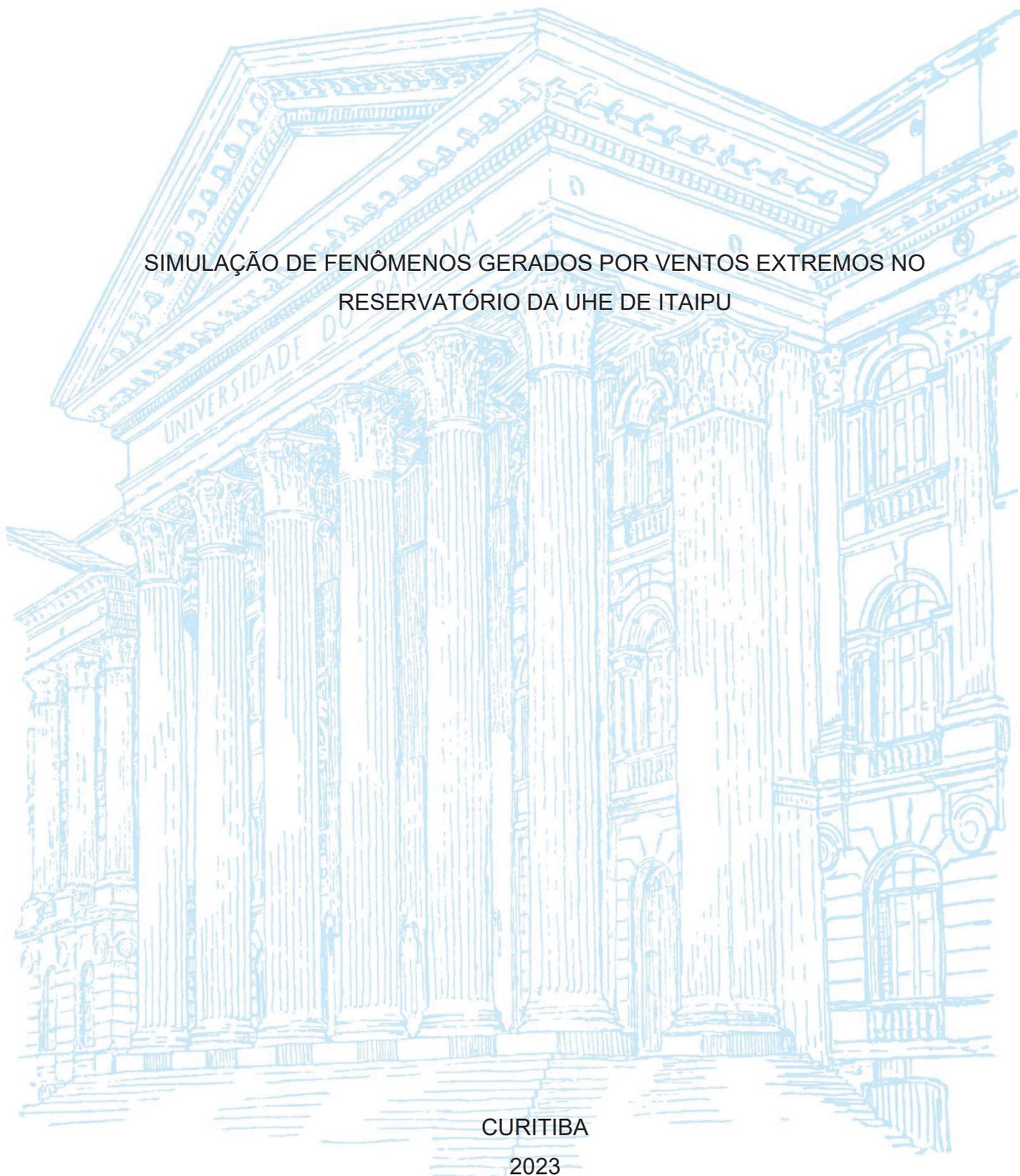


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO ROSOLEM LUCHETTI

SIMULAÇÃO DE FENÔMENOS GERADOS POR VENTOS EXTREMOS NO
RESERVATÓRIO DA UHE DE ITAIPU



CURITIBA

2023

MARCELO ROSOLEM LUCHETTI

SIMULAÇÃO DE FENÔMENOS GERADOS POR VENTOS EXTREMOS NO
RESERVATÓRIO DA UHE DE ITAIPU

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental, Setor de Engenharia e Exatas, Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Doutor em Engenharia e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Jonathan Dieter

CURITIBA

2023

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.
Biblioteca UFPR Palotina.

L936 Luchetti, Marcelo Rosolem
Simulação de fenômenos gerados por ventos extremos
no reservatório da UHE de Itaipu / Marcelo Rosolem Luchetti.
– Curitiba, PR, 2023.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná,
Setor de Engenharia e Exatas, PR, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia e Tecnologia Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Jonathan Dieter.

1. ONDACAD. 2. Ondas. 3. Ventos Severos.
I. Dieter, Jonathan. II. Universidade Federal do Paraná.
III. Título.

CDU 620

Bibliotecária: Aparecida Pereira dos Santos – CRB 9/1653



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **MARCELO ROSOLEM LUCHETTI** intitulada: **SIMULAÇÃO DE FENÔMENOS GERADOS POR VENTOS EXTREMOS NO RESERVATÓRIO DA UHE DE ITAIPU**, sob orientação do Prof. Dr. JONATHAN DIETER, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 18 de Abril de 2023.

Assinatura Eletrônica
18/04/2023 17:03:23.0
JONATHAN DIETER

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
18/04/2023 19:14:40.0

ANDRÉ AGUIAR BATTISTELLI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO OESTE)

Assinatura Eletrônica
20/04/2023 14:36:12.0

ELISANDRO PIRES FRIGO

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
19/04/2023 15:26:23.0

YARA CAMPOS MIRANDA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS)

Assinatura Eletrônica
18/04/2023 17:12:18.0

FLÁVIO CAMARGO CABRERA

Avaliador Externo (UNESP)

Dedico

à minha esposa Tania e aos meus filhos Joaquim e Francisco
aos meus pais, Sebastião (in memoriam) e Izaura

aos meus alunos, aos que foram e aos que serão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por esta conquista! Não há maior recompensa na vida que atingir qualquer objetivo por meio do nosso esforço.

À Universidade Federal Do Paraná/Unioeste e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental.

Aos professores do Departamento de Meio Ambiente da Universidade Estadual de Maringá (Campus Regional de Umuarama), pelo auxílio com a modelagem de ondas através do módulo de ondas SWAN do software Delft3D. Pelas discussões e sugestões que tanto enriqueceram esse trabalho, e por disponibilizar o programa computacional ONDACAD.

A professora Yara Campos Miranda e seu esposo Francisco Ferreira Martins Neto pelas valiosas sugestões durante a parte qualitativa desta pesquisa.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Jonathan Dieter pela orientação e incentivo na realização deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, me apoiaram e auxiliaram na execução desta pesquisa.

A minha esposa Tania, que aceitou o desafio de embarcar nesta jornada comigo e ao mesmo tempo cuidar do nosso primogênito Joaquim, que nasceu no mesmo mês que saiu o resultado do processo seletivo para seleção dos candidatos a este programa de Pós-Graduação. Iniciamos em três, eu, você, e o Joaquim e estamos chegando ao final desta jornada em quatro. A conclusão dessa Tese coincide com o nascimento do Francisco e representa o início de uma nova etapa em nossas vidas. O melhor está por vir!!!

RESUMO

Esta pesquisa visa demonstrar que o campo de ondas gerado por ventos persistentes em águas continentais pode ser obtido exclusivamente com a utilização da intensidade do vento atuante e com a geometria do corpo d'água. Este objetivo foi alcançado aplicando o conceito do campo de *fetch* a aplicação da técnica de Modelagem Paramétrica Bidimensional (MPB) que relaciona a altura da onda ao comprimento do *fetch* e à intensidade do vento, o qual possibilitou determinar um modelo paramétrico específico para o reservatório de Itaipu, denominado modelo ITAIPU. Os modelos paramétricos encontrados na literatura se limitam a coeficientes constantes. Na obtenção do modelo ITAIPU, foi evidenciado que estes coeficientes são dependentes da intensidade do vento, portanto, são variáveis. Este fato elucidou a variabilidade entre os resultados de métodos paramétricos apresentados na literatura e contribuiu para a geração de campos de onda similares aos gerados pelo modelo *SWAN*. Foram simulados três elementos para o modelo de ITAIPU: (i) os campos de *fetch*; (ii) as alturas de ondas e (iii) a profundidade de mistura, ou seja, a profundidade atingida pelas ondas ao se propagar, todos provenientes de 16 direções. Foram, portanto, gerados 216 mapas temáticos de simulação para o reservatório da UHE de Itaipu. A grande quantidade de mapas gerados fornece dados de entrada para diversas utilidades em áreas do conhecimento como Engenharia, Ciências da Terra, Ciências Costeiras e Ecologia. Estas áreas do conhecimento podem se beneficiar do acesso ao modelo paramétrico ITAIPU.

Palavras-chave: Ventos Severos. Ondas. *SWAN*. *ONDACAD*. *Fetch*.

ABSTRACT

This research aims to investigate that the wave field of generators by persistent winds in continental waters can be used exclusively with the intensity of the active wind and with the geometry of the body of water. This objective was achieved by applying the concept of the *fetch* field to the application of the Two-Dimensional Parametric Modeling (MPB) technique that relates the wave height to the *fetch* length and the wind intensity, which made it possible to determine a specific parametric model for the water reservoir. Itaipu, called the ITAIPU model. The parametric models found in the literature are limited to constant coefficients. In obtaining the ITAIPU model, it was evidenced that these coefficients are dependent on the wind intensity, therefore, they are variable. This fact elucidates the variability between the results of parametric methods presented in the literature and contributes to the generation of wave fields similar to those generated by the SWAN model. Three elements were simulated for the ITAIPU model: (i) the *fetch* fields; (ii) the wave heights and (iii) the mixing depth, that is, the depth reached by the waves when propagating, all coming from 16 directions. Therefore, 216 thematic simulation maps were generated for the Itaipu UHE reservoir. The large amount of generated maps provides input data for various uses in areas of knowledge such as Engineering, Earth Sciences, Coastal Sciences and Ecology. These areas of knowledge can benefit from access to the ITAIPU parametric model.

