. Há também a presença de uma nova linha de arrebentação que contorna o platô da estrutura de dissipação de energia, simbolizando desta forma a arrebentação da onda por influência da estrutura.

Além disso, percebe-se a existência de uma “sombra” com alturas menores. Essa zona de baixa energia é delimitada por “raias”, nas quais a prática de surfe pode acontecer, além de acarretar em uma área de maior balneabilidade e com maior taxa de sedimentação.

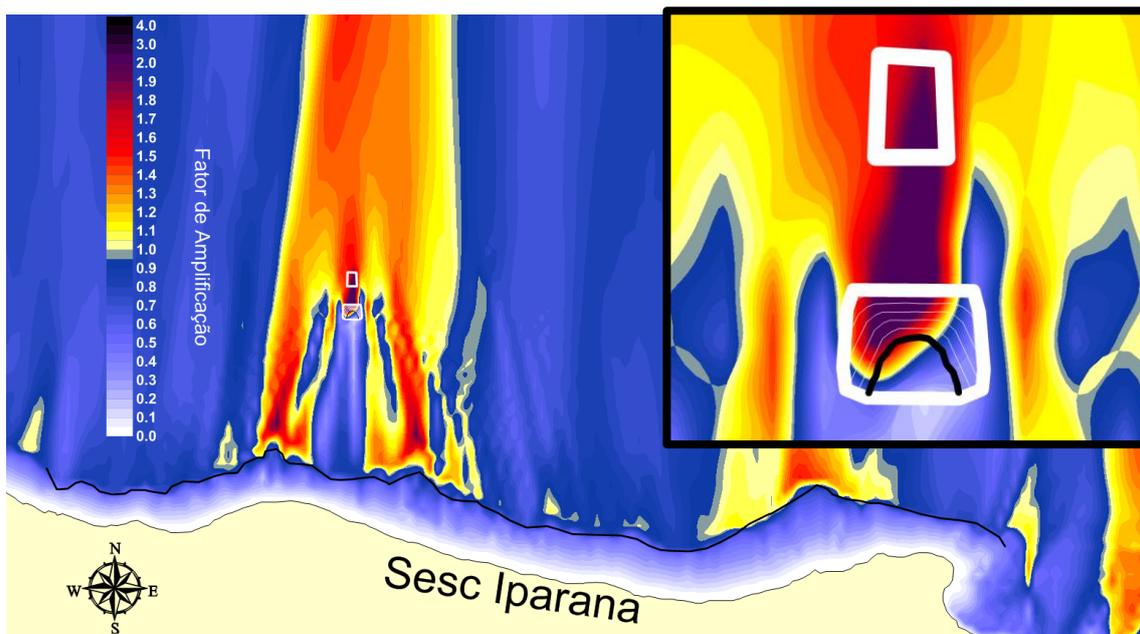


Figura 62 Representação da linha de arrebentação (linha preta), tanto na costa, como no platô da estrutura de dissipação de energia.

6.2 Resultados do Modelo de Propagação de Ondas para o caso da presença do conjunto de lentes para a Onda Paramétrica

Abaixo são apresentados os mapas de distribuição de fatores de amplificação dos principais resultados obtidos através do modelo de propagação de ondas para toda a área modelada para ondas de azimutes 10° , 0° 350° e período de 6 segundos.

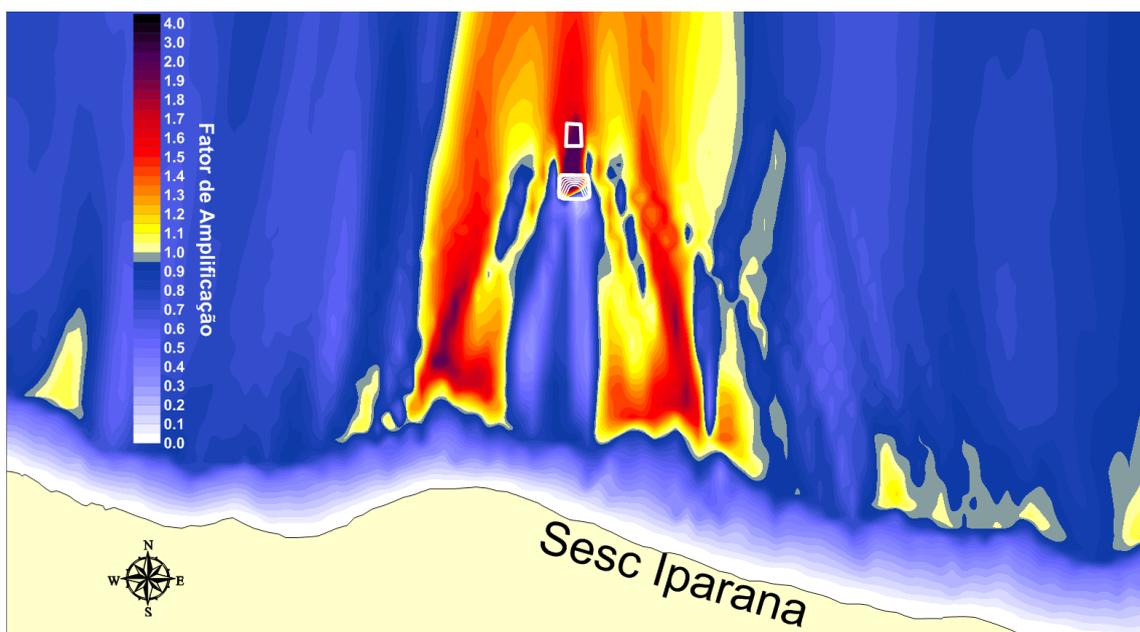


Figura 63 Mapa de distribuição de fatores de amplificação da onda com período de 6 segundos e azimute 0° .

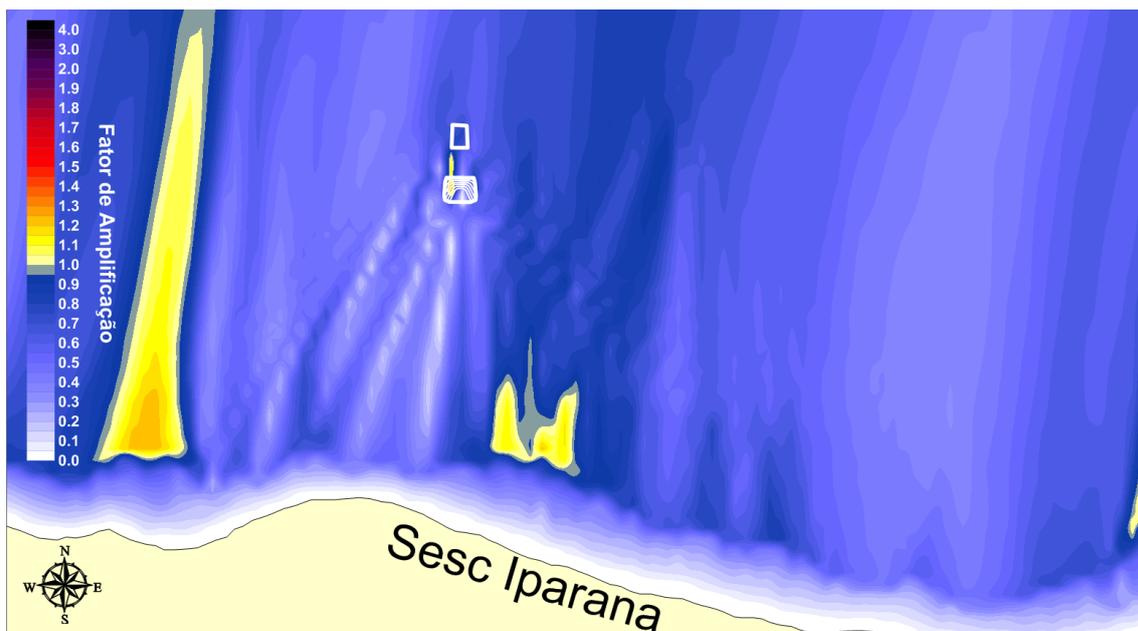


Figura 64 Mapa de distribuição de fatores de amplificação da onda com período de 6 segundos e azimute 10°.

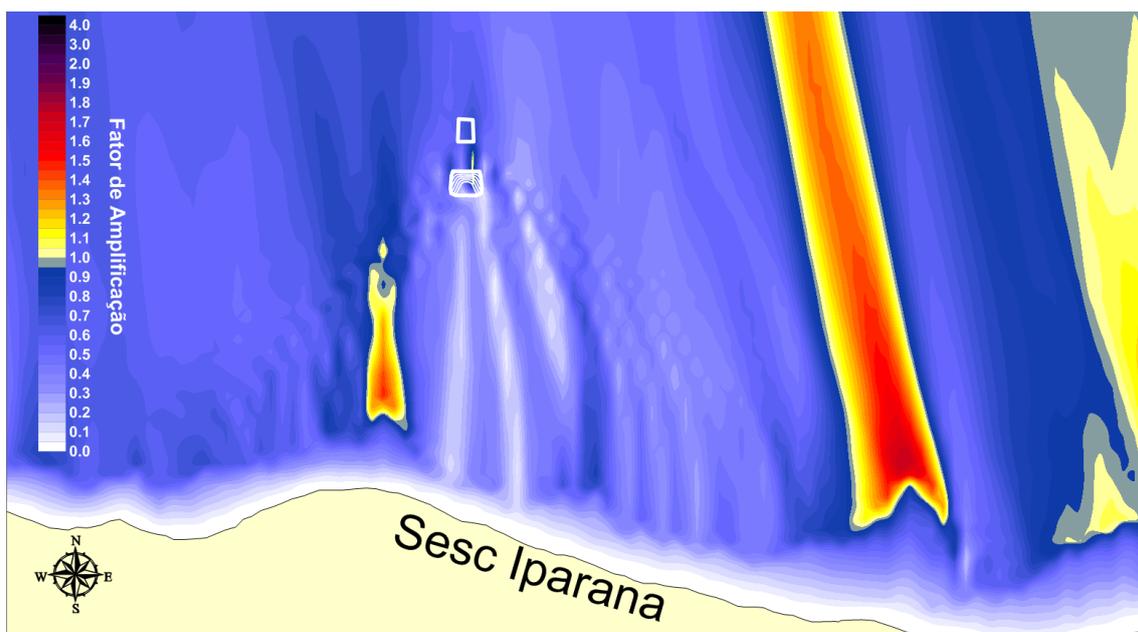


Figura 65 Mapa de distribuição de fatores de amplificação da onda com período de 6 segundos e azimute 350°.

Os demais resultados do Modelo de Propagação de Ondas para ondas com azimutes 10°, 0° e 350° com período de 7 segundos encontram-se presentes no Anexo B.

6.3 Análise dos Resultados

Para uma análise completa dos resultados obtidos, é necessária a investigação dos parâmetros relacionados à proteção da costa e balneabilidade, bem como à surfabilidade das ondas “produzidas”.

6.3.1 Parâmetros de Proteção Costeira e Balneabilidade

Na sequência serão apresentados os parâmetros que foram estudados de modo a avaliar a eficiência da estrutura projetada para que esses dois objetivos pudessem ser alcançados.

6.3.1.1 Faixa Protegida

A determinação da extensão da faixa de costa protegida é um dos parâmetros que todo projeto de Engenharia Costeira, que objetiva a proteção costeira, deve contemplar.

Com uma análise do mapa de distribuição de fatores de amplificação observa-se que uma zona com aproximadamente 120 metros ao longo do eixo longitudinal foi amortecida com a presença da estrutura de dissipação. O fator de amplificação máximo encontrado nesta zona “morta” foi de 0,9, em uma região já bem próxima à costa.

Considerando que a onda mais frequente na região, com azimute 0° e período 6 segundos, possui uma altura em águas rasas de 1,2 metros, conforme se observa na Tabela 10, temos que a altura máxima que essa onda alcança à sotamar da estrutura é de 1,08 metros.

6.3.1.2 Taxa de Dissipação

Este parâmetro é de fundamental importância para a análise da viabilidade do projeto, uma vez que ele nos fornece informação sobre a eficiência da estrutura.

A taxa de Dissipação corresponde à medida da dissipação da energia da onda provocada pela sua arrebentação sobre a estrutura, sendo calculada da seguinte forma:

$$D(\%) = -(F_{depois} - F_{antes})/F_{antes}$$

Para este cálculo foram comparados os valores médios e máximos à sotamar da lente de amplificação (barlamar da estrutura de dissipação) com os mesmos valores referentes à sotamar da segunda lente. Deste modo, constatou-se que a taxa de dissipação máxima é de aproximadamente 80% e um valor médio de 68%.

A Figura 66 apresenta o perfil dos fatores de amplificação, para o caso de dissipação máxima, exemplificando o efeito causado pela presença das estruturas de amplificação e dissipação na onda incidente. A Figura 67 mostra o traçado utilizado para obtenção do perfil.

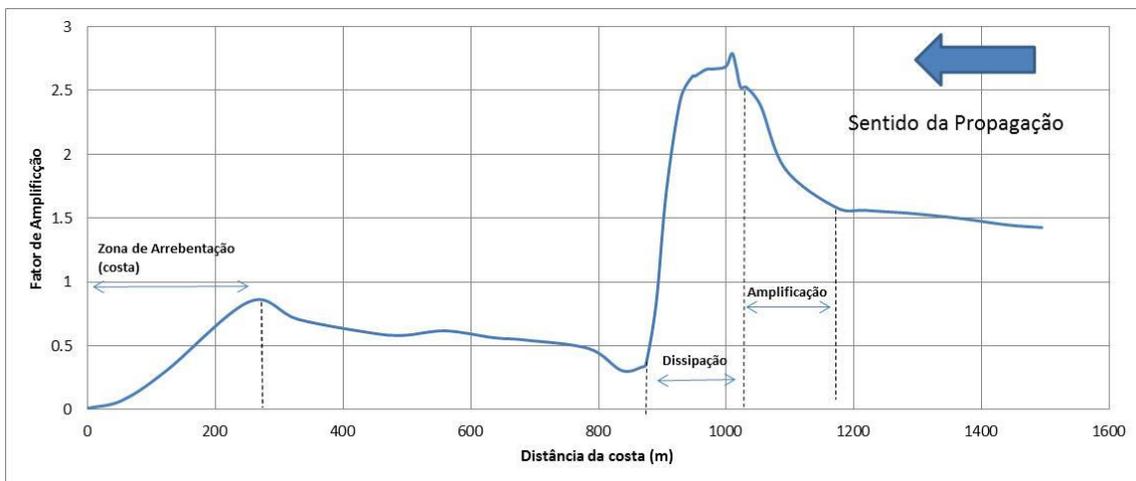


Figura 66 Perfil de fatores de amplificação de altura de onda ortogonal à linha de costa.

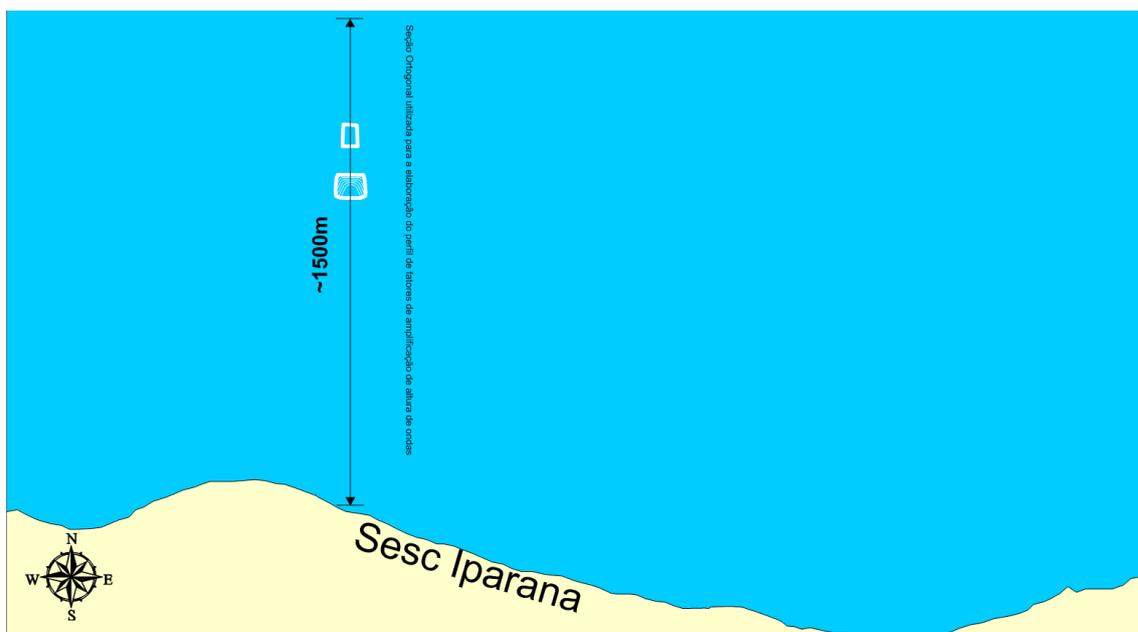


Figura 67 Traçado da seção utilizada para elaboração do perfil de fatores de amplificação de altura de ondas.

6.3.2 Parâmetros de Surfabilidade

Como já dito anteriormente, a surfabilidade das ondas produzidas representam um dos objetivos primários deste trabalho, por isso necessitam ser estudadas, dado que é uma característica esperada e desejada.

De modo a avaliar e estimar a surfabilidade das ondas na região onde acontece a arrebentação da onda de projeto foram estudados três parâmetros: a Altura de Arrebentação, o Fator de Amplificação e o Ângulo de Quebra da Onda. Todas essas características foram levantadas para apenas uma raia de surfe (esquerda), pois se considerou as duas como sendo simétricas.

6.3.2.1 Altura de Arrebentação e Fator de Amplificação

De modo a calcular a altura de arrebentação utilizou-se o parâmetro, já conhecido, de amplificação (A), o qual fora definido em termos percentuais. Seu valor é calculado através de uma relação entre a altura de arrebentação máxima sobre o arrecife (H_{bmax}) e a altura da onda (H_i). A equação que corresponde a essa relação é:

$$A(\%) = \frac{H_{bmax} - H}{H}$$

Para o presente estudo, obteve-se uma amplificação de aproximadamente 4%. Isso quer dizer que a onda sofre uma pequena amplificação até que ela atinja a altura máxima sobre o arrecife; atingindo um valor de 3,36 metros.

6.3.2.2 Ângulo de Quebra (α)

A determinação do ângulo de quebra da onda de projeto após a sua passagem pelas lentes de amplificação e dissipação de onda é um parâmetro muito importante para a caracterização da onda, uma vez que ele nos fornece informações sobre a velocidade de propagação da arrebentação em toda a extensão da crista. Desta forma é possível fazer uma análise do grau de dificuldade daquela onda para diversos níveis de surfistas.

O ângulo de quebra é o ângulo formado entre a crista da onda e o eixo de arrebentação. Na figura abaixo é possível visualizar este ângulo, na qual a linha de arrebentação é representada pelo rastro de espuma deixado por ondas anteriores.



Figura 68 Representação do ângulo de quebra. (Aguiar, MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS PARA PROJETO DE ESTRUTURA MARINHA DE DISSIPACÃO DE ONDAS, 2012).

A sua relação com a velocidade é indiretamente proporcional, uma vez que quanto menor o ângulo de quebra (α), maior será a velocidade de arrebentação daquela onda. Assim sendo, pode-se relacionar o ângulo de quebra da onda, com o nível de habilidade requerido para que a mesma possa ser surfada, pois quanto mais rápida a arrebentação ocorrer, mais difícil será para o surfista permanecer na raia. Em casos em que o ângulo de quebra é igual a zero, ou seja, no caso em que a arrebentação ocorre simultaneamente ao longo da linha de arrebentação, o surfista precisa de muita experiência e habilidade para se manter no tubo (no caso de arrebentação mergulhante), ou por cima da crista.

A Tabela 20, criada por HUTT et al (2001), relaciona o nível de habilidade exigido pela onda para que a mesma possa ser surfada, com o ângulo de quebra correspondente.

Para o cálculo do ângulo de quebra em cada trecho da raia (extensão entre dois pontos de arrebentação), utilizou-se a direção média nos dois extremos do respectivo intervalo e a linha que liga esses dois pontos (linha de arrebentação).

<i>Nível</i>	<i>Descrição</i>	α (°)
1	Surfistas iniciantes que descem reto na onda.	90
2	Surfistas iniciados capazes de surfar lateralmente ao longo da crista da onda.	70
3	Surfistas capazes de aumentar sua velocidade mexendo a prancha na face da onda.	60
4	Surfistas começando a iniciar e executar manobras simples ocasionalmente.	55
5	Surfistas capazes de executar manobras simples consecutivamente numa onda simples.	50
6	Surfistas capazes de executar manobras simples consecutivamente e manobras avançadas ocasionalmente.	40
7	Surfistas de ponta capazes de executar manobras avançadas consecutivamente.	29
8	Surfistas profissionais capazes de executar manobras avançadas consecutivamente.	27
9	Surfistas profissionais da elite mundial.	NA
10	Surfistas no futuro.	NA

Tabela 20 Classificação do nível de habilidade do surfista em função do mínimo ângulo de quebra; (a partir de HUTT et al., 2001).

Como diagnosticado em Aguiar (2012) para uma situação semelhante, o ângulo de quebra varia conforme o gráfico abaixo. A linha mais fina representa a variação deste ângulo ao longo da raia esquerda da estrutura em questão. Naquela ocasião estudou-se somente a raia esquerda, uma vez que a direita é simétrica.