Keywords: *Severe Winds. Waves. SWAN. ONDACAD. Fetch.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - <i>FETCH</i> NA DIREÇÃO NORTE..... | 36 |
| FIGURA 2 - ESQUEMA DE <i>FETCH</i> EFETIVO PARA A DIREÇÃO NORTE..... | 37 |
| FIGURA 3 - GERAÇÃO DE ONDAS PELO VENTO | 40 |
| FIGURA 4 - MODELO DE ONDAS OCEÂNICAS | 42 |
| FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DE UMA ONDA | 46 |
| FIGURA 6 - LOCALIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO DE ITAIPU | 54 |
| FIGURA 7 - VISTA ÁREA (ESQUERDA) E VISTA FRONTAL DA BARRAGEM DE ITAIPU (DIREITA)..... | 56 |
| FIGURA 8 - VERTEDOURO | 57 |
| FIGURA 9 - CASA DE FORÇA (ESQUERDA) E TURBINA (DIREITA) | 58 |
| FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL | 62 |
| FIGURA 11 - DETALHE DOS ELEMENTOS GRÁFICOS ENVOLVIDOS NA EXECUÇÃO DO MODELO | 65 |
| FIGURA 12 - AMPLIAÇÃO DE PARTE DA FIGURA 11 | 66 |
| FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO GEOREFERENCIADA DO RESERVATÓRIO DE ITAIPU..... | 69 |
| FIGURA 14 - MALHA NUMÉRICA..... | 71 |
| FIGURA 15 - ESTRUTURA DOS DADOS EM FORMATO ASCII..... | 73 |
| FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO DO <i>FETCH</i> PARA DIREÇÃO NOR-NORDESTE | 73 |
| FIGURA 17 - EQUAÇÕES BASE DO MODELO <i>SWAN</i> | 74 |
| FIGURA 18 - DIAGRAMA ADIMENSIONAL DE <i>FETCH</i> VERSUS ALTURA DE ONDA..... | 75 |
| FIGURA 19 - CAMPOS DE <i>FETCH</i> DE ITAIPU PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE E NNE..... | 79 |
| FIGURA 20 - CAMPOS DE <i>FETCH</i> DE ITAIPU PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW E WNW..... | 80 |
| FIGURA 21 - CAMPOS DE <i>FETCH</i> DE ITAIPU PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW E SSW..... | 81 |
| FIGURA 22 - CAMPOS DE <i>FETCH</i> DE ITAIPU PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE E ESE | 82 |
| FIGURA 23 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA VENTOS DE 5, 10, 15 E 20 MS ⁻¹ NA DIREÇÃO NNE OBTIDOS PELO MODELO <i>SWAN</i> | 84 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 24 - DIAGRAMA ADIMENSIONAL..... | 85 |
| FIGURA 25 - CURVAS OBTIDAS COM AS EQUAÇÕES DE COEFICIENTES | 88 |
| FIGURA 26 - MAPAS DE ALTURA DE ONDA PARA VENTOS 5 E 10 MS ⁻¹ OBTIDOS PELOS MODELOS SWAN (ESQUERDA) e ITAIPIU (DIREITA). | 90 |
| FIGURA 27 - MAPAS DE ALTURA DE ONDA PARA VENTOS 15 E 20 MS ⁻¹ OBTIDOS PELOS MODELOS SWAN (ESQUERDA) e ITAIPIU (DIREITA). | 91 |
| FIGURA 28 - MAPA DE DESVIO ENTRE OS MODELO SWAN E ITAIPIU PARA VENTO DE 5 MS ⁻¹ | 92 |
| FIGURA 29 - MAPA DE DESVIO ENTRE OS MODELO SWAN E ITAIPIU PARA VENTO DE 10 MS ⁻¹ | 93 |
| FIGURA 30 - MAPA DE DESVIO ENTRE OS MODELO SWAN E ITAIPIU PARA VENTO DE 15 MS ⁻¹ | 94 |
| FIGURA 31 - MAPA DE DESVIO ENTRE OS MODELO SWAN E ITAIPIU PARA VENTO DE 20 MS ⁻¹ | 95 |
| FIGURA 32 - COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS PARAMÉTRICOS PARA INTENSIDADE DO VENTO DE 5 MS ⁻¹ | 103 |
| FIGURA 33 - COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS PARAMÉTRICOS PARA INTENSIDADE DO VENTO DE 10 MS ⁻¹ | 104 |
| FIGURA 34 - COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS PARAMÉTRICOS PARA INTENSIDADE DO VENTO DE 15 MS ⁻¹ | 105 |
| FIGURA 35 - COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS PARAMÉTRICOS PARA INTENSIDADE DO VENTO DE 20 MS ⁻¹ | 105 |
| FIGURA 36 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 22,8 MS ⁻¹ (TR=10 ANOS) | 108 |
| FIGURA 37 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 22,8 MS ⁻¹ (TR=10 ANOS) | 109 |
| FIGURA 38 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 22,8 MS ⁻¹ (TR=10 ANOS)..... | 110 |
| FIGURA 39 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 22,8 MS ⁻¹ (TR=10 ANOS)..... | 111 |
| FIGURA 40 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 26,4 MS ⁻¹ (TR=20 ANOS) | 112 |
| FIGURA 41 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 26,4 MS ⁻¹ (TR=20 ANOS) | 113 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 42 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 26,4 MS ⁻¹ (TR=20 ANOS)..... | 114 |
| FIGURA 43 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 26,4 MS ⁻¹ (TR=20 ANOS)..... | 115 |
| FIGURA 44 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS ⁻¹ (TR=50 ANOS)..... | 116 |
| FIGURA 45 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS ⁻¹ (TR=50 ANOS)..... | 117 |
| FIGURA 46 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS ⁻¹ (TR=50 ANOS)..... | 118 |
| FIGURA 47 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS ⁻¹ (TR=50 ANOS)..... | 119 |
| FIGURA 48 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 47,8 MS ⁻¹ (TR=100 ANOS)..... | 120 |
| FIGURA 49 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 47,8 MS ⁻¹ (TR=100 ANOS)..... | 121 |
| FIGURA 50 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 47,8 MS ⁻¹ (TR=100 ANOS)..... | 122 |
| FIGURA 51 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 47,8 MS ⁻¹ (TR=100 ANOS)..... | 123 |
| FIGURA 52 - REPRESENTAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE MISTURA PARA ONDAS DE COMPRIMENTO L..... | 125 |
| FIGURA 53 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 22,8 MS ⁻¹ (TR=10 ANOS)..... | 128 |
| FIGURA 54 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 22,8 MS ⁻¹ (TR=10 ANOS)..... | 129 |
| FIGURA 55 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 22,8 MS ⁻¹ (TR=10 ANOS)..... | 130 |
| FIGURA 56 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 22,8 MS ⁻¹ (TR=10 ANOS)..... | 131 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 57 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 26,4 MS ⁻¹ (TR=20 ANOS)..... | 132 |
| FIGURA 58 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 26,4 MS ⁻¹ (TR=20 ANOS)..... | 133 |
| FIGURA 59 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 26,4 MS ⁻¹ (TR=20 ANOS)..... | 134 |
| FIGURA 60 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 26,4 MS ⁻¹ (TR=20 ANOS)..... | 135 |
| FIGURA 61 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS ⁻¹ (TR=50 ANOS)..... | 136 |
| FIGURA 62 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS ⁻¹ (TR=50 ANOS)..... | 137 |
| FIGURA 63 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS ⁻¹ (TR=50 ANOS)..... | 138 |
| FIGURA 64 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS ⁻¹ (TR=50 ANOS)..... | 139 |
| FIGURA 65 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 47,8 MS ⁻¹ (TR=100 ANOS)..... | 140 |
| FIGURA 66 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 47,8 MS ⁻¹ (TR=100 ANOS)..... | 141 |
| FIGURA 67 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 47,8 MS ⁻¹ (TR=100 ANOS)..... | 142 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 68 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 47,8 MS ⁻¹ (TR=100 ANOS)..... | 143 |
|---|-----|

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| GRAFICO 1 - INTENSIDADE DO VENTO X ALFA..... | 86 |
| GRÁFICO 2 - INTENSIDADE DO VENTO X BETA | 86 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| QUADRO 1 - RESUMO DAS PRINCIPAIS POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DO MODELO SWAN | 51 |
|--|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| TABELA 1 - ESCALA BEAUFORT DE VELOCIDADES DO VENTO E ONDAS..... | 44 |
| TABELA 2 - ESPECIFICAÇÕES DOS ANEMÔMETROS DO SIMEPAR | 60 |
| TABELA 3 - VENTOS SEVEROS RELACIONADOS A PERÍODOS DE RETORNO | 60 |
| TABELA 4 - MAIORES COMPRIMENTOS DE <i>FETCH</i> PARA CADA DIREÇÃO..... | 83 |
| TABELA 5 - MAIORES ALTURAS DE ONDA PELO MODELO SWAN PARA A DIREÇÃO NNE | 85 |
| TABELA 6 - COEFICIENTES ALFA E BETA | 87 |
| TABELA 7 - POSIÇÃO RELATIVA DAS CURVAS PARA CADA INTENSIDADE DO VENTO | 106 |
| TABELA 8 - MAIORES ALTURAS DE ONDAS..... | 124 |
| TABELA 9 - MAIORES PROFUNDIDADES DE MISTURA PARA CADA DIREÇÃO | 144 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|----------|--|
| ABNT | - Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| CDA | - Associação Canadense de Barragens |
| GWh | - Gigawatts-hora |
| GMT | - Tempo Médio de Greenwich |
| INPE | - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| JONSWAP | - Acrônimo em inglês para <i>Joint North Sea Wave Project</i> |
| LISP | - Acrônimo em inglês para <i>List Processing</i> |
| MPB | - Modelagem Paramétrica Bidimensional |
| MW | - Megawatt |
| NCEP | - <i>National Centers for Environmental Prediction</i> |
| NOAA | - <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> |
| PFM | - Profundidade de mistura |
| PM | - Modelo de concepção espectral <i>Pierson e Moskowitz</i> |
| PR | - Referência ao Estado do Paraná |
| RPM | - Rotação por minuto |
| SMB | - Acrônimo referente às iniciais dos sobrenomes dos idealizadores do método (Sverdrup, Munk e Bretschneider) |
| SPM | - Referência à publicação norte americana <i>Shore Protection Manual</i> |
| SWAN | - Acrônimo em inglês para <i>Simulating Waves Nearshore</i> |
| TR | - Período de retorno |
| TU Delft | - <i>Delft University of Technology</i> |
| UEM | - Universidade Estadual de Maringá |
| UHE | - Usina Hidrelétrica |
| UTM | - <i>Universal Transversa de Mercator</i> |
| WAM | - <i>Wave Model</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

α - Alfa

A - Amplitude da onda

β - Beta

c - Velocidade da onda

CO₂ - Dióxido de carbono

d - Profundidade da onda

Dir - Direção média da onda

DirP - Direção de pico da onda

E* - Energia adimensional da onda

E - Energia da onda

f - Frequência da onda

F - Comprimento do *fetch*

F* - *Fetch* adimensional

g - Aceleração da gravidade

H - Altura da onda

H* - Altura adimensional da onda

H_{1/3} - Altura significativa da onda

H_s - Altura significativa da onda em metros

k - Número de onda

Kg/m³ - Massa específica da água

L - Comprimento da onda

m³/s - Metro cúbico por segundo

η - Elevação da onda

s - Frequência angular da onda

S_{ds} - Perdas dissipativas de energia pela onda

S_{in} - Incorporação de energia pela onda devido ao vento

S_{nl} - Deslocamentos de energia no interior do espectro pelas interações entre ondas