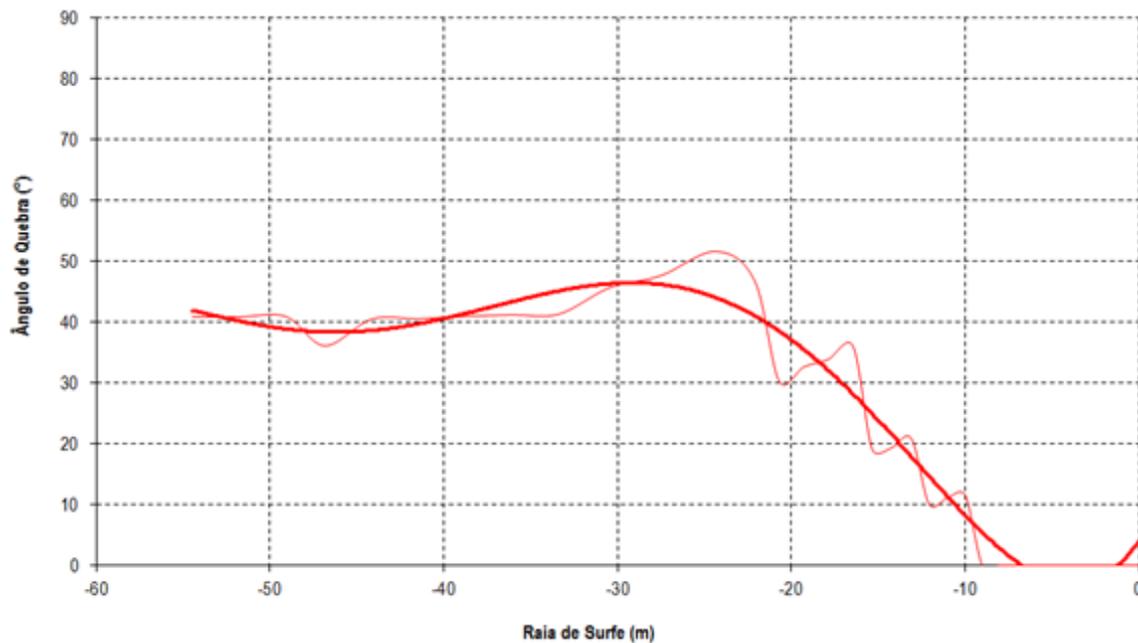


Figura 69 Gráfico da variação do ângulo de quebra ao longo da raia de surfe esquerda. (Aguiar, MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS PARA PROJETO DE ESTRUTURA MARINHA DE DISSIPACÃO DE ONDAS, 2012).

É possível perceber que o ângulo de quebra parte do zero, para trechos em que as isóbatas da estrutura são iguais às isóbatas naturais e alcança valores de 40 e 50 graus nos trechos em que as isóbatas da estrutura são mais inclinadas em relação às naturalmente encontradas na região. Assim sendo, o nível de surfabilidade na região varia de 5 a 10. Este já era um resultado esperado, uma vez que é possível diagnosticar esse parâmetro medindo o ângulo que a linha de arrebenção, na presença da estrutura, faz com a linha de arrebenção natural.

6.3.2.3 Modo de Arrebenção

O modo de arrebenção da onda pode ser verificado através do Número de Iribarren, conhecido também como Parâmetro de Similaridade de Surfe, como proposto por BATJES (1974). Sua definição é dada pela equação abaixo.

$$\xi_b = \frac{m}{\sqrt{H_b/L_o}}$$

H_b - Altura da onda no ponto de arrebenção

L_o - Comprimento da Onda em águas profundas

m - Tangente do ângulo formado pela superfície da praia ou da estrutura com a horizontal

A Tabela 21 apresenta as faixas de valores do Número de Iribarren com as suas respectivas classificações.

<i>Número de Iribarren</i>	<i>Modo de Arrebentação</i>
$\xi_b < 0,4$	Progressiva (cheia)
$0,4 < \xi_b < 2,0$	Mergulhante (tubular)
$\xi_b > 2,0$	Colapsante (não-surfável)

Tabela 21 Classificação do modo de arrebentação em função do Número de Iribarren, segundo BATJES (1974). Denominação entre parênteses é aquela praticada pelos surfistas.

Para o cálculo deste parâmetro, foi feita uma análise de dois casos extremos. O primeiro, com a menor altura da onda no ponto de arrebentação e o segundo com o caso oposto, com a maior altura de arrebentação.

Desta forma, pode-se constatar que este parâmetro varia entre 0,30 e 0,64, para as alturas de ondas mais frequentes na área de estudo (vindas de norte). Sendo que em 25% do tempo a arrebentação ocorre de forma tubular. Este modo de arrebentação é o mais desejável para competições de surfe e, portanto, ideal de ser obtido.

6.4 Sugestão de Projeto

Levando-se em conta que o projeto desenvolvido foi para a concepção de um único conjunto de estruturas e que a faixa de energia “disponível”, para a onda propagada (Onda Paramétrica), é bem maior que aquela efetivamente aproveitada pelo módulo, é intuitivo que se pense no assentamento de um conjunto de estruturas, dispostas uma do lado da outra, para que o efeito pretendido seja amplificado.

6.4.1 Resultado do Modelo de Propagação de Ondas para 2 estruturas adjacentes à original

De modo a observar o fenômeno supracitado, foram dispostas mais duas lentes de amplificação e de dissipação de energia. Uma distante 200 metros à direita da lente oeste

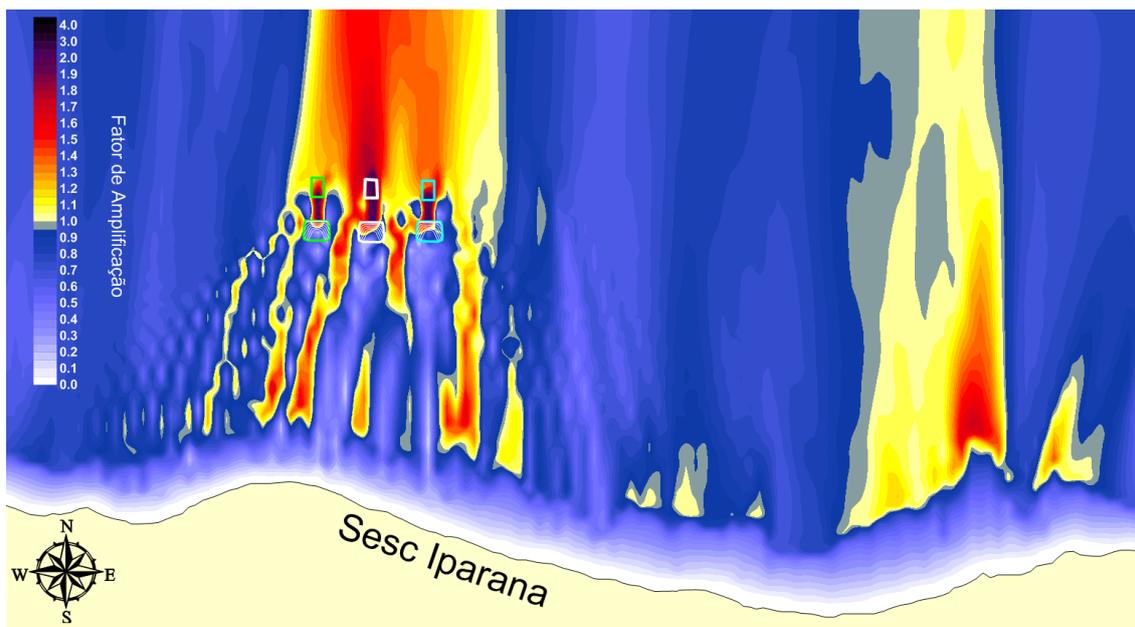


Figura 71 Mapa de distribuição de Fatores de Amplificação para uma onda com azimute 0° e período 6 segundos.

Somando toda região de costa que tiveram suas energias reduzidas, nota-se que uma faixa com uma extensão com aproximadamente 400 metros foi amortecida.

6.5 Conclusão

Nesta etapa do trabalho, foi definido o projeto fundamental para a concepção da lente de dissipação de energia da onda. Os objetivos gerais dessa etapa foram conceber uma estrutura capaz de reduzir em aproximadamente 60% a energia contida na onda, previamente amplificada pelo arrecife de amplificação, e proporcionar uma proteção de uma faixa de praia de aproximadamente 150 metros de comprimento. Para tanto, utilizou-se uma concepção de uma estrutura, dimensionada em estudos prévios, com aproximadamente 65 metros de comprimento por 4 metros de altura, assentada a uma profundidade de aproximadamente 9 metros de profundidade, em relação ao zero hidrográfico.

Para que os objetivos estipulados fossem validados e diagnosticados, foram simuladas seis ondas, com períodos de 6 e 7 segundos e azimutes 0°, 10° e 350°.

Os resultados obtidos através dos processos de modelagem foram interpretados com base nos parâmetros de proteção costeira e surfabilidade, os quais mostraram que os objetivos foram alcançados. A faixa protegida obtida para o caso foi 20% menor que aquele esperado, porém essa diferença encontra-se em níveis satisfatórios, uma vez que

todos os outros parâmetros apresentaram bons resultados. Para os valores de taxa de dissipação, obteve-se 80% de redução para o caso de dissipação máxima e um valor médio de 68%. Uma análise dos parâmetros de surfabilidade mostrou que a onda cresce algo em torno de 4% até atingir sua altura de arrebentação (3,36 m) e que o ângulo de quebra atinge valores de até 50°, o que representa que um nível de dificuldade variando de 5 a 10 na escala criada por HUTT et al (2001). Além disso, foi visto que o modo de arrebentação é, para todos os casos, não-colapsante, ou seja, surfável e em 25% do tempo de modo mergulhante (tubular), perfeito para a prática do surfe.

Nesta etapa foi também sugerida uma nova proposta de engenharia, assentando outras estruturas ao lado daquela concebida. Foram dispostas 2 estruturas, uma ao lado direito da original (distante cerca de 200 metros) e outra assentada à esquerda (cerca de 170 metros), deste modo, houve uma amplificação dos resultados obtidos com a instalação de somente uma estrutura. Este resultado validou a hipótese de que a estrutura é replicável, podendo ser disposta em série de acordo com as necessidades e objetivos do projeto.

Com o objetivo de validar os resultados é preciso que seja concebido um modelo físico, para que a verificação dos dados obtidos possa ser possível. Desta forma pode-se também realizar um estudo de outras variações para que melhores resultados sejam alcançados.

Nos testes em modelos físicos, propõe-se medir a altura das ondas tanto antes quanto depois da estrutura de dissipação, para que desta forma a taxa de dissipação possa ser mensurada com um maior grau de certeza. Além disso, é preciso verificar experimentalmente o modo de arrebentação da onda. Para isso, é preciso que uma mesma onda seja simulada com diversos níveis de água, característica que não é possível de ser inserida no modelo de propagação de ondas do SisBaHiA[®].

7. Conclusões e Recomendações

Na primeira etapa deste trabalho foi feito um estudo para a determinação da melhor localização para o assentamento da estrutura de amplificação de ondas. Nesta etapa foi diagnosticado, também, que a parte da costa em questão é uniformemente atingida em todo seu eixo longitudinal, o que não nos permitiu que a escolha do local ideal para a instalação fosse alcançada. Além disso, foi feita uma análise probabilística para a determinação da onda que incide naquela faixa costeira com maior incidência e, deste modo, determinou-se que ondas com Azimute 0° e períodos 6 segundos provenientes do quadrante Norte são as mais frequentes naquela região.

Sugere-se que levantamentos geomorfológicos e sedimentológicos da região sejam realizados para que o local indicado para o assentamento das estruturas seja validado e confirmado.