t - Duração do vento

T - Período da onda

T_m - Período médio da onda

T_p - Período de pico da onda

T_s - Período significativo da onda em segundos

U - Intensidade/Velocidade do vento

x - Comprimento projetado na direção de propagação da onda

y - Comprimento na projeção perpendicular à direção de propagação da onda

ω - Frequência angular

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 21 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 23 |
| 1.1.1 | Transporte fluvial | 24 |
| 1.1.2 | Exploração da aquicultura | 25 |
| 1.1.3 | Processos de transporte de sedimentos e erosão das margens | 26 |
| 1.1.4 | Controle de taludes de barragens | 27 |
| 1.1.5 | Monitoramento dos níveis de água do reservatório | 28 |
| 1.1.6 | Interferência na dinâmica dos ecossistemas aquáticos | 29 |
| 1.1.7 | Emissão de CO ₂ | 31 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 32 |
| 1.3 | INOVAÇÃO CIENTÍFICA | 32 |
| 1.4 | ORGANIZAÇÃO DA TESE | 33 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 35 |
| 2.1 | FETCH | 35 |
| 2.2 | ONDAS | 37 |
| 2.2.1 | Altura de ondas | 38 |
| 2.2.2 | Profundidade atingida pelas ondas ao se propagar | 39 |
| 2.3 | VENTO | 40 |
| 2.4 | MODELOS DE ALTURA DE ONDAS | 41 |
| 2.4.1 | Método de Beaufort | 43 |
| 2.4.2 | Modelos Paramétricos | 44 |
| 2.4.3 | Modelos Estatísticos | 46 |
| 2.4.4 | Modelos Numéricos | 48 |
| 2.4.4.1 | <i>Modelo Numérico SWAN</i> | 50 |
| 2.4.4.2 | <i>Modelo Numérico DELFT3D</i> | 51 |
| 3 | MATERIAIS | 53 |
| 3.1 | RESERVATÓRIO DE ITAIPU | 53 |
| 3.1.1 | Localização e características do reservatório da UHE de Itaipu | 53 |
| 3.1.2 | Barragem | 56 |
| 3.1.3 | Vertedouro | 56 |
| 3.1.4 | Casa de força e turbina | 57 |
| 3.1.5 | Bacia hidrográfica | 58 |
| 3.1.6 | Clima | 59 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.1.7 | Vento | 59 |
| 3.2 | GEOPROCESSAMENTO DAS MARGENS | 61 |
| 3.3 | MODELOS COMPUTACIONAIS | 63 |
| 3.3.1 | SWAN | 63 |
| 3.3.2 | ONDACAD | 63 |
| 4 | MÉTODO | 68 |
| 4.1 | OBTENÇÃO DO MAPA DA UHE DE ITAIPU | 68 |
| 4.2 | REALIZAÇÃO DO GEOREFERENCIAMENTO | 68 |
| 4.3 | CONFECÇÃO DA MALHA NUMÉRICA | 70 |
| 4.4 | OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO PARAMÉTRICA | 72 |
| 4.4.1 | Obtenção do campo de <i>fetch</i> pelo modelo ONDACAD | 72 |
| 4.4.2 | Simulação dos campos de ondas pelo modelo SWAN | 74 |
| 4.4.3 | Obtenção da equação paramétrica de altura de ondas | 75 |
| 4.5 | VALIDAÇÃO DO MODELO | 77 |
| 5 | RESULTADOS | 78 |
| 5.1 | CAMPOS DE FETCH | 78 |
| 5.2 | ALTURA DE ONDAS PELO MODELO SWAN | 83 |
| 5.3 | DETERMINAÇÃO DO MODELO PARAMÉTRICO PARA ITAIPU | 85 |
| 5.4 | VALIDAÇÃO DO MODELO DE ITAIPU | 88 |
| 5.4.1 | Alturas de ondas pelos modelos SWAN e ITAIPU | 89 |
| 5.4.2 | Mapas de desvio entre os modelos SWAN e ITAIPU | 92 |
| 5.5 | ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS PARAMÉTRICOS | 96 |
| 5.5.1 | Modelo SMB | 96 |
| 5.5.2 | Modelo de SAVILLE | 98 |
| 5.5.3 | Modelo de WILSON | 99 |
| 5.5.4 | Modelo de FALVEY | 100 |
| 5.5.5 | Modelo JONSWAP | 100 |
| 5.5.6 | Modelo MARQUES | 101 |
| 5.5.7 | Modelo ITAIPU | 102 |
| 5.5.8 | Comparação entre os métodos | 102 |
| 5.6 | APLICAÇÃO DO MODELO ITAIPU | 107 |
| 5.6.1 | Altura de ondas | 107 |
| 5.6.2 | Profundidade de mistura | 125 |
| 6 | CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS | 145 |

| | |
|---|------------|
| REFERÊNCIAS..... | 148 |
| ANEXO 1 - MAPAS DE ALTURAS DE ONDAS PARA $U=5MS^{-1}$..... | 160 |
| ANEXO 2 - MAPAS DE ALTURAS DE ONDAS PARA $U=10MS^{-1}$..... | 164 |
| ANEXO 3 - MAPAS DE ALTURAS DE ONDAS PARA $U=15MS^{-1}$..... | 168 |
| ANEXO 4 - MAPAS DE ALTURAS DE ONDAS PARA $U=20MS^{-1}$..... | 172 |

1 INTRODUÇÃO

Essa pesquisa integra a área de conhecimento de “Mudanças climáticas e eventos extremos”. Trata-se da estimativa e previsão dos campos de vento e ondas no reservatório da usina hidrelétrica de Itaipu, relacionados à caracterização de seu risco de ocorrência (eventos extremos).

As ondas em águas continentais de grande espelho d'água são fenômenos naturais de grande oscilação espacial, decorrentes da transferência de energia devido ao vento. É imprescindível que sejam compreendidas como um meio de transporte de energia e, logo, como o primeiro elemento nativo modificador do ambiente (NORDSTROM; JACKSON, 2012).

A morfologia das margens, o transporte de sedimentos e a hidrodinâmica local é afetada pela liberação desta energia em decorrência da ação de ondas (NOVAK, 2007). As ações das ondas não se limitam às perturbações da superfície livre, mas podem transportar-se até o fundo do corpo d'água, causando tensões devido ao atrito, mudando as condições de estratificação, impactando o transporte de líquidos e gases na coluna de água, e sendo capaz de abalar o transporte de sedimentos por meio da ressuspensão da substância sólida do fundo (GORHAM; BOYCE, 1989).

Os estudos de ondas geradas pelo vento passaram a ser estimulados durante a Segunda Guerra Mundial, visto que a previsão das ondas era estratégica para a logística do desembarque de tropas nas áreas costeiras. Essa demanda deu origem ao desenvolvimento de modelos paramétricos, os quais concedem a determinação da altura da onda decorrente com base em uma equação que utiliza o vento e o *fetch*¹ como parâmetros.

O *fetch* é parte importante desta pesquisa, portanto foi publicado pelo autor deste trabalho o artigo “O conceito de campo de *Fetch* aplicado ao reservatório da UHE de Itaipu” na revista *Brazilian Journal of Development* (LUCHETTI; DIETER, 2023).

Com o aumento no uso dos computadores na década de 1980, ocorreu enorme desenvolvimento na modelagem dos processos físicos das ondas geradas

¹ O *fetch* é definido como a superfície da água na qual a intensidade e a direção do vento podem ser consideradas constantes (U. S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, 1984).

pelo vento, causando prejuízo ao aprimoramento dos modelos paramétricos. Essa afirmação é evidenciada pela apuração da ampla quantidade de publicações que abordaram de equações paramétricas até a década de 1980, em comparação com a quantidade limitada de publicações nas últimas décadas, mesmo com a quantidade de publicações sobre o tema, de modo geral, crescendo a cada ano (EKEBOM *et al.*, 2003).

Embora a evolução de acerto atingido pelos modelos numéricos de base física, os modelos paramétricos mantêm-se bastante empregados, sobretudo, pelo impedimento, técnico ou financeiro, de uso de modelos numéricos (LIMA *et al.*, 2003). Essa realidade deve-se a dois aspectos almejados em todo método de estimativa existente nos modelos paramétricos: a composição por um número pequeno de variáveis e a entrega de resultados de forma ágil (MARQUES *et al.*, 2007). Destaca-se que a hegemonia das atenções focadas ao progresso desses modelos é recomendada, especialmente, à viabilidade de obtenção de resultados bidimensionais confiáveis, automatizados e em tempo real.

Um exemplo bem-sucedido de aplicação de modelagem numérica de ondas em corpos d'água interiores ocorre nos Grandes Lagos, entre os Estados Unidos da América e o Canadá, operados pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), uma agência científica governamental norte-americana. A extensa coleção de publicações técnico-científicas demonstra a alta qualidade dos resultados obtidos (EKEBOM *et al.*, 2003). Porém, as elevadas quantias de recursos financeiros e o alto nível de especialização dos recursos humanos impedem a aplicação de modelos desse tipo para outras regiões que não possuem tais recursos.

O cenário das limitações financeiras e de especialização de recursos humanos prevalece de forma global, independentemente das atividades usuárias desses elementos sejam de grande importância para a sociedade (BEVERIDGE, 2004, FRANKIC; HERSHNER, 2003). Portanto, vários países conseguiriam se beneficiar da construção de um sistema de simulação do campo de ondas geradas pelo vento que fosse automatizado e solicitasse dados de entrada apresentados de forma aberta. Essa perspectiva de um sistema de simulação de aplicação com abrangência global e econômica em recursos possibilitou o desenvolvimento de uma nova técnica de simulação elaborada intitulada Paramétrica Bidimensional.

Variações na frequência e intensidade de desastres naturais relacionados aos processos hidrológicos como chuvas intensas e inundações tem sido relacionado às mudanças climáticas globais. Entretanto outras variáveis meteorológicas e hidrodinâmicas também estão relacionadas com eventos extremos e desastres naturais, tais como vendavais e ondas de grande amplitude geradas pela ação do vento em corpos de água interiores (lagos e reservatórios).

As perturbações geradas pelo vento propiciam a erodibilidade das margens e fomentam a mistura na coluna líquida causando desestratificação térmica do corpo hídrico. Os movimentos podem se propagar até o fundo ocasionando ressuspensão de sedimentos, favorecendo o desprendimento de gases, como os de efeito estufa, dissolvidos no sedimento. As ondas, ao se colidirem contra as margens, estimulam o desprendimento de sedimentos colaborando a erosão das margens através da queda de taludes. O uso de simulação computacional tem se mostrado uma ferramenta valiosa na busca pela quantificação dos fenômenos gerados pelo vento em reservatórios.

A compreensão em relação a uma nova técnica de simulação computacional em tempo real poderia ser aplicada permitindo a publicação de resultados por meio de um sistema de simulação computacional confiável, de baixo custo e automatizado.

No entanto, a implantação de sistemas de previsão de ondas em tempo real baseada nos modelos numéricos de base física é dificultada pelo contexto das restrições financeiras e de especialização de recursos humanos, as quais predominam de forma global, embora as atividades usuárias dessas informações sejam de grande importância para a sociedade, tais como o transporte hidroviário, segurança de barragens, aquicultura, entre outras.

1.1 JUSTIFICATIVA

A energia elétrica provinda do barramento dos rios ainda é considerada como fonte principal de geração energia no Brasil, trata-se de um tema de enorme importância científica para a sociedade brasileira, pois os fenômenos gerados por ventos extremos em reservatórios ocasionam diferentes circunstâncias que impactam diversos fatores, como, a segurança de barragens, o transporte aquaviário, a operação hidráulica de reservatórios, fazendas aquícolas, a emissão

de gases de efeito estufa nos reservatórios, o transporte de sedimentos e erodibilidade de margens, entre outros.

Em reservatórios de grande superfície, o delineamento das margens constitui-se no principal apaziguador da transferência de energia fornecida pelo vento à água. Nesses locais origina-se o *Fetch*, que representa a superfície da lâmina de água que tem contato direto com o vento. Sendo assim, como demonstrado por Marques (2013) uma metodologia que define um campo de onda pode ser usada para expressar a potencial transmissão de energia pelo vento e, então, permitir a simulação de fenômenos como seiches e elementos de ondas (altura, período, energia, comprimento), podendo ser utilizados em aplicações como:

1.1.1 Transporte fluvial

Os rios ligam ecossistemas terrestres e marinhos, não apenas transportando inúmeras substâncias a jusante, mas também moldando paisagens e promovendo ecossistemas aquáticos por meio de interações físicas e processos biogeoquímicos com inúmeros agentes. Por outro lado, instalações hidráulicas, como reservatórios, usinas hidrelétricas e bancos são implantados para utilizar os recursos hídricos para sustentar a sociedade humana. Nos sistemas da rede fluvial, as chuvas, como fortes gatilhos episódicos/periódicos, podem induzir o desperdício de massa das encostas, acelerando o transporte de nutrientes, o que causa efeitos sequenciais. Nas últimas décadas, o aquecimento global tem acelerado a ciclagem da água via termodinâmica e, assim, a frequência e a intensidade das chuvas extremas estão aumentando em intensidade. No Pacífico Ocidental, tufões (também conhecidos como ciclones tropicais na Ásia) caracterizados por ventos fortes e chuvas torrenciais estão ficando mais fortes. Os tufões intensificados inevitavelmente estimulam a resposta dos sistemas fluviais por meio do transporte de sedimentos e nutrientes e ameaçam a operação segura das instalações hidráulicas e até das comunidades costeiras por meio de inundações de tempestades (PBMC, 2014).