Para a etapa de concepção da estrutura de amplificação de energia foi estudado a influência que a mesma provoca na hidrodinâmica da região após seu assentamento. Este estudo foi feito comparando os valores dos fatores de amplificação em dois momentos distintos, na ausência e na presença da estrutura em questão. Os resultados encontrados mostraram que a estrutura é altamente eficiente no que ela se propõe, provocando uma amplificação de cerca de 100% para ondas com períodos de 6 segundos e valores absolutos de aproximadamente 2,68, para ondas com período de mesmo período. Além disso, foi diagnosticado que, por motivos ambientais, houve uma diferença de 3 metros na posição focal, em relação ao estudo em que este trabalho se baseou. Este fato, porém, não representa um problema, já que o importante é que o ponto focal (ponto pretendido para a instalação da UGE) se situe em um local de profundidade superior a 8 metros.

Objetivando validar os resultados obtidos nesta etapa, sugere-se fazer um estudo mais específico do talude da estrutura, uma vez que este pode influenciar, através da reflexão de energia na direção contrária à direção de propagação das ondas, os resultados obtidos. O modelo utilizado para esse estudo (Modelo de Propagação de Ondas - SisBaHiA®) não incorpora este efeito e, portanto, não foi representado nos mapas apresentados. Para tanto, a concepção do talude ideal para a estrutura deve ser verificado na etapa de modelagem experimental.

O estudo em modelo físico reduzido é extremamente necessário para a validação e investigação de aspectos que podem exercer influência no resultado final. Outro aspecto que pode ser relevante é o efeito sentido pela UGE no caso da arrebentação de ondas extremas sobre o arrecife artificial. A partir destes resultados é possível, caso necessário, um posterior estudo para a redefinição da posição desta unidade. Ainda nesta etapa se faz necessário um estudo estrutural do arrecife pretendido, uma vez que este detalhamento não constou no escopo deste trabalho. Estudos de viabilidade do projeto são também partes indispensáveis e devem ser cuidadosamente investigados.

Na terceira e última fase deste projeto foi concebida uma estrutura de dissipação de energia semelhante àquela proposta pelo estudo que embasou este trabalho.

Os objetivos do trabalho foram satisfatoriamente alcançados, uma vez que a faixa protegida foi somente 20% menor em relação àquela objetivada. Esta redução não é representativa dada à magnitude do projeto. Os outros parâmetros utilizados para a análise dos resultados foram condizentes com as expectativas.

Sugere-se que seja construído um modelo reduzido para uma medição mais precisa da taxa de dissipação, bem como a verificação real do modo de arrebentação da onda, verificada, no estudo, como sendo do tipo tubular (perfeita para a prática de surfe). Recomenda-se ainda que seja feito um detalhado estudo estrutural para que a determinação das melhores dimensões (mais eficientes) para a situação em questão seja alcançada. Este estudo possibilita ainda a determinação dos taludes ideais entre as isóbatas da estrutura, parâmetro o qual modifica o ângulo de quebra da onda que ali arrebenta. Essa variação do ângulo de quebra pode modificar o nível de dificuldade das ondas a serem surfadas.

Soma-se às recomendações a necessidade de um estudo para outras condições de maré, uma vez que nessa região do Ceará a maré é de 2,8 metros. A variação do nível da água em um estudo com modelo físico seria ideal para que estas variações sejam estudadas.

Recomenda-se estudar de maneira mais detalhada o efeito das outras lentes adjacentes à original, de modo a validar seus efeitos não só para os parâmetros já supracitados, mas também para estudar sua sinergia com o grupo de estruturas. O fenômeno de reflexão, neste caso, deve ser levando em consideração, o que torna ainda mais necessá-

rio a construção de um modelo experimental, uma vez que este fenômeno não é considerado pelo Modelo de Propagação de Ondas do SisBaHiA[®].

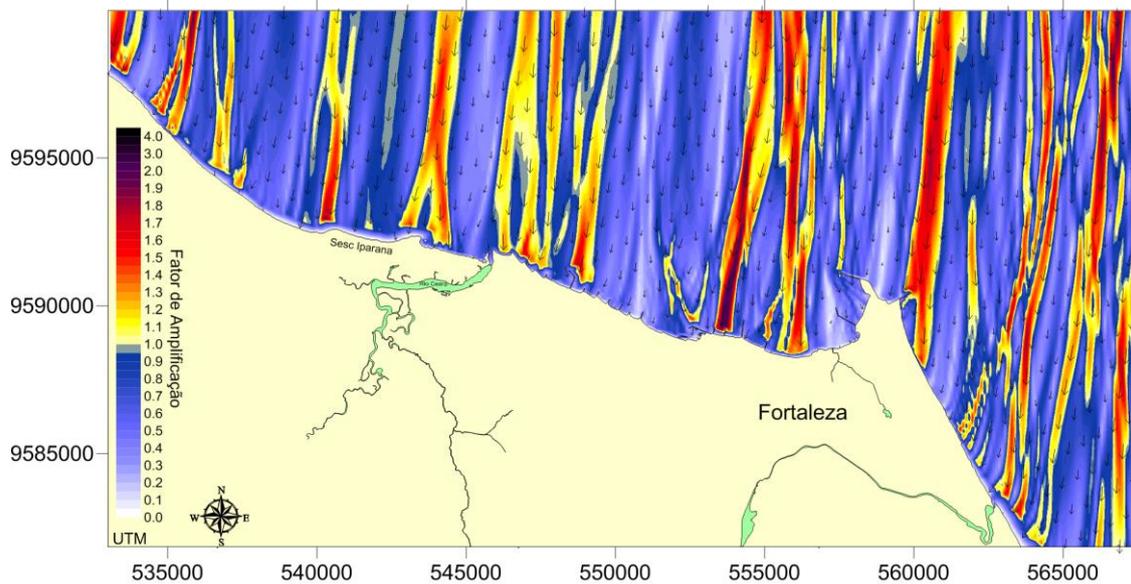
Para um estudo mais detalhado das consequências da instalação desses módulos, recomenda-se fortemente um estudo Morfodinâmico do local, de modo que a esperada retenção da deriva litorânea seja validada e mensurada.

8. Bibliografia

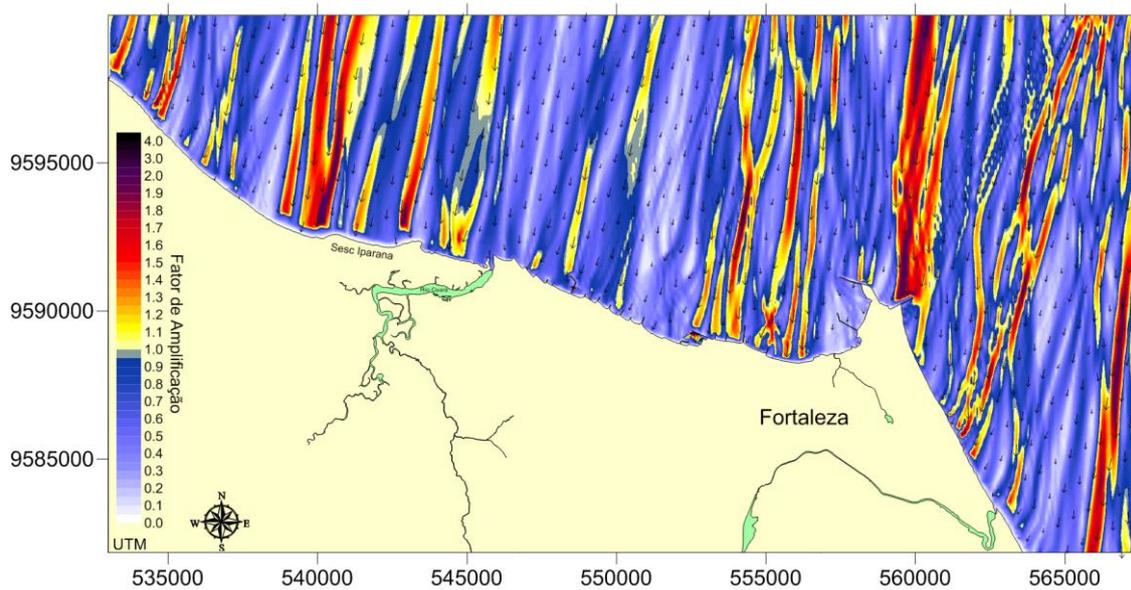
- BMT Fluid Mechanics Limited ©. (2011). *Global Wave Statistics*. Acesso em 04 de 11 de 2013, disponível em Global Wave Statistics: <http://www.globalwavestatisticsonline.com/>
- (26 de Dezembro de 2008). Acesso em 03 de Março de 2014, disponível em SKYSCRAPPERCITY.COM: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=774672>
- Aguiar, L. G. (2006). *EM BUSCA DA FORMA IDEAL DE UM FUNDO ARTIFICIAL PARA SURFE*. Rio de Janeiro.
- Aguiar, L. G. (2011). *DESENVOLVIMENTO DE MODELO NUMÉRICO EXPERIMENTAL DE ESTRUTURAS MARINHAS DE AMPLIFICAÇÃO DE ONDAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*. Rio de Janeiro.
- Aguiar, L. G. (2012). *MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS PARA PROJETO DE ESTRUTURA MARINHA DE AMPLIFICAÇÃO DE ONDAS*. Rio de Janeiro.
- Aguiar, L. G. (2012). *MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS PARA PROJETO DE ESTRUTURA MARINHA DE DISSIPACÃO DE ONDAS*. Rio de Janeiro.
- de Paula, T. P. (2009). *ANÁLISE HIDRODINÂMICA E DE RENOVAÇÃO DE MASSAS D'ÁGUA NA LAGOA RODRIGO DE FREITAS ATRAVÉS DO USO DE MODELAGEM COMPUTACIONAL*. Rio de Janeiro.
- Gestão Costeira Integrada*. (s.d.). Acesso em 30 de 10 de 2013, disponível em <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/esporario.html>
- Machado, B. V., & da Silva, R. M. (2010). *OTIMIZAÇÃO DO EMISSÁRIO DO RIO VERMELHO, SALVADOR – BA, VIA MODELAGEM COMPUTACIONAL*. Rio de Janeiro.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (s.d.). *Site da NOAA*. Acesso em 16 de 10 de 2013, disponível em <http://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves/>

- Netto, E. B., & Zalmon, I. R. (2011). RECIFES ARTIFICIAIS: "ATRAÇÃO VERSUS PRODUÇÃO". *Vértices*, 183-195.
- Oliveira, R. B. (2013). *EVOLUÇÃO BATIMÉTRICA DO BANCO ARENOSO AO LARGO DO PORTO DE MUCURIBE (FORTALEZA - CE)*. Rio de Janeiro.
- Peixoto, R. d., & Duarte, F. T. (2012). *ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PROCESSOS SEDIMENTOLÓGICOS DO CANAL DO MANGUE NO PORTO DO RIO DE JANEIRO COM AUXÍLIO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL*. Rio de Janeiro.
- Rosman , P. C. (s.d.). *SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental*. Acesso em 31 de 10 de 2013, disponível em Site do SisBaHiA: <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>
- Santos, D. H., & Passavante, J. Z. (2007). *RECIFES ARTIFICIAIS MARINHOS: MODELOS E UTILIZAÇÕES NO BRASIL E NO MUNDO*. Pernambuco.
- Site do Sesc do Ceará*. (s.d.). Acesso em 28 de 10 de 2013, disponível em <http://www.sesc-ce.com.br/index.php/quem-somos/1065.html>
- U.S. Army Corps of Engineers. (2002). Estimation of Nearshore Waves. In: U. A. Engineers, *The Coastal Engineering Manual* (pp. 24-26).
- Valentini, E. M. (1994). *AVALIAÇÃO DE PROCESSOS LITORÂNEOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA, CE*. Rio de Janeiro.
- West, A. (Abril de 2002). *WAVE - FOCUSING SURFING REEFS A NEW CONCEPT*. Delft.

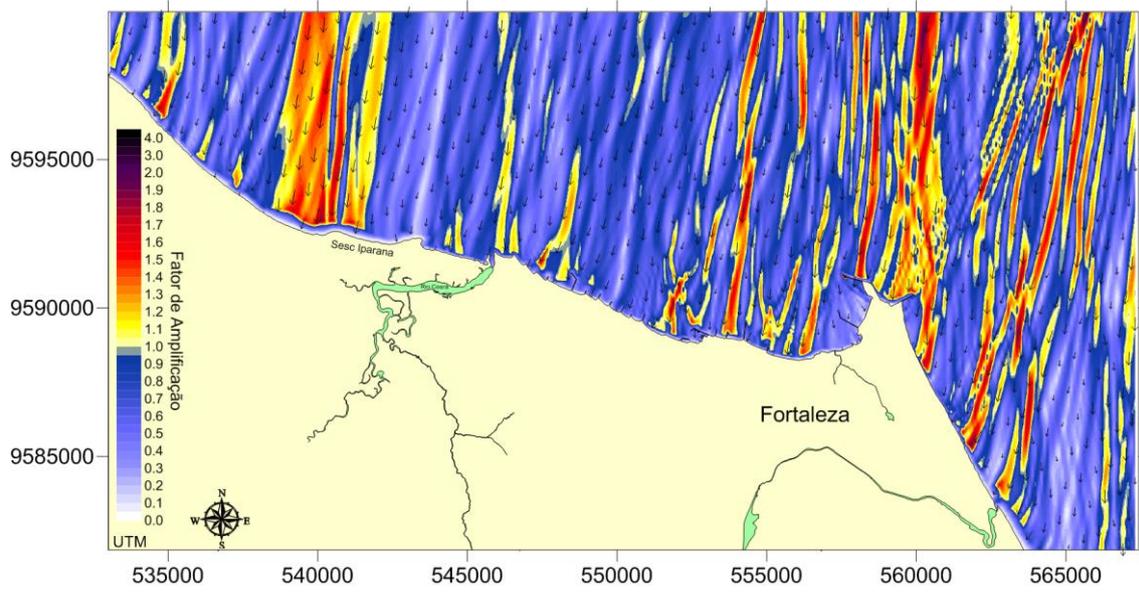
9. Anexo A – Mapas de distribuição dos Fatores de Amplificação e Direção de Propagação de Ondas



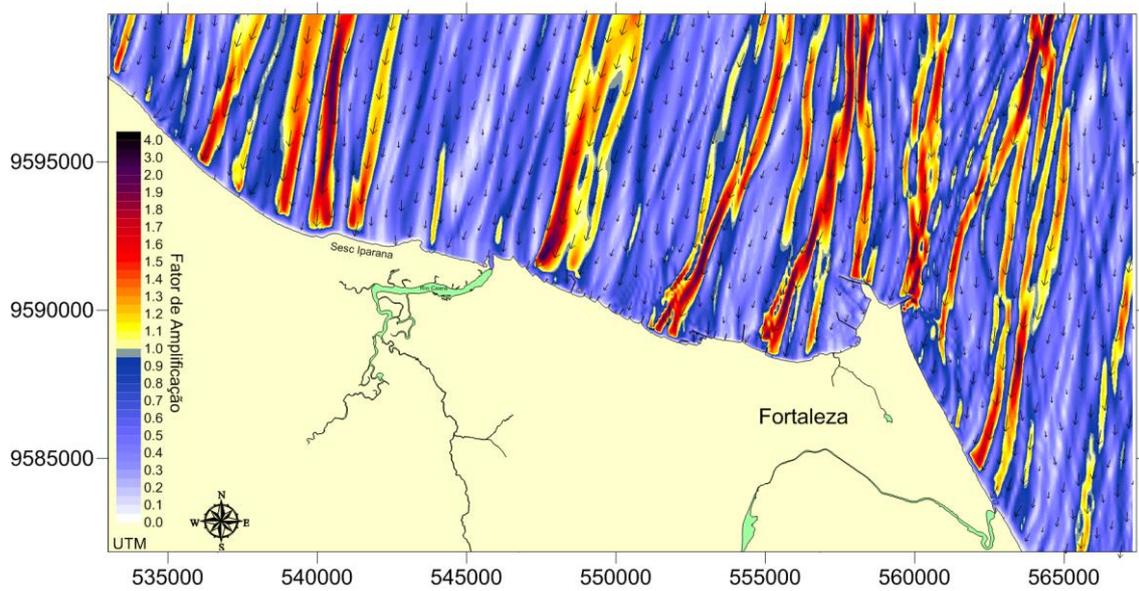
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 0° e período 8 segundos.



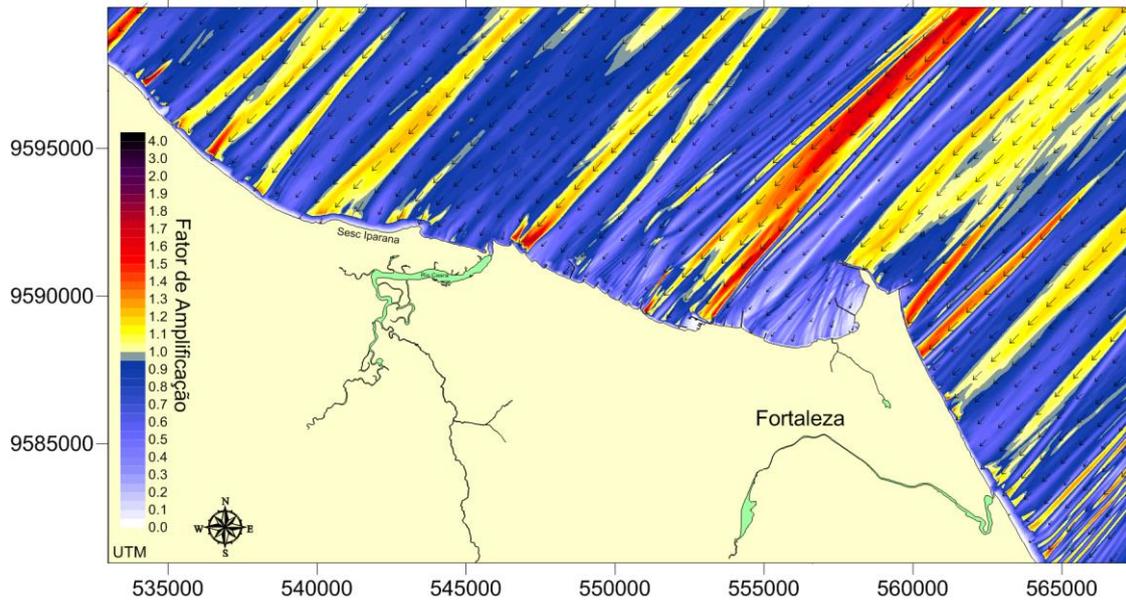
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 0° e período 8 segundos.



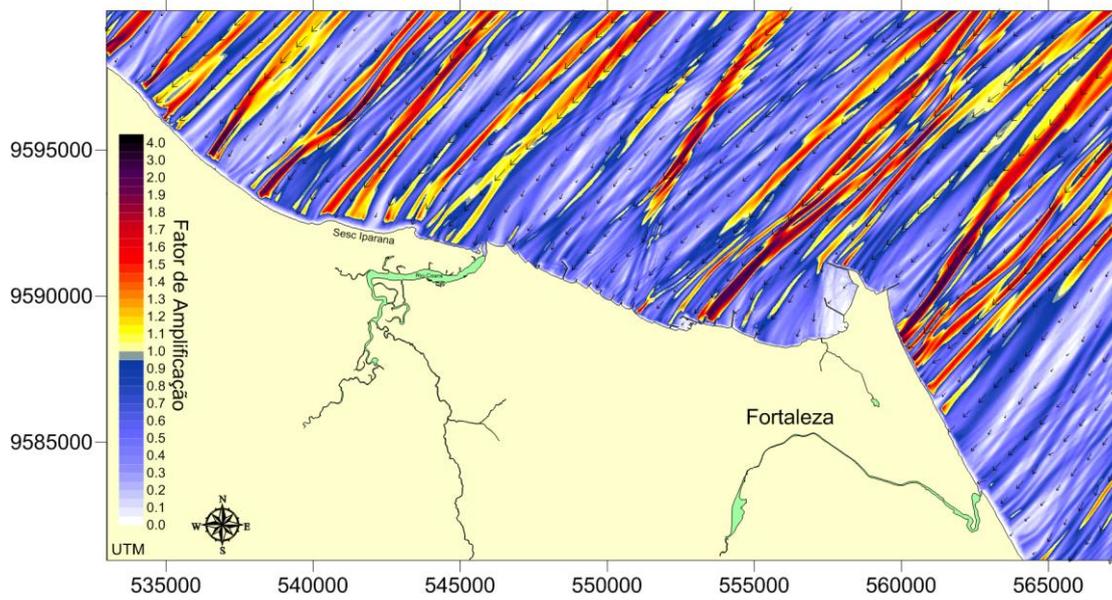
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 0° e período 11 segundos.



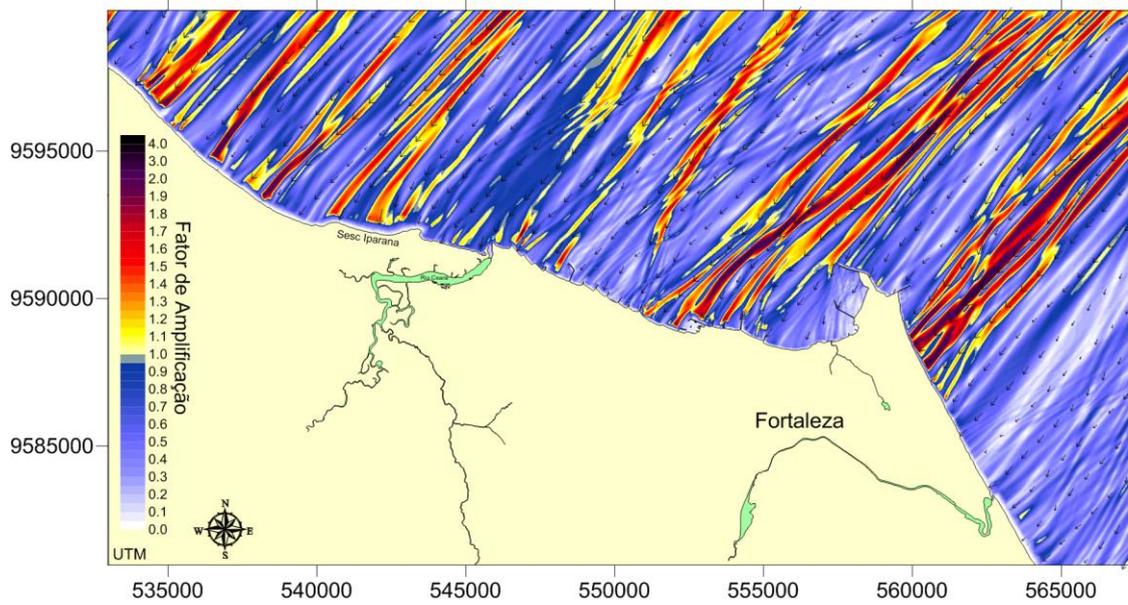
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 0° e período 13 segundos.