As hidrovias tendem a ter sua segurança afetada devido a ação dos ventos e conseqüentemente de ondas (FENDRICH, 1993; PADOVEZI, 2003). Ao ser atingido por ondas a embarcação tende a ter as amarras sofrendo esforços acentuados dos comboios tensionados com maior severidade, situação que pode ocasionar um risco a segurança da navegação, na ocasião da embarcação atravessar uma área

atingida por ventos severos, ela pode perder o controle gerando acidentes. Algumas situações de ocorrência de acidentes registrados, ocorreram devido a esses fatores. Cabe exemplificar a hidrovía Tietê-Paraná, eventualmente a ocorrência das ondas e do vento sobre o rio tem provocado acidentes como desprendimento de chapas, colisões, emborcamento, deriva, encalhamento e até mesmo arremesso na água de tripulante ou passageiro. No período que compreende os anos de 1995 e 1998 foram registradas 101 ocorrências com 5 feridos graves e o óbito de 13 vítimas (PADOVEZI, 2003). A relação negativa entre campo de ondas e embarcações é acentuada quando o reservatório está inserido em um local de rotas comerciais de navegação, afetando diretamente fatores econômicos ligados ao custo da carga transportada e agentes de ordem operacional, como o consumo supra estimado de combustível pelas embarcações, devido à falta de conhecimento ou acesso as informações de alternativas de rotas com menores incidências de altas de altura elevada (FERREIRA, 2000; MARQUES; GUETTER, 2011).

1.1.2 Exploração da aquicultura

Com um amplo território e condições climáticas favoráveis, o Brasil é considerado um país com grande potencial no desenvolvimento da aquicultura, reconhecido internacionalmente (PAVANELLI *et al.*, 2008).

No último século, grande parte das bacias hidrográficas brasileiras tiveram seus rios represados para que pudesse ocorrer a produção de energia elétrica por intermédio de hidrelétricas. Os reservatórios formados através dos represamentos destes rios possuem particularidades em seus ambientes como, hidrografia e hidrologia (SIMONS, 1980).

Observando o surgimento dessa oportunidade os empreendedores decidiram apostar na aquicultura destinadas à criação de peixes em tanques que começaram a se estabelecer fazendo uso de reservatórios artificiais na década de noventa (FELISBERTO; RODRIGUES 2005; NOGUEIRA; JORCIN 2006).

A escolha do local de uma fazenda aquícola, assim como a escolha de como será realizada a distribuição das estruturas para o cultivo, é influenciado devido alguns fatores como a direção dos ventos, correntezas, a ocorrência de ondas, qualidade da água, profundidade do corpo hídrico, além de obstáculos que podem derivar da presença de galhos de árvores submersas nos chamados paliteiros

(SOEMARWOTO *et al.*, 1990; ZORAN *et al.*, 1994; BEVERIDGE, 2004). Ter conhecimento sobre esses parâmetros é de intensa dificuldade, caso não existam, adota-se informações relatadas e compartilhadas por moradores locais (COELHO *et al.*, 2007a; COELHO *et al.*, 2007b). Considerando ainda o estudo do autor citado, a escolha dos locais de instalação e a posição dos tanques-rede no reservatório devem ser definidos de acordo com dois fatores, o acesso aos tanques, para possibilitar o manejo e as atividades diárias, e a devida manutenção da qualidade da água afetada pela circulação hidrodinâmica e pela ocorrência das ondas no local que afetaram a área.

Em função da importância que essa atividade exerce na economia não somente do país, mas para o mundo, principalmente em consequência da demanda por esse tipo de produto, os reservatórios são grande interesse pela indústria da aquicultura (AYER; TYEDMERS, 2009; BARTON; FLOYSAND, 2010). Dessa forma, muitos são os benefícios da utilização dos reservatórios para a aquicultura em tanques-rede, dentre eles a possibilidade de utilizar corpos d'água antropicamente modificados para produção de proteína animal de qualidade, usufruindo do leque de opções de multiusuários.

1.1.3 Processos de transporte de sedimentos e erosão das margens

Os ecossistemas aquáticos têm sido influenciados de forma significativa há muito tempo devido a erosão e os impactos ligados a mesma. Além de causar impactos no solo, a erosão está ligada a condução de sedimentos o que pode causar o assoreamento e contaminação de corpos hídricos além de diminuir a qualidade do solo e da água. (ZANELLA, 2021).

Normalmente a geração das ondas pelo vento consiste no fator severo mais significativo no desenvolvimento de fatores que podem levar as margens em lagos e reservatórios constituídos por barragens a sofrerem processos erosivos (FERNANDEZ, 1990). As deteriorações são acentuadas por mudanças descontínuas do nível de água. (FENDRICH, 1988). Solera (2010) monitorou as encostas que margeiam o Reservatório da UHE Sérgio Motta (Porto Primavera), e constatou que o agente principal de instabilização de taludes foi o desenvolvimento de processos erosivos decorrentes da ação de ondas geradas pelo vento, que causam grandes impactos aos taludes em função da elevada carga de energia.

Ainda que algumas das margens possam erodir sem graves impactos, as áreas mais favoráveis ao avanço delas devem ser identificadas para que sejam tomadas providências no controle da erosão marginal. A erosão marginal em reservatórios ocorre com diferentes graus de criticidades. Porém, o principal fator de erosão causada por uma determinada ocorrência, é a ação das atividades de potencial erosivo provindas da ação de ondas geradas pelo vento, na qual afetam as margens com grande intensidade. O aumento do fluxo de massa com a distância a favor do vento em um determinado espaço de solo, o efeito de busca para a erosão eólica, tem sido observado e relatado desde 1939 (MARQUES; GUETTER, 2011).

1.1.4 Controle de taludes de barragens

A Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010 que traz a Política Nacional de Segurança de Barragens menciona em seu texto que, as barragens precisam manter sua integridade estrutural de modo a permitir sua operacionalização de forma segura, para proporcionar conservação e cuidado com a vida, a saúde, a propriedade e o meio ambiente (BRASIL, 2010). Ainda segundo a Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, que traz a alteração da Lei nº de 20 de setembro de 2010 em seu art. 2º, item I, apresenta o termo barragem definido como:

“Qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas (BRASIL, 2020)”.

O sistema de barramento de rios é utilizado pelo ser humano há diversos anos para amplas finalidades. Juntamente com pilhas de estéril, essas construções são conhecidas como as grandes obras de geotecnia construídas pelo homem. Em toda a área que cobre o território brasileiro, é possível registrar barramentos de diversas dimensões.

Devido ao canteiro de obras estreito, ventos fortes e constantes, algumas atividades simultâneas durante a construção de barragens comprovadamente levam a conflitos de espaço e aumentam a frequência de exposição a perigos (CHEN *et al.*, 2021).

As causas da geração de ondas em reservatórios, foram mencionadas nos primeiros estudos que se constituíram no intuito de obter uma padronização das atividades ligadas a projetos que visavam a construção de barragens em rios, que pudessem definir o corredor livre que o vento incidia e o dimensionamento que objetivam assegurar a integridade dos taludes dos barramentos constituídos de solo. Buggeln e Judge (2007), em seu trabalho realizado para determinar o bordo livre de barragens para a Associação Canadense de Barragens (CDA), mencionam sobre a necessidade da obtenção das alturas de ondas com o intuito de fornecimento de projetos seguro de bordo livre. A realização desta ação deve ser calculada objetivando a proteção pelo correto dimensionamento da barragem (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 1948). O investimento que objetiva essa proteção varia de 10 a 30% do custo da obra para grandes barragens, podendo atingir 50% para pequenas obras (FORMAN, 1970).

No trabalho de Andrade, Gonçalves e Guetter (2005), foi realizado uma análise detalhada das oscilações de nível de água e variações das velocidades no reservatório objeto deste estudo, resultantes da ação do vento. Segundo os autores estas oscilações são mais significativas quando estão associadas aos ventos com direção coincidente com o alinhamento do reservatório (nordeste-sudoeste).

1.1.5 Monitoramento dos níveis de água do reservatório

Para obter o conhecimento das vazões afluentes dos sistemas hidráulicos e assim controlar a programação energética é necessário o monitoramento deste corpo hídrico, uma vez que para sanar as maiores incertezas depende-se do conhecimento sobre a superfície livre que pode não ser horizontal e estática.

Um corpo hídrico sofre perturbações devido a quantidade de água precipitada sobre ele, a influência do vento, as variações de vazões ocorridas pela geração de ondas e a replicação delas, com o auxílio do vento. O correto dimensionamento desses fatores atuantes nos corpos hídricos auxilia na determinação dos valores de afluência e defluência resultantes do balanço hídrico, fomentando o sistema tomada de decisões (BUBA; ARAÚJO, 2011). Sendo assim, o correto conhecimento sobre a amplitude da onda onde está instalado o sensor que afere o nível do reservatório é essencial para a obtenção precisa do volume do

reservatório, fomentando a confiança daqueles que dependem dessas informações para operarem sistemas hidráulicos.

1.1.6 Interferência na dinâmica dos ecossistemas aquáticos

Os estudos que dependem de informações sobre a geração de ondas nos reservatórios estão carentes de dados, mesmo com a existência de diversos modelos numéricos a disposição no mercado. Referente aos ecossistemas aquáticos, braço da biologia que estuda os corpos de água, as macrófitas são responsáveis pela absorção do impacto das ondas, contribuindo para a redução dos processos erosivos que prejudicam as margens e por consequência, influenciando na turbidez que é responsável pela cadeia produtiva dos corpos hídricos, e consequentemente favorecendo os berçários de ovos de peixes (THOMAZ, 2003).

A contrariedade que afeta a determinação da padronização das ondas, dificulta a análise integrada que busca relacionar a influência da ação delas nos ecossistemas aquáticos. As plantas que desenvolvem raízes possuem limites impostos pela geração das ondas em função da profundidade, da mesma forma, as flutuantes ficam à mercê do vento e das ondas em locais abertos, somente através de equipes diversificada em conhecimento pode favorecer a previsão do deslocamento dessas plantas na superfície dos corpos hídricos (LITTLE, 1966).

O mecanismo do *fetch* impacta no potencial de geração de ondas sobre as margens, e essas ondas geradas, tornam-se responsáveis muitas vezes pelo stress que afeta a colonização e o crescimento das espécies vegetais (DOYLE, 2001).

Souza (2000) estudou as intempéries no reservatório de Itaipu e verificou um aumento do *fetch*, afetando de maneira negativa a diversidade das comunidades de macrófitas. Comunidades que apresentam diversidade de até sete espécies podiam ser encontradas quando os valores do *fetch* através do método oceânico não excediam uma extensão de 8 km. Do contrário quando esses valores de *fetch* eram superiores a 15 km de extensão apresentavam um número inferior a três espécies.

Conforme Duarte e Kalff (1990), apud Pierini (2005), a variação no espaço das populações dessas plantas é controlada em cada ecossistema em função das características locais. O declive presente nas margens (RIIS; HAWES, 2003), o *fetch* proporcionado pelo vento (BAILEY, 1988; REA *et al.*, 1998; THOMAZ; BINI, 2003; VAN DEN BERG *et al.*, 2003) a composição química do sedimento (WEISNER *et al.*,

1997; BAATTRUP-PEDERSEN; RIIS, 1999; VAN DEN BERG *et al.*, 2003) são fatores considerados de suma importância, influenciando diretamente sobre a alocação e a composição das comunidades de macrófitas aquáticas (PIERINI, 2005).