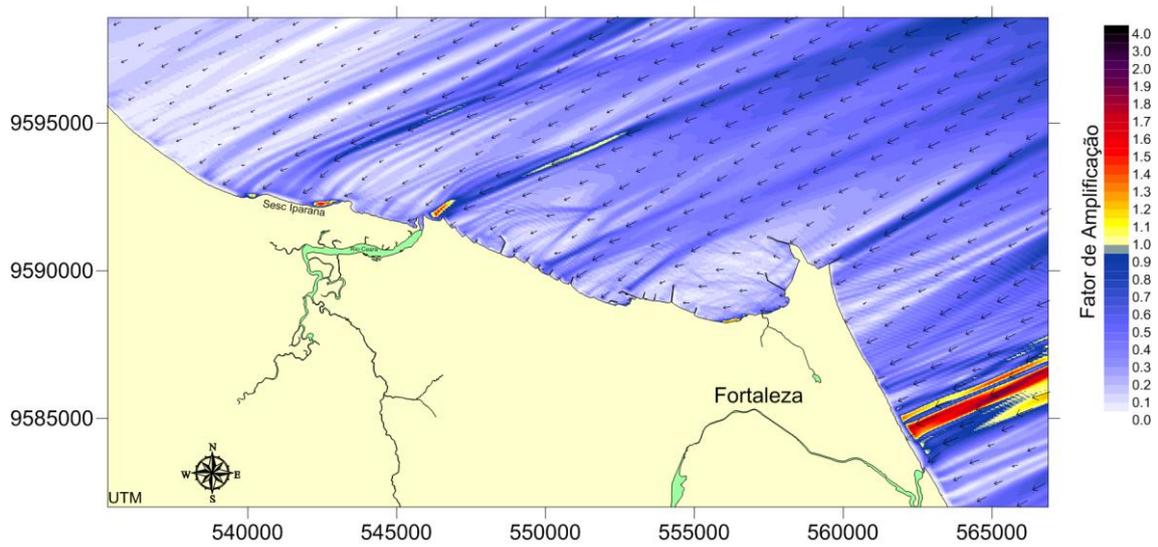
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 45° e período 6 segundos.



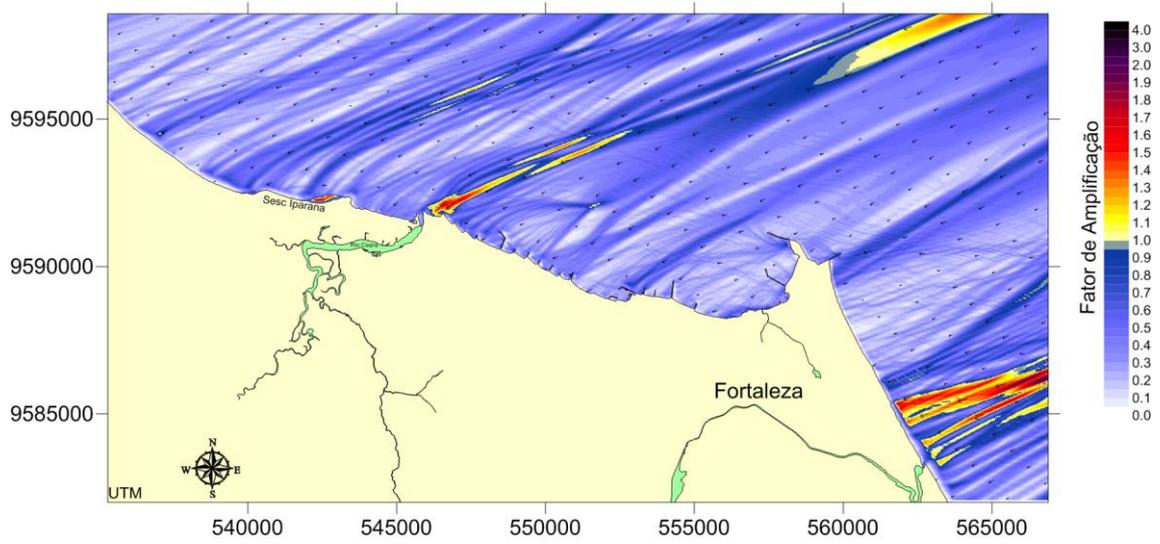
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 45° e período 9 segundos.



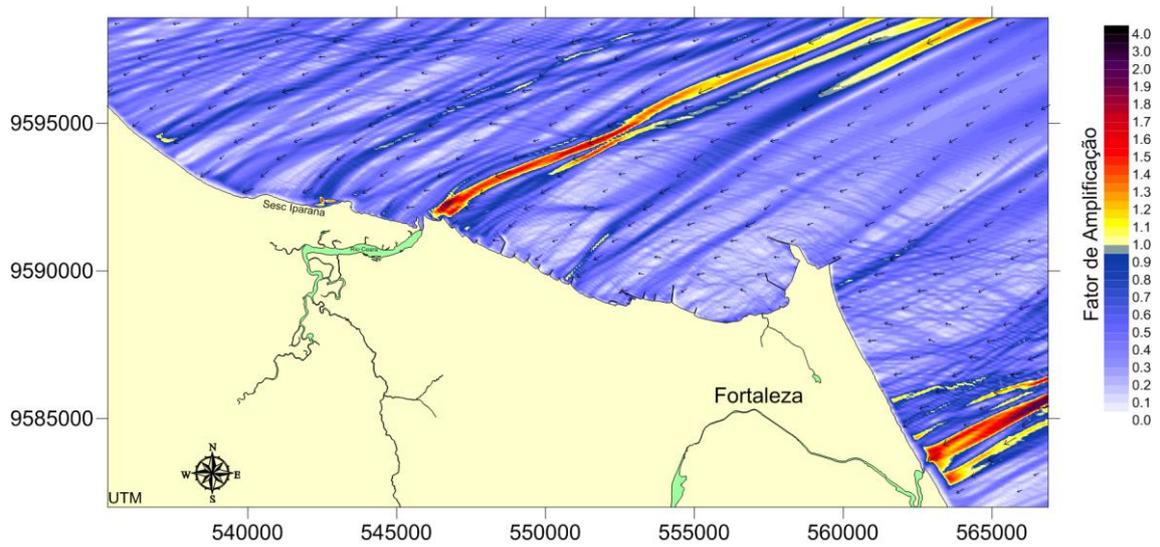
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 45° e período 11 segundos.



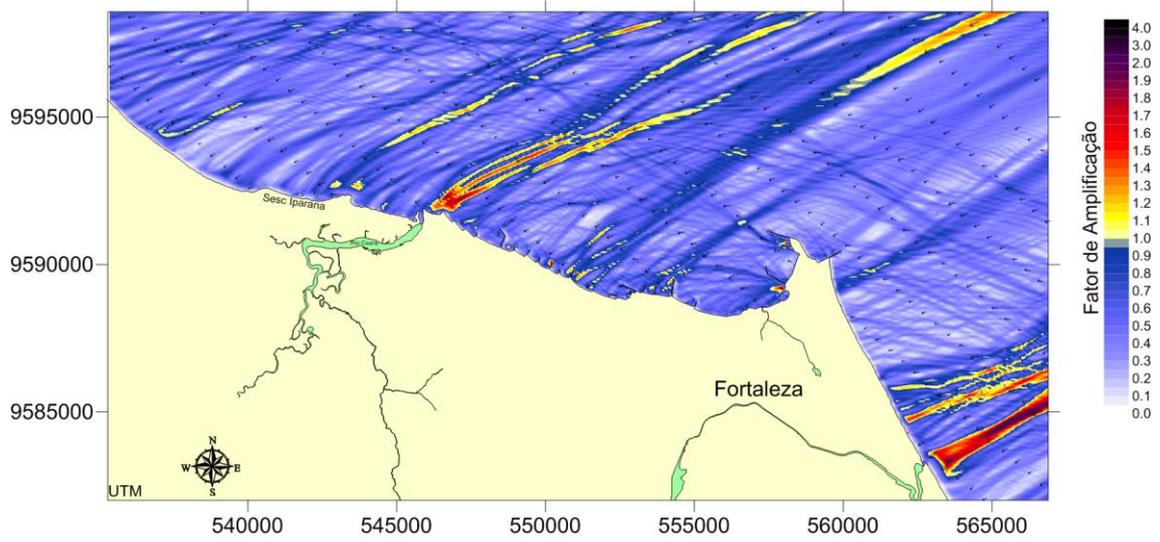
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute $67,5^\circ$ e período 6 segundos.



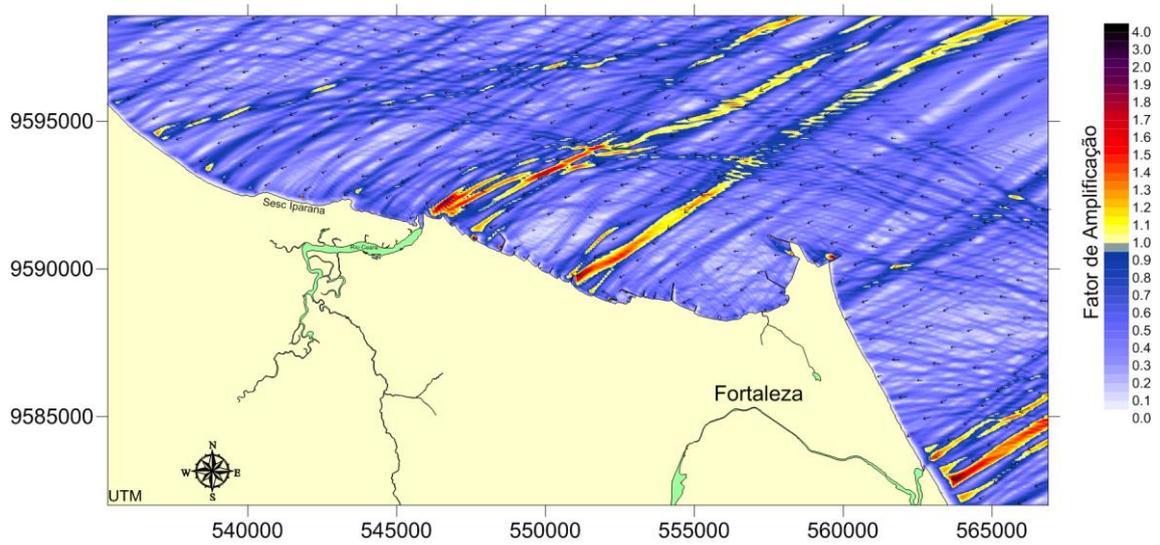
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute $67,5^\circ$ e período 7 segundos.