No entanto, grande parte dos estudos observados atribuem pouca ou nenhuma ênfase a estruturação dos fatores morfométricos, químicos físicos ou as características do sedimento para explicar a variação na distribuição espacial das populações de macrófitas aquáticas. Em um desses estudos observados sobre a influência do *fetch* nas estruturas das assembleias de macrófitas aquáticas no reservatório de Rosana, localizado no estado de São Paulo, o autor constatou que a diversidade de macrófitas, aumenta em condições intermediárias quando expostas às ondas e que a riqueza de espécies sofre diminuição com o aumento do comprimento do *fetch* (PIERINI, 2005), o autor conclui também que a proporção dos indivíduos torna-se maior em condições de maior exposição à ação das ondas e que os efeitos advindos do *fetch* costumam bloquear o domínio de uma ou poucas espécies de macrófitas aquáticas.

Já Bini *et al.* (1999), estudaram a distribuição espacial das comunidades de macrófitas aquáticas em torno da margem leste do reservatório de Itaipu. A comunidade é caracterizada em relação aos fatores limnológicos e dos sedimentos. A parte central do reservatório é mesotrófico (reservatórios e lagos que contém moderada quantidade de nutrientes e são levemente produtivos nas questões que envolvem a vida aquática de plantas e animais), enquanto os braços (vales inundados do rio afluente) e por toda a costa leste podem ser de oligomesotróficos a eutróficos, em função da época do ano e das características da sub-bacia. A composição da comunidade macrófita e a cobertura das espécies já foram mapeadas em 30 locais em quatro rios afluentes ao reservatório: São Francisco Falso, São João, São Francisco Verdadeiro e Ocoi. As análises foram executadas com base na relação ao sedimento total (medidas do disco de Secchi, turbidez e quantidade de fósforo e matéria orgânica no sedimento) e à matéria orgânica; regime de luz subaquática; alcalinidade, condutividade, profundidade e pH. Dezesete euhidrófitas e seis espécies macrófitas emergentes foram registradas.

A análise canônica correspondente dos dados mostrou que dois aglomerados de variáveis são importantes previsores da estrutura aquática das comunidades de espécimes de macrófitas. O conjunto de macrófitas flutuantes sobre

o corpo de água está amplamente relacionado à concentração de nutrientes na água e no sedimento, enquanto a penetração da luz foi fortemente relacionada à ocorrência de espécies submersas (BINI *et al.*, 1999).

Por mais que constatou a presença de muitas espécies que podem causar problemas, densos crescimentos foram restringidos às áreas mais rasas do reservatório de Itaipu, causando problemas localizados (BINI *et al.*, 1999). Essas plantas possuem grande possibilidade de aumentarem suas populações e assim provocarem interferência na pesca, no uso recreacional, no transporte e geração da hidroeletricidade, sendo assim, surge a demanda pelo de monitoramento contínuo da distribuição e quantidade dessas plantas, e a investigação de medidas que possam proporcionar o devido gerenciamento correto (BINI *et al.* 1999).

1.1.7 Emissão de CO₂

Ao longo da história as centrais hidrelétricas, figuraram como uma das principais alternativas de geração de energia renovável, devido as baixas emissões de poluentes. No entanto, de um curto espaço de tempo até os dias de hoje aumentaram as indagações de que as emissões atribuídas a uma usina hidrelétrica poderiam ser expressivas quando levadas em consideração aquelas associadas aos reservatórios. Ao longo do processo de alagamento de uma área, são alteradas as condições locais, alteram-se também os processos nos ecossistemas locais, conseqüentemente, altera o balanço geral de carbono (EPE, 2022).

O mecanismo de geração do *fetch* está explicitamente ligado a amplitude das ondas, interferindo no movimento das águas devido a transferência do ar. Essa ação de transferir para a água o ar e influenciar no movimento favorece a formação de correntes impactando a turbulência na camada superficial do reservatório, chamada de epilímio. Sendo assim o vento é o principal constituinte dos processos de mistura na parte superficial dos lagos e reservatórios. Ainda, o vento durante a sua atuação na superfície da água é responsável pela transferência de ar e água do corpo aquático (MARQUES *et al.*, 2014).

Esse processo em que o vento transfere ar para a água está relacionado com sua velocidade. A geração de ondas na superfície aquática alterando os movimentos da interface, pode possibilitar estudos que visam quantificar o quanto de gases de efeito estufa são emitidos pelos reservatórios (MANNICH, 2013).

1.2 OBJETIVOS

De modo abrangente, o objetivo principal desta pesquisa visa realizar atividades de simulação computacional de ondas geradas pelo vento neste importante reservatório do Brasil permitindo a determinação de um modelo em forma de equação paramétrica específica para o local de estudo. A validação do modelo paramétrico visa garantir a geração de resultados semelhantes aos gerados pelo modelo numérico de base física *SWAN*.

Para atingir este objetivo geral e fundamentado no estado da arte do tema, foram estruturados dois objetivos específicos:

O primeiro objetivo visa a ações de simulação utilizando a técnica MPB (Modelagem Paramétrica Bidimensional) de ondas geradas pelo vento no reservatório em estudo. São três os elementos a serem simulados: (1) os campos de *fetch*; (2) as alturas de ondas; (3) as profundidades de mistura, ou seja, a profundidade atingida pelas ondas ao se propagarem. Esses elementos são derivados de equação específica a ser determinada para o reservatório de Itaipu, e que correlaciona a altura da onda ao comprimento do *fetch* e à intensidade do vento.

O segundo objetivo visa relacionar os riscos de ocorrência de ventos severos na geração de ondas via processos de simulação computacional.

1.3 INOVAÇÃO CIENTÍFICA

A representação inovadora do *fetch* como um campo bidimensional realizada por Marques (2013), permitiu o desenvolvimento de um novo método de quantificar o fenômeno de ondas geradas pelo vento, a técnica MPB.

Partindo desta técnica, a inovação científica desta tese consiste na comprovação de que é possível assumir que para o reservatório de Itaipu, respeitando-se as condições assumidas, o campo de ondas pode ser simulado exclusivamente com base na intensidade do vento e no formato do contorno que representa a margem.

Esta comprovação foi feita pela determinação de um modelo matemático representado por uma equação paramétrica, composta de coeficientes dependentes da intensidade do vento e, portanto, variáveis, diferentemente das equações existentes, compostas por coeficientes constantes.

Esta abordagem contribui para explicar a divergência de resultados entre estes modelos disponíveis na literatura especializada (JONSWAP, DONELAN, SGM, SAVILLE, WOLF etc.)

A qualidade dos resultados obtidos e a confiabilidade atingida constatadas pela etapa de validação realizada, justificam que seja retomada a utilização de modelos paramétricos, reconhecidamente vantajosos pela simplicidade de aplicação. Por depender de poucos parâmetros, a utilização do modelo paramétrico de ITAIPU mostra-se oportuna, inclusive, visando o desenvolvimento, por trabalhos futuros, de modelos computacionais de previsão em tempo real.

Adicionalmente, o trabalho contribui para a compreensão dos fenômenos gerados pelo vento, disponibilizando 208 mapas de *fetch*, altura de ondas e profundidade de mistura submetendo o reservatório a campos de vento uniforme relacionados a período de retorno de 10, 20, 50 e 100 anos.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA TESE

A estrutura desta tese é composta de maneira a tornar claros os conceitos fundamentais envolvidos neste trabalho, o desenvolvimento da pesquisa, as conclusões e as atribuições.

Dessa maneira, o trabalho foi estruturado em seis capítulos, incluindo a Introdução, que serão apresentados conforme explicação a seguir.

No capítulo dois são apresentadas, na revisão bibliográfica, informações referentes aos três elementos fundamentais para esta pesquisa: o *fetch*, as ondas e o vento. O tratamento sobre o *fetch* consistiu em uma descrição de métodos existentes. Ao referir-se as ondas, além dos aspectos conceituais pertinentes ao fenômeno, foram reunidas informações sobre os modelos de previsão de altura de ondas existentes. Quanto ao vento foram descritos alguns conceitos fundamentais relacionados aos ventos extremos.

O capítulo três caracteriza a área de estudo e apresenta sua localização, bem como as suas características, além descrever informações importantes sobre o geoprocessamento das margens e dos softwares *SWAN* e *ONDACAD*, materiais utilizados neste trabalho. Já o capítulo quatro compreende os procedimentos metodológicos nos quais são descritas as atividades realizadas, os conceitos, métodos e modelos aplicados a fim de alcançar os objetivos propostos.

No capítulo cinco são apresentados os resultados obtidos, sendo inicialmente apresentando os mapas de distribuição do *fetch* para dezesseis direções obtidos pelo modelo ONDACAD, posteriormente foram apresentadas as simulações de altura das ondas para os ventos pelo modelo *SWAN*, seguido pela determinação do modelo paramétrico para ITAIPU e validação do modelo proporcionando os mapas gerados para altura de ondas e desvios (ITAIPU vs *SWAN*), em seguida foi apresentado a comparação entre o modelo concebido para ITAIPU com os modelos paramétricos apresentados na literatura e por fim os resultados obtidos pela aplicação do modelo de ITAIPU para altura de ondas e profundidade de mistura.

Finalmente, o capítulo seis refere-se às conclusões e considerações finais, nas quais são relacionadas a aplicabilidade da pesquisa, as contribuições alcançadas até a defesa desta tese.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo da tese trata do estado da arte sobre o tema da pesquisa. As ondas geradas pela ação do vento sobre a superfície de corpos d'água são influenciadas principalmente pelas características deste meio. Entre estas ressalvas, além da direção e velocidade do vento, destaca-se o comprimento da pista sobre a qual ele sopra transferindo energia para o meio líquido, conhecido como *fetch*.

Este capítulo de revisão da bibliografia apresenta quatro conceitos fundamentais para o estudo deste fenômeno de formação de ondas: (1) *fetch*, (2) ondas, (3) vento e (4) modelos de altura de ondas.

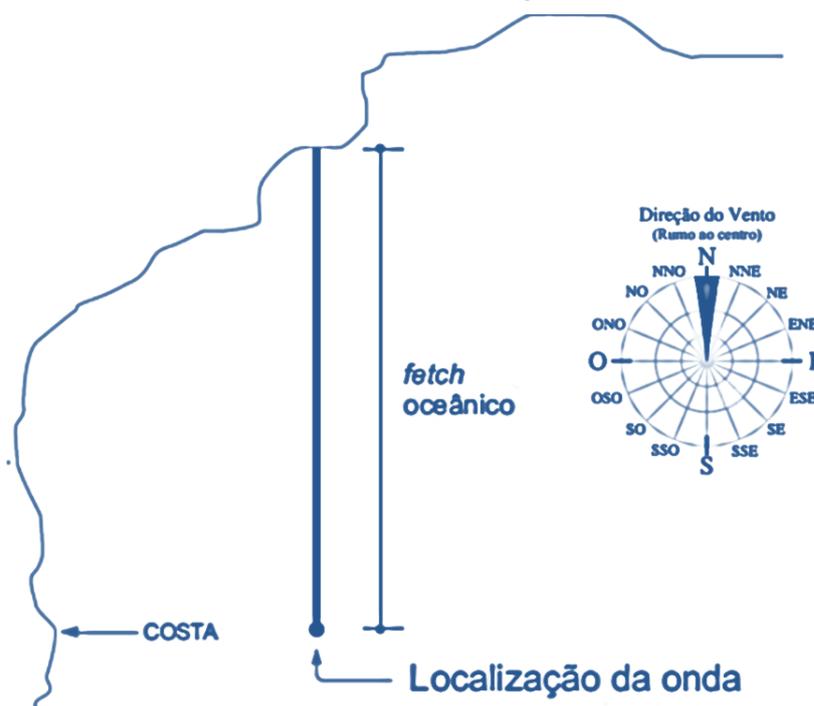
2.1 FETCH

O *Fetch* começou a ser conceituado em abordagens que tinham relação com às ciências atmosféricas em águas profundas, principalmente relacionadas à previsão de altura de ondas originárias pelo vento. Nestes ambientes o *fetch* é definido como comprimento sobre a superfície da água onde o vento mantém constante, tanto a intensidade quanto a direção (MARQUES et. al. 2014).

Em localidades como, estuários, lagos, baías e reservatórios, devido à forte influência das margens, o método escolhido para a determinação do *fetch* são os métodos geométricos, que são realizados por aplicação pontual. Mas em muitos estudos sua determinação é feita considerando a raiz quadrada da superfície livre. Apesar de referir-se a uma superfície livre, o *fetch* possui dimensão de comprimento.

Segundo Delgado (2010) o *fetch* é um aumento da taxa de transporte de sedimentos eólicos com a distância a favor do vento sobre uma superfície erodível. As primeiras observações do efeito *fetch* remontam a 70 anos e o conceito tem sido amplamente utilizado em diversas paisagens.

Em caso de comprimentos de *fetch* restritos, estes são normalmente medidos da linha da costa até o ponto de interesse, na direção do vento. O *Shore Protection Manual* (SPM) (1984) recomenda aplicar este comprimento de *fetch* em linha reta para curvas ou equações de previsão de ondas, sem considerar a geometria do *Fetch*, conforme a Figura 1.

FIGURA 1 - *FETCH* NA DIREÇÃO NORTE

FONTE: O Autor (2022).

Outros métodos propostos para geração de ondas de *fetch* restrito consideram comprimentos de *fetch* em direções sem vento aplicando fatores de ponderação (uma função do cosseno do ângulo entre as direções sem vento) aos comprimentos de *fetch* e calculando a média desses comprimentos ponderados sobre grandes arcos em todos os lados da direção do vento. Esses métodos tendem a reduzir os comprimentos de *fetch* por meio da média. Outro método, desenvolvido para os Grandes Lagos, considera a geração de ondas em comprimentos de *fetch* em direções a favor do vento com um forçamento de vento reduzido (reduzido pelo cosseno do ângulo entre a direção a favor do vento e a direção do vento) (SMITH, 1991).

Através da contribuição de Saville (1952) que observou através do método oceânico que as alturas obtidas por meio de cálculos eram superiores às alturas de ondas visíveis, foi sugerido pelo mesmo uma nova abordagem, consistindo na construção de 16 linhas radiais tendo como partida o ponto de incidência da onda em intervalos de 6° , a fim de atingir uma amplitude de valor máximo sob um ângulo de 90° , do qual a bissetriz é a direção do vento, conforme ilustra a Figura 2.

Em águas interiores, localidades em que a profundidade dos corpos hídricos possui valores maiores a ação dos ventos, a magnitude e a intensidade dos ventos sobre grandes extensões de superfícies de água ocasionam a geração de ondas de alturas e duração distintas, com a gravidade como força restauradora do movimento oscilatório, elas são chamadas de ondas gravitacionais. Ondas deste tipo apresentam período de duração que variam entre 1 a 30 s (KINSMAN, 1965).

Trabalhos no campo de ondas gravitacionais foram explorados em magnitude durante a segunda guerra mundial, devido a importância das forças navais no embate levando a marinha dos Estados Unidos a subsidiar estudos nesse campo, sendo assim, muitos modelos de previsão de ondas gravitacionais vêm sendo desenvolvidos e empregados operacionalmente por diversas instituições de pesquisa e organismos internacionais, com destaque para a Europa, os Estados Unidos e o Japão (MATTOSINHO, 2016).

No que concerne os impactos em função da formação de ondas em lagos e reservatórios cabe destacar o aumento da erosão das margens e os riscos oferecido à navegação e as operações hidráulicas.

2.2.1 Altura de ondas

A característica fundamental das ondas de relevância nas aplicações de engenharia é a altura de onda. De acordo com Kamphuis (2000), as ondas são capazes serem dimensionadas por meio de observações visuais, por boias ou ondógrafos (medição local), por imagens de satélite (medição remota) ou aéreas, e pela aplicação de simulação computacional.

Baseado na observação visual, em consequência da deficiência de precisão deste tipo de medição, foi incorporado um conceito significativo na exploração da altura de onda. O senso humano tende a considerar apenas a média do terço das maiores ondas (LONGUET-HIGGINS, 1952 apud MARQUES, 2013), definindo-se, deste modo, a altura significativa da onda ($H_{1/3}$) como a média aritmética dessas ondas observadas.

A geração de ondas de vento em lagos, rios, baías e reservatórios é geralmente limitada pela geometria do corpo d'água, que muitas vezes é muito irregular. Em mar aberto, a geração de ondas é limitada pela extensão das perturbações meteorológicas, onde as larguras do *fetch* são da mesma ordem de

grandeza que os comprimentos do *fetch*, e apenas o comprimento, não a forma do *fetch*, é considerado importante. Embora o efeito do comprimento da busca seja bastante compreendido, o efeito da forma da busca (especialmente para buscas muito irregulares ou estreitas) recebeu apenas atenção limitada (SMITH, 1991).

A paupérie de se obter mesmo que estimado a altura de ondas teve seu surgimento em regiões oceânicas. Primeiramente, houve o desenvolvimento de modelos empíricos para prever a ocorrência de ondas, com destaque para a classificação mencionada na escala Beaufort (CANDELLA, 1997).

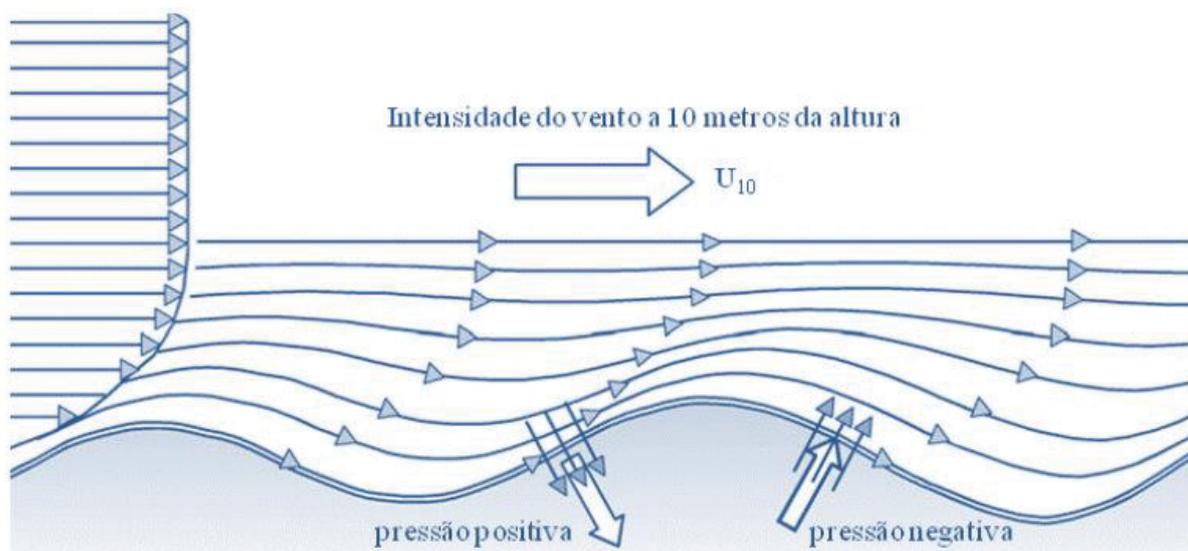
Quando o vento começa a soprar sobre a superfície de águas calmas do reservatório, aparecem pequenas ondas, em consequência dos vórtices provocados pela turbulência das correntes eólicas. Essas ondas aumentam de altura e comprimento como resultado da ação contínua do vento sobre a parte posterior das mesmas e do esforço cortante ou tangencial entre o vento e a água. À medida que as ondas crescem em altura e comprimento, sua celeridade aumenta até se aproximar da velocidade do vento (FENDRICH, 1993).

2.2.2 Profundidade atingida pelas ondas ao se propagar

De acordo com Marques (2013), em situações de águas profundas, ou seja, em condições em que a profundidade (d) supera a metade do comprimento da onda (L), as características das ondas não são afetadas pela profundidade. No entanto, em água rasas ($d \leq L/2$) o movimento da água se propaga em trajetórias elípticas, atingindo o fundo, promovendo uma redução da velocidade através do atrito, entretanto, sem afetar o período da onda de modo abrupto. Em função disso, é observada uma diminuição no comprimento da onda e aumento de sua amplitude. Esta interferência na parte inferior pode ocasionar na quebra da onda, dissipando assim a energia por meio da turbulência gerada nos corpos de água.

A energia geralmente é transferida sempre que as densidades dos fluidos e velocidades forem distintas para que haja uma tensão tangencial apta de causar instabilidades na conexão dos dois elementos. O fenômeno de geração de onda pelo vento como decorrência de dois processos é tratado por Holthuijsen (2007), que podem ser compreendidos com a ajuda da Figura 3.

FIGURA 3 - GERAÇÃO DE ONDAS PELO VENTO



FONTE: Holthuijsen (2007).

As ondas iniciam seu desenvolvimento, com pequenas variações de pressões que são causadas pela turbulência do escoamento de ar sobre a superfície líquida não perturbada. Em seguida, a amplitude da onda é tão grande que passa a impactar o fluxo de vento sobre ela, formando uma região de sucção ou pressão negativa (SILVEIRA; VARRIALE, 2005).

A interferência da profundidade passa a impactar o transporte de energia mecânica gerando significativa dissipação de energia assim que as ondas se aproximam da costa, que pode ser vista pela diminuição da velocidade e do comprimento da onda e pelo decorrente crescimento da amplitude. Este evento é possível ser excluído para situações de água profundas, nas quais se deparam a maior parte dos reservatórios brasileiros, conhecido como refração (SILVEIRA; VARRIALE, 2005).

2.3 VENTO

Os ventos são transferência de massas de ar, gerado por alterações de pressão na atmosfera, sendo agrupado quanto à escala no espaço, velocidade, categorias de forças que os originam, regiões de ocorrência e seus impactos. O termo barlavento é definido como a região de onde sopra o vento, e sotavento, a região para onde o vento sopra. Os anemômetros e anemógrafos, registram a

intensidade e direção do vento a uma altura padronizada de 10m do nível do solo, em campo aberto e plano.

Analisar os ventos extremos subsidia uma série de ações e estudos com interesse na interação entre o vento e o seu meio atuante. Os interesses humanos condicionam para aplicações que fundamentam a análise e compreensão de ventos extremos, como: (1) Incentivo para o planejamento e implementação de medidas de prevenção e preparo, no que cerne a defesa civil, (2) Critérios que determinam a garantia de segurança das edificações e das torres de distribuição de energia, em consonância com as normas técnica e (3) Buscar a eficácia na interpretação dos alertas meteorológicos (GONÇALVES, 2007).

De acordo com Guetter *et al.* (2005), após estimar o impacto no cálculo do balanço hídrico do reservatório em estudo devido ao efeito do vento, pode identificar situações de ventos severos que provocam o empilhamento dos níveis de água do reservatório, ocasionando variações de até 13,2 cm nos níveis próximos à barragem e incerteza da ordem de até 20% nas estimativas de acercamento.

Outros estudos como Castelão e Moller Jr. (2003) que após simularem a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos, seus estudos apresentaram que ventos de 4 m s^{-1} provocam um desnível entre as extremidades da lagoa de até 8 cm.