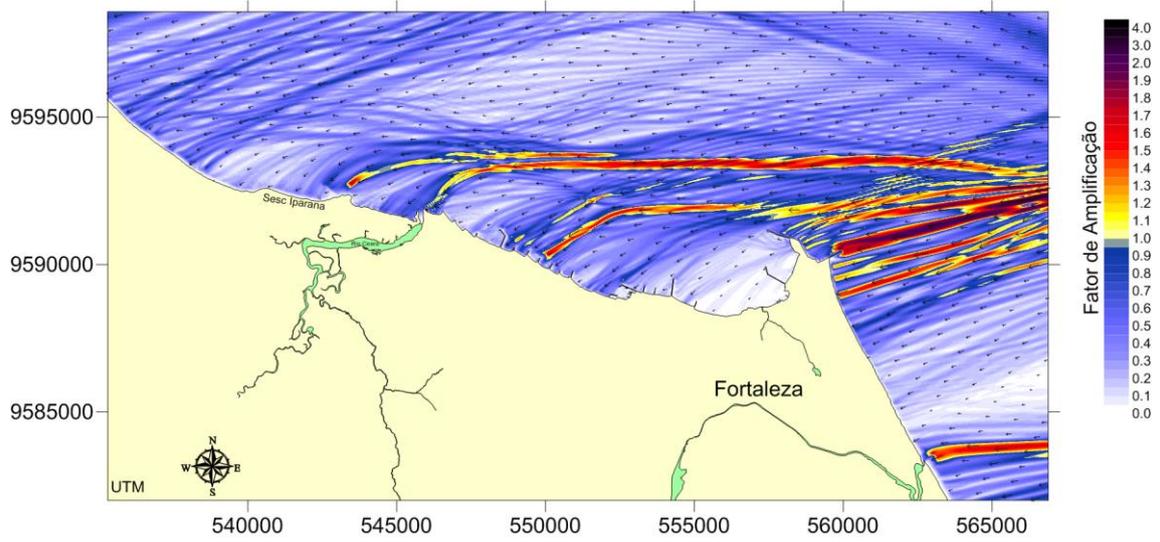
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute $67,5^\circ$ e período 8 segundos.



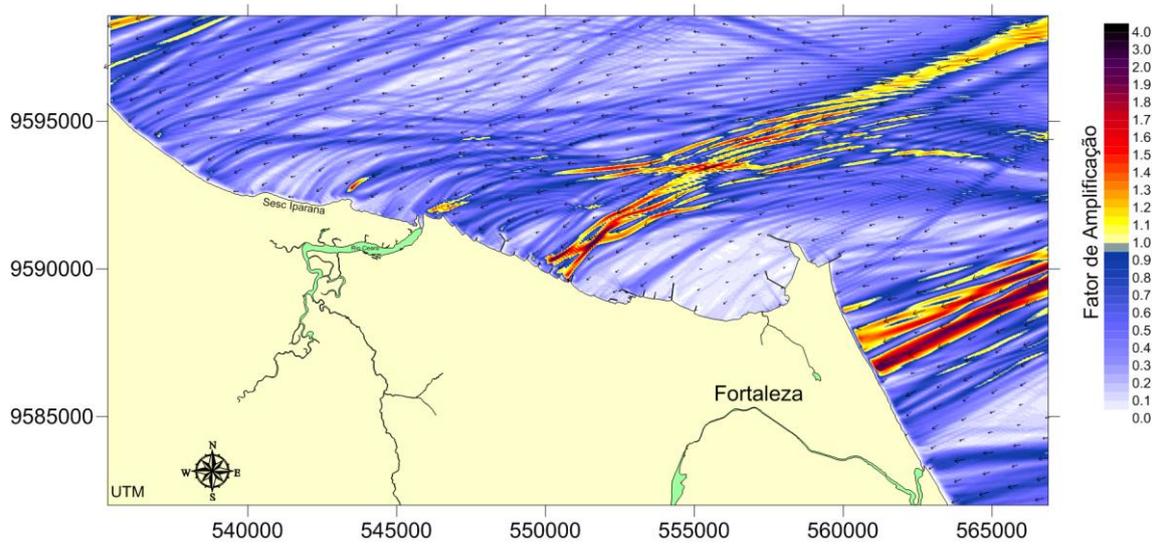
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute $67,5^\circ$ e período 9 segundos.



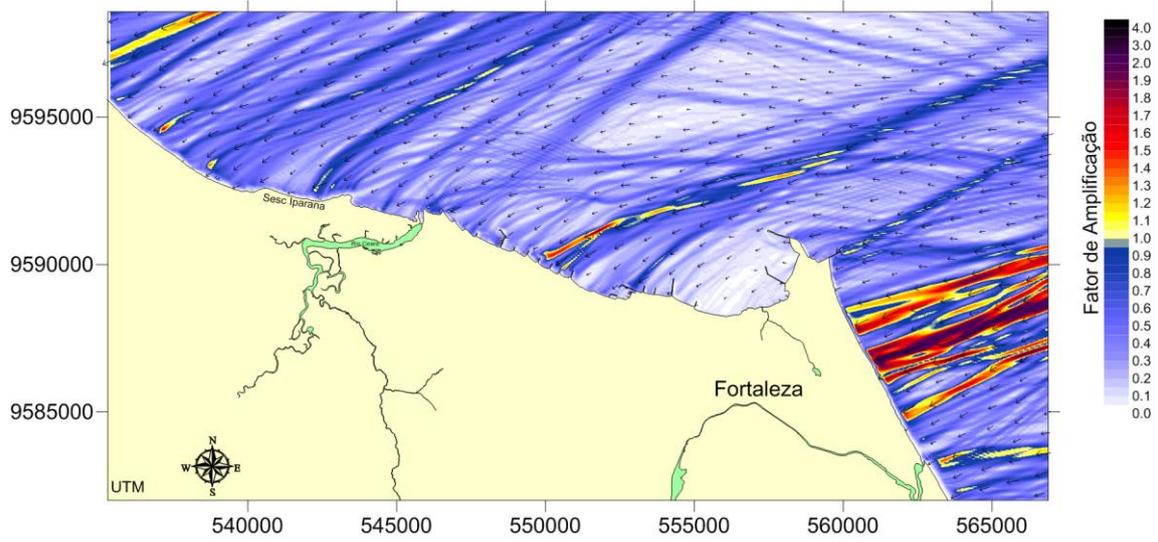
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute $67,5^\circ$ e período 10 segundos.



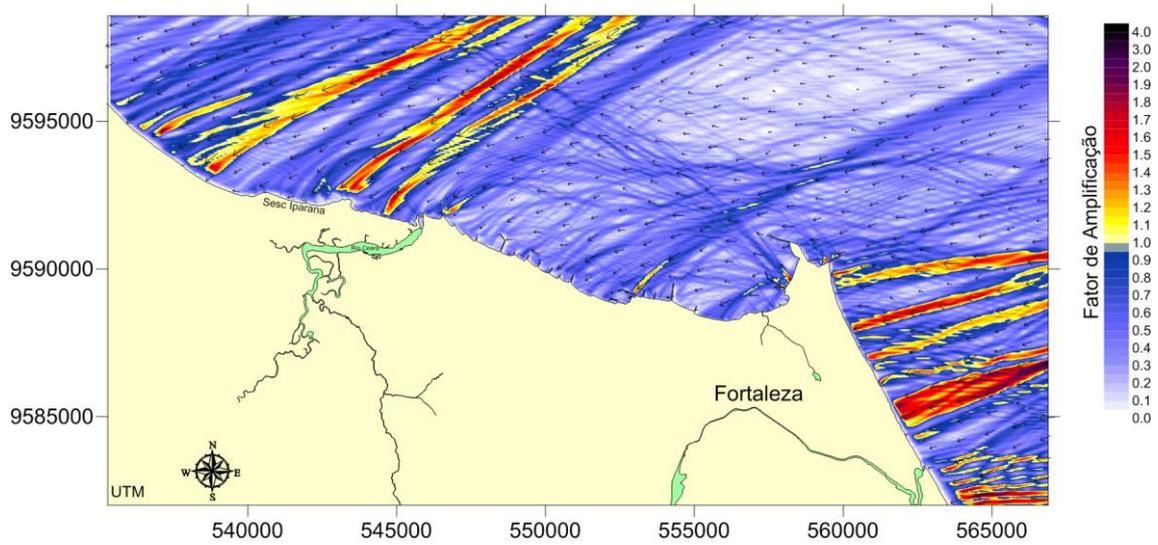
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 90° e período 7 segundos.



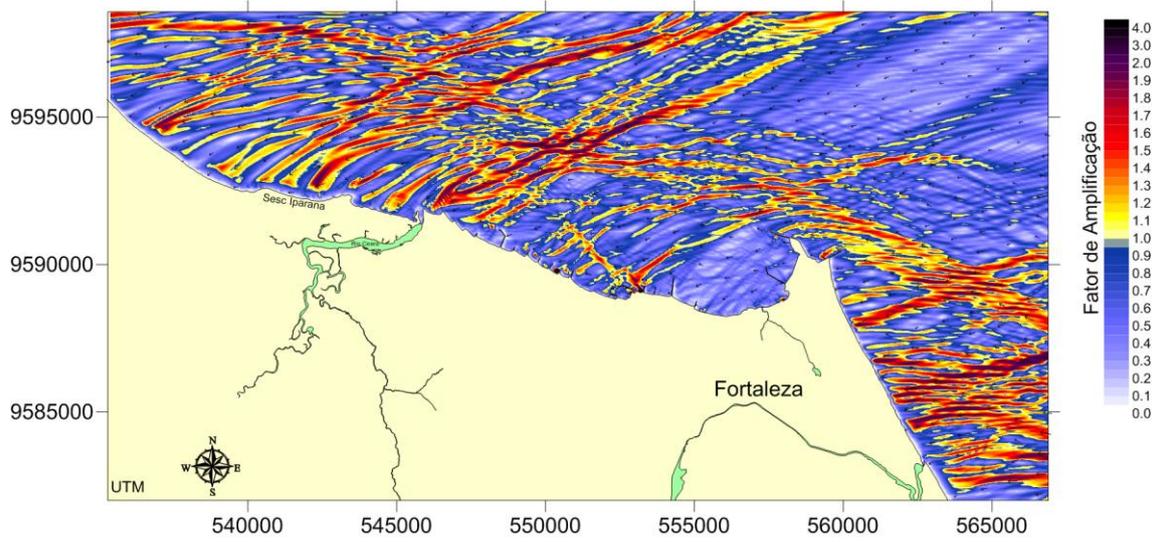
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 90° e período 8 segundos.