Diante desse contexto, após as afluições e defluências a ação do vento representar para os reservatórios, a frente de maior importância na modelagem hidrodinâmica é a correta avaliação de sua magnitude e frequência, como sendo primordial para a aquisição de resultados condizentes com a realidade.

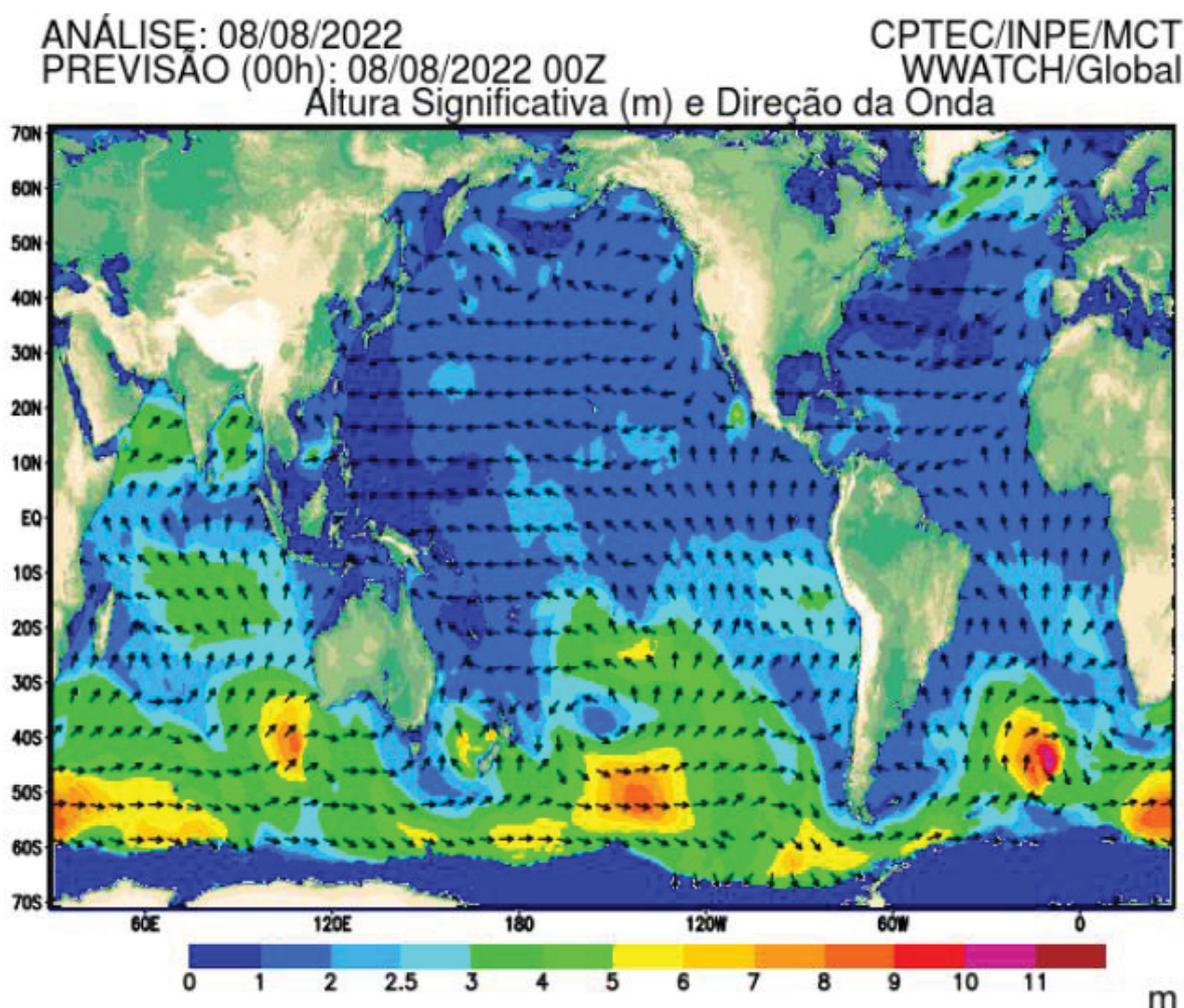
2.4 MODELOS DE ALTURA DE ONDAS

Em função do teor de dificuldade envolvido na criação de modelos numéricos que caracterizassem as ondas, tornou-se necessário, ao longo do tempo, o aprimoramento das teorias, com o intuito de estudar os fenômenos de agitação, surgindo primeiramente as teorias de ondas regulares, na sequência, as teorias de ondas irregulares ou randômicas.

A necessidade de se estimar a altura de ondas teve origem em regiões oceânicas. Foi durante a segunda guerra mundial que o aumento do interesse em se prever as condições do mar, principalmente quando o assunto era o desembarque

de tropas anfíbias, levou a criação de modelos paramétricos para previsão. Esses modelos que estimam a altura de ondas fazem uso de equações parametrizadas em elementos como intensidade, duração do vento e *fetch*. Cabe ressaltar que, tais equações são utilizadas até os dias atuais devido a facilidade de obtenção dos resultados (MARQUES, 2021). Um desses modelos utilizados atualmente está ao alcance de todos de forma gratuita por meio da plataforma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O modelo de ondas oceânicas de terceira geração utilizado é o WAVEWATCH 2.22, que produz uma previsão diária no horário de 0h GMT, a simulação dos campos de ondas por esse modelo só é possível devido a utilização de campos de ventos produzidos pelo modelo atmosférico global AVN do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), método de simulação de ondas apropriado para profundidades acima de 40 metros para, conforme a Figura 4.

FIGURA 4 - MODELO DE ONDAS OCEÂNICAS



FONTE: Inpe/CPTEC (2022).

Nesta pesquisa, os métodos para determinar a altura de ondas foram agrupados em: (1) Beaufort; (2) Paramétricos; (3) Estatísticos; e (4) Numéricos. Os métodos 1 e 2, quanto a aplicabilidade, constituem pela viabilidade de uso de consulta direta a diagramas e ábacos. Os métodos estatísticos tratam da ligação limitada entre a dependência de séries históricas de ventos e ondas. Os modelos numéricos são de base física com utilização de métodos numéricos como solução, contendo soluções espectrais.

2.4.1 Método de Beaufort

Em águas oceânicas quando a onda alcança o absoluto desenvolvimento e ainda continua obtendo a ação do vento, a altura da onda passa a necessitar da velocidade do vento e extensão do *fetch* percorrido. Diante disso, suposto de uma embarcação em alto mar considerando as condições de vento e ondas, o *fetch* pode ser classificado como constante em virtude da velocidade reduzida da embarcação. Desse modo, a altura de onda para a pessoa na embarcação passa a depender apenas da intensidade do vento.

Uma forma de estimar a intensidade dos ventos desenvolvidas por vários sistemas meteorológicos é recorrendo a escala de Beaufort. O conceito desta escala foi inicialmente para associar a agitação das águas do mar reportadas pelos navegantes às velocidades do vento. Este modelo empírico para prever a ocorrência de ondas, se destacou pela classificação da escala criada levando em consideração as observações visuais pelo almirante inglês Francis Beaufort em 1806 e adotada pela Marinha Inglesa em 1834 (CANDELLA, 1997). Através dela tornou-se possível a obtenção de uma relação entre a intensidade do vento e o estado do mar, divididas em treze classes (0 a 12) conforme Tabela 1. Em seguida a escala de Beaufort foi aprimorada por diversos autores e adaptadas para as condições terrestres.

TABELA 1 - ESCALA BEAUFORT DE VELOCIDADES DO VENTO E ONDAS

| Grau | Designação | nós | km/h | m/s | Aspecto do mar | Efeitos em terra |
|------|--------------|---------|-----------|---------|---|---|
| 0 | Calmaria | <1 | <2 | <1 | Espelhado | Fumaça sobe na vertical |
| 1 | Bafagem | 1 a 3 | 2 a 6 | 1 a 2 | Pequenas rugas na superfície do mar | Fumaça indica direção do vento |
| 2 | Aragem | 4 a 6 | 7 a 11 | 2 a 3 | Ligeira ondulação sem rebentação | As folhas das árvores movem; os moinhos começam a trabalhar |
| 3 | Fraco | 7 a 10 | 13 a 19 | 4 a 5 | Ondulação até 60 cm, com alguns carneiros | As folhas agitam-se e as bandeiras desfraldam ao vento |
| 4 | Moderado | 11 a 16 | 20 a 30 | 6 a 8 | Ondulação até 1.5 m, carneiros frequentes | Poeira e pequenos papéis levantados; movem-se os galhos das árvores |
| 5 | Fresco | 17 a 21 | 31 a 39 | 9 a 11 | Ondulação até 2.5 m, muitos carneiros | Movimentação de árvores pequenas; superfície dos lagos ondula |
| 6 | Muito Fresco | 22 a 27 | 41 a 50 | 11 a 14 | Ondas grandes até 3.5 m, borrifos | Movem-se os ramos das árvores |
| 7 | Forte | 28 a 33 | 52 a 61 | 14 a 17 | Mar revolto até 4.5 m com espuma e borrifos | Movem-se as árvores grandes; dificuldade em andar contra o vento |
| 8 | Muito Forte | 34 a 40 | 63 a 74 | 17 a 21 | Mar revolto até 7.5 m com rebentação e faixas de espuma | Quebram-se galhos de árvores; circulação de pessoas difícil |
| 9 | Duro | 41 a 47 | 76 a 87 | 21 a 24 | Mar revolto até 9 m, borrifos afetam visibilidade | Danos em árvores; impossível andar contra o vento |
| 10 | Muito Duro | 48 a 55 | 89 a 102 | 25 a 28 | Mar revolto até 12 m, superfície do mar branca | Árvores arrancadas; danos na estrutura de construções |
| 11 | Tempestade | 56 a 63 | 104 a 117 | 29 a 32 | Mar revolto até 14 m, pequenos navios sobem nas vagas | Estragos abundantes em telhados e árvores |
| 12 | Furacão | >64 | >119 | >33 | Mar todo de espuma, visibilidade nula | Grandes estragos |

FONTE: OMM (1995).

2.4.2 Modelos Paramétricos

Sverdrup e Munk (1947) elaboraram uma formulação paramétrica que posteriormente recebeu grande aceitação da comunidade científica. O método foi aperfeiçoado na sequência por Bretschneider (1966), que faz referência pelas letras iniciais dos sobrenomes de seus autores (*Sverdrup, Munk e Bretschneider - SMB*), que desde então tem passado por revisão sucinta por diversos outros autores propondo modificações.

O método paramétrico SMB faz uso da análise dimensional como forma de relacionar as características das ondas e as questões que a condicionam. Segundo Mitsuyasu e Honda (1982) o aumento do espectro de onda em função do vento determinado por meio de observações experimentais em laboratório, levando em consideração a versão utilizada pelo *United States Department of the interior – Bureau of Reclamation* (1973) obteve-se as seguintes equações empíricas:

$$\frac{g*H_s}{U^2} = 0,283 * \tanh \left[0,0125 * \left(\frac{g*F}{U^2} \right)^{0,42} \right] \quad (1)$$

$$\frac{g*T_s}{2*\pi*U} = 1,2 * \tanh \left[0,077 * \left(\frac{g*F}{U^2} \right)^{0,25} \right] \quad (2)$$

Sendo:

H_s : altura significativa da onda (m);

T_s : período significativo da onda (s);

g : aceleração da gravidade (m/s^2);

U : velocidade do vento (m/s) e

F : pista efetiva (km).

Uma técnica nomeada de Modelagem Paramétrica Bidimensional (MPB), desenvolvida por Marques (2013), a partir da qual obtêm-se uma equação paramétrica exclusiva para o corpo d'água para determinação da altura de onda, em conformidade do *fetch* e da velocidade do vento. Tal técnica foi utilizada nesta pesquisa de forma a obter uma equação específica para o reservatório em estudo. Assim sendo, ela será minuciada na parte 4 desta tese.

É possível obter a energia da onda, a partir da definição da altura da onda. Levando em consideração águas profundas e ondas regulares, a energia média por unidade de área superficial (J/m^2), conhecida como densidade de energia ou energia específica de uma onda, é dada por (KINSMAN, 1984):

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (3)$$

Sendo: ρ a massa específica da água (Kg/m^3), g a aceleração gravitacional (m/s^2) e H a altura significativa da onda (m).

A energia da onda analisada pela frequência do vento nas oito direções principais do vento, bem como a consideração do ângulo de incidência das ondas no

talude com relação a orientação da margem, isto é, a aquisição da energia das ondas perpendicular à margem, possibilitou quantificar a energia equivalente ativa.

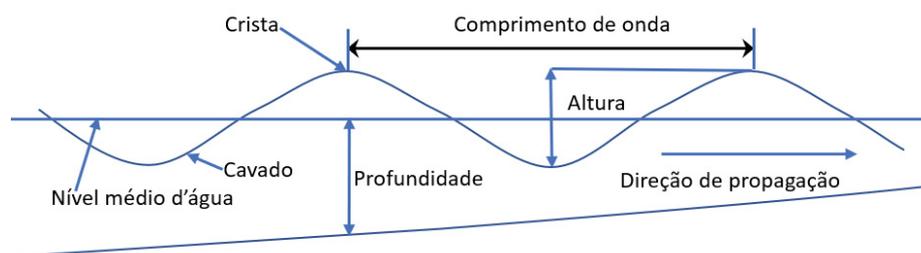
2.4.3 Modelos Estatísticos

Ondas podem ser explicadas geometricamente em função de sua altura (H), seu comprimento (L) e da profundidade da água (d). Demais conceitos úteis incluem amplitude da onda (A) (regularmente concedida como H/2), período (T), que é o tempo indispensável para que duas cristas (ou cavas) sucessivas passem em um ponto fixo, frequência (f), que é 1/T, número de onda (k) e a frequência angular (σ), sendo os dois últimos definidos como:

$$k = \frac{2\pi}{L} \text{ e } \sigma = \frac{2\pi}{T} \text{ ou } 2\pi f \quad (4)$$

Para explicar as ondas em dinâmica dos fluidos, suponha uma onda conforme a Figura 5.

FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DE UMA ONDA



FONTE: Adaptado de Meirelles (2007).

Segundo Marques (2013), quando se trata de uma onda senoidal, é natural definir sua altura como a distância vertical entre a crista e o cavado adjacente, todavia, a análise da altura das ondas em um ponto fixo no decorrer do tempo mostra sua variabilidade nesse ponto. Desta forma, é normal em se tratando de altura de ondas ser adotada a altura significativa (H_s), isto é, a altura relacionada à média do último terço da distribuição cumulativa de frequência das alturas.

A crista da onda é a porção mais superior da onda. O cavado (Vale de onda) é a depressão entre duas cristas. Altura da onda (H) é distância vertical entre o topo

de uma crista e o fundo de um cavado. O comprimento da onda (L) é a distância horizontal entre qualquer ponto de uma onda e o ponto correspondente da próxima onda. A amplitude da onda (A) é o deslocamento vertical máximo do nível médio da superfície d'água na ausência de ondas, equivalente a metade da altura da onda. Período de onda (T) é o intervalo de tempo entre a ocorrência de cristas (ou cavados) sucessivos, numa posição fixa. A elevação(η) é distância vertical de um ponto da superfície até o nível médio da superfície d'água. E a velocidade da onda (c) é a velocidade que uma onda passa por um ponto estacionário.

Em virtude do complexo processo de transferência de energia da atmosfera para o oceano, as ondas gravitacionais geradas pela ação do vento têm como particularidade a irregularidade, logo, suas propriedades não podem ter uma base onda-onda no domínio do tempo. Porém, se considerarmos que as ondas modificam randomicamente como um processo que resulta de uma variável aleatória, portanto é possível avaliar as propriedades estatísticas das ondas através do domínio da frequência e da probabilidade (OCHI, 1998). No domínio da frequência temos a análise espectral, que consiste em analisar a série temporal do registro da onda em componentes da frequência, em que a presença do espectro é o atributo primordial (MORETTIN; TOLOI, 2006).

É comum caracterizar o espectro a partir de termos simples, como altura significativa (H_s), período médio (T_m), período de pico (T_p), direção média (Dir) e direção de pico ($DirP$) (ALVES; MELO, 2001).

No que se refere à forma do espectro, percebemos que esta provém tanto das condições de geração das ondas, tais como velocidade e duração do vento, comprimento da pista, profundidade da água e agitação permanente das águas, como dos meios internos no campo de ondas, tais como interações não-lineares entre os componentes da onda e dissipação de energia (MASSEL, 1996). Há diversos modelos de concepção espectral, entre eles ressaltamos o apresentado por Pierson e Moskowitz (1964), denominado de Pierson e Moskowitz (PM), e o apresentado por Hasselmann e outros (1973), chamado de JONSWAP.

A formulação espectral Pierson e Moskowitz (PM) é certamente a mais conhecida e simples dentre todos os modelos apresentados, sendo desenvolvida a partir da análise de dados medidos no Atlântico Norte por Pierson e Moskowitz (1964). Esse espectro foi baseado na hipótese do qual, na inexistência da agitação permanente das águas, um vento com pista e duração excessiva seria suficiente

para gerar um estado de onda totalmente desenvolvido, homogêneo e estacionário (MOSKOWITZ, 1964, apud KOMEN *et al.*, 1984).

Com a incorporação de mares com pistas limitadas, o espectro JONSWAP tornou-se uma extensão do espectro de Pierson e Moskowitz. Este espectro tem como base um programa de medições de ondas que ocorreu nos anos de 1968 até 1969 no Mar do Norte, o Join North Sea Waves Project (JONSWAP) (MASSEL, 1996). Estes dados foram analisados por Hasselmann *et al.* (1973) e chegaram à conclusão de que um espectro jamais encontra-se completamente desenvolvido, ele permanece a se desenvolver por meio das interações não-lineares onda-onda. Portanto, nos últimos anos o espectro JONSWAP apresenta-se cada vez mais utilizado por cientistas e engenheiros (SORENSEN, 2006).

2.4.4 Modelos Numéricos

Com o avanço da tecnologia apresentaram-se os modelos numéricos de base física, aptos a fornecer resultados mais aproximados da realidade, o qual retratam resultados desenvolvidos a partir da aplicação de métodos numéricos que contemplam diversas variáveis. De acordo com Marques (2013), estes modelos são observados os mecanismos de geração e dissipação da onda, influências não lineares decorrentes de interação entre ondas e a possibilidade de se considerar campo de vento variável e influência das condições topo-batimétricas locais.

De modo geral os modelos numéricos baseiam-se no resultado de uma equação de balanço de energia, como abordado a seguir:

$$\frac{\partial E}{\partial \tau} + \nabla \cdot (c_g E) = S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (5)$$

Na equação mencionada a variável $E=E(f, \theta, x, t)$ é a representação do espectro bidimensional da ocorrência de ondas que são geradas em decorrência da frequência f e da direção de propagação θ ; S é o termo fonte composto de três componentes; S_{in} é a energia fornecida pelo vento; S_{nl} significa a transferência não linear de energia mediante interações entre ondas; e S_{ds} é um termo de dissipação.

Esses modelos numéricos determinam o espectro de ondas por meio de uma integração numérica da equação sobre o domínio de uma localização

geográfica. Os modelos podem apresentar diferenças em vários aspectos a considerar, sua representação do espectro, na forma assumida pelos termos fonte e no método de integração (DONELAN; HUI, 1985). O termo que dificulta a modelação é o termo fonte não-linear (S_{nl}) (PELLEGATTI, 1993). Essa especificação do termo é justificada devido a comum classificação dos modelos em decorrência de como ele é explorado.

Os modelos que possuem como base componentes espectrais discretos com um termo não linear com base em formulações de termos de componentes variados recebem a denominação de “modelos discretos acoplados”. Nesses modelos faz-se necessária estimativas de todos os componentes, mesmo que apenas para possibilitar calcular a evolução de qualquer um dos mesmos (CANDELLA, 1997).

É normal categorizar os modelos de ondas em modelos de primeira, segunda e terceira geração apoiando-se no método empregado para estabelecer o termo fonte não linear. Para a OMM (1998), o cálculo eficaz desse termo, somado à aos computadores mais poderosos, fez-se possível aprimorar modelos espectrais de terceira geração, eles são similares na estrutura e caracterizam os conhecimentos mais modernos da física do avanço das ondas.

O principal aspecto no progresso dos modelos de terceira geração está nas trocas de energia entre atmosfera e oceano e entre as próprias ondas, que são parametrizadas sem nenhum tipo de restrição quanto a formas espectrais pré-determinadas, possibilitando melhor desempenho de situações de alterações rápidas de direção de vento, assim como a interação entre vagas e agitação permanente das águas no mar (TOLMAN *et al.*, 2002).

O primeiro modelo de ondas de terceira geração desenvolvido foi o Wave Model - WAM (TOLMAN; CHALIKOV, 1996). É um modelo de terceira geração e, desse modo, diferentemente dos modelos de primeira e segunda geração que dispõem o termo fonte de dissipação S_{ds} parametrizado, calcula o espectro de onda por integração direta de uma equação do balanço de energia. O WAM é base para outros modelos que recebem esta denominação no sufixo, tal como, o modelo SWAN (BOOIJ *et al.*, 1996).

2.4.4.1 Modelo Numérico SWAN

O modelo conhecido no meio científico como “modelo *SWAN*”, acrônimo de *Simulating Waves Nearshore*, possibilita que a evolução do espectro direcional desde a área de geração até a margem do reservatório, seja obtido por meio de critérios da ondulação característicos das áreas de interesse (ALVES, 2006).

O *SWAN* é usado para obter cálculos do espectro de ondas em áreas costeiras, lagos e estuários, sendo capaz de utilizar campos de vento, batimetria e correntes fornecidos por demais modelos. É um modelo numérico de terceira geração que comporta parâmetros característicos da agitação marítima desde águas profundas a águas não muito profundas. É fundamentado na equação de balanço espectral da ação de onda, e surgiu da necessidade de complementar os modelos de terceira geração desenvolvidos, essencialmente, para aplicações operacionais preferencialmente em águas profundas. O modelo propaga, no domínio geográfico, o espectro direcional e, conseqüentemente, calcula a evolução das ondas geradas pelo vento em zonas costeiras. (BOOIJ *et al.*, 1999).

É um modelo não linear espectral, que tem como base a equação para a conservação da ação da onda, que possibilita a geração de ondas por meio do vento e executa a sua propagação levando em consideração vários fenômenos distintos que influenciam na propagação de ondas: difração, refração, rebentação e geração de harmônicas (CUCHIARA, 2006). O modelo *SWAN*, constitui-se no módulo de ondas do modelo numérico *DELFT3D* desenvolvido pela Delft University of Technology (TUDelft), Holanda, é um *software* de domínio público e está à disposição de qualquer pessoa que queira utilizá-lo.

De acordo com Vieira (2013), as vantagens do modelo *SWAN* são a sua multifuncionalidade, o qual, pode ser utilizado em grandes zonas costeiras abertas ou pode ser utilizado a zonas confinadas.

O modelo *SWAN* é usado mundialmente por instituições de pesquisa e foi validado por Booij, Ris e Holthuijsen (1999) em estudos na Alemanha e Holanda totalizando cinco