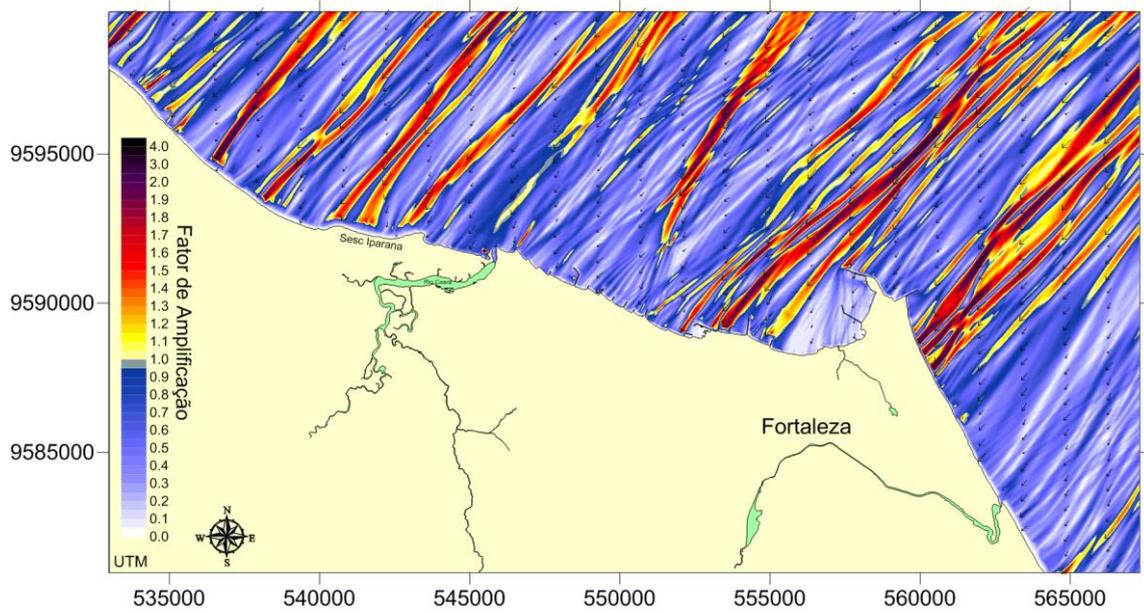
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 90° e período 9 segundos.



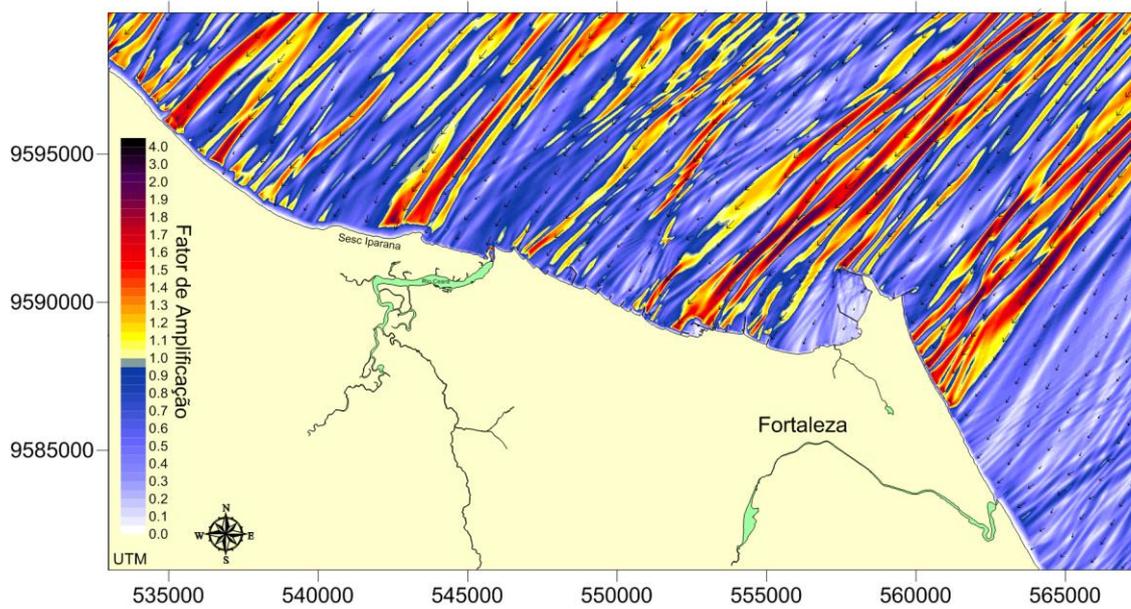
Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 90° e período 10 segundos.



Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 90° e período 12 segundos.

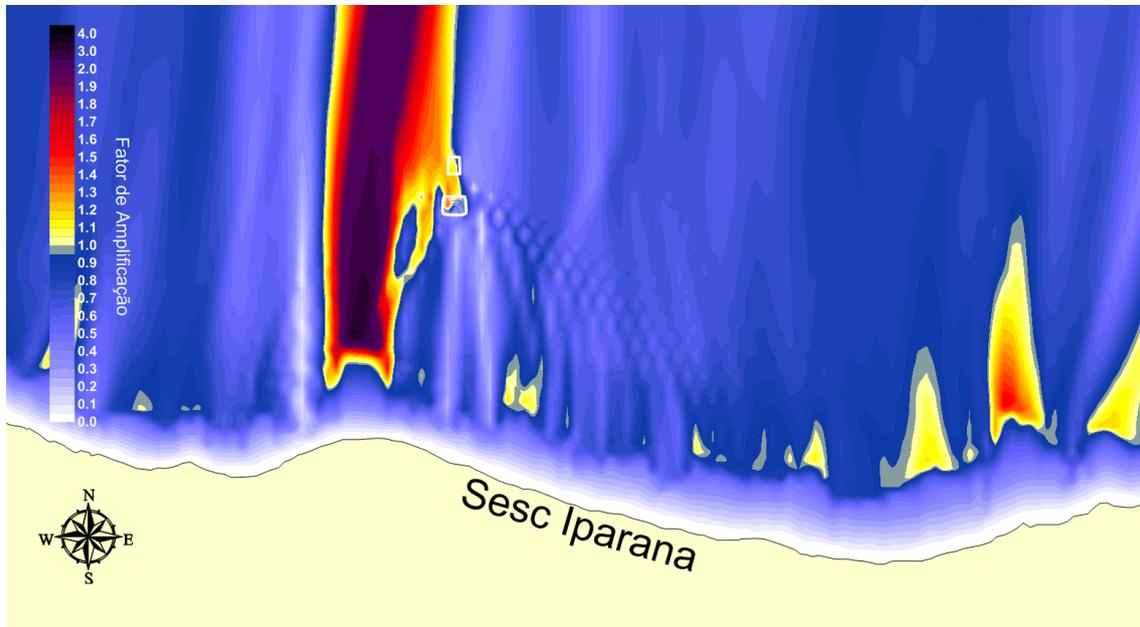


Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 45° e período 10 segundos.

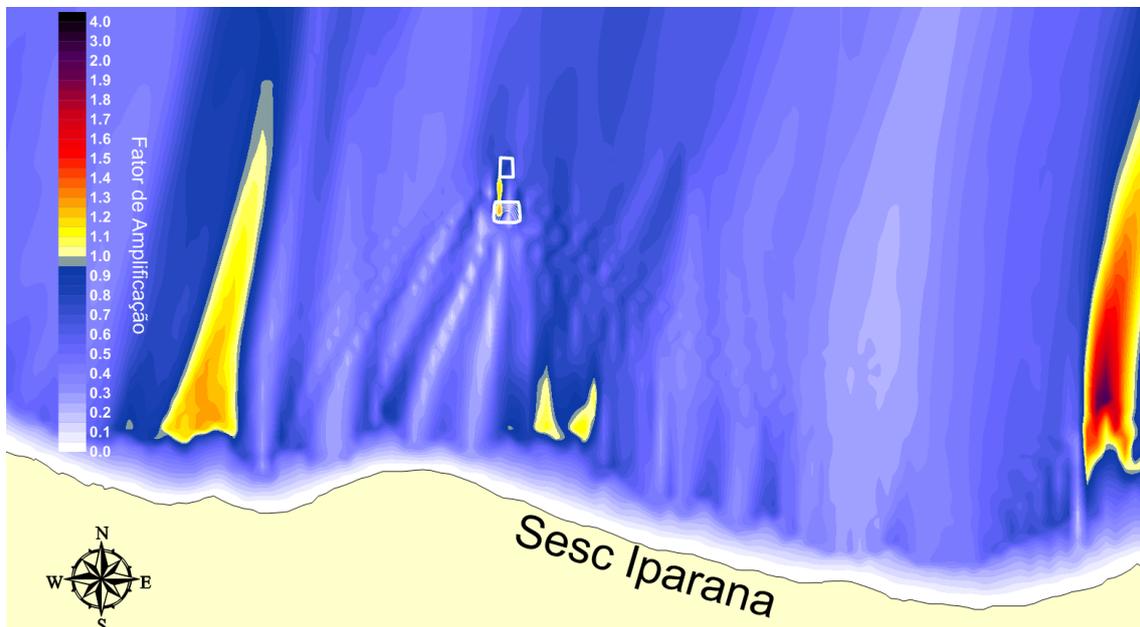


Fator de amplificação e direção de propagação da onda com azimute 45° e período 12 segundos.

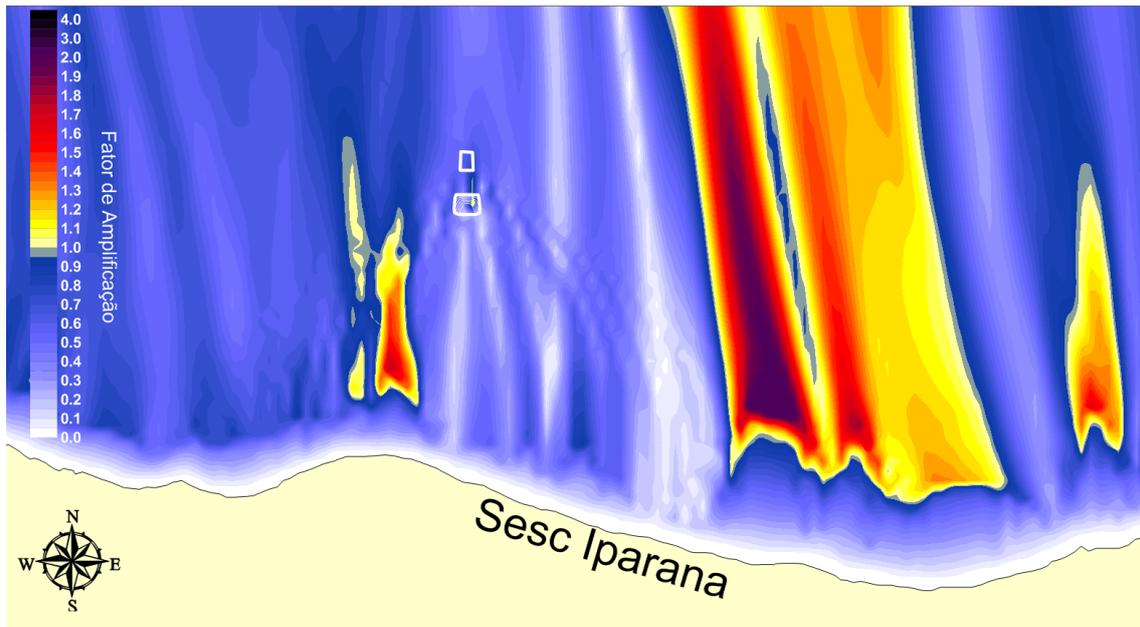
10. Anexo B – Resultados do Modelo de Propagação de Ondas para ondas com azimutes 10° , 0° e 350° com período de 7 segundos



Fator de amplificação da onda com azimute 0° e período 7 segundos sobre o conjunto de arrecifes.



Fator de amplificação da onda com azimute 10° e período 7 segundos sobre o conjunto de arrecifes.



Fator de amplificação da onda com azimute 350° e período 7 segundos sobre o conjunto de arrecifes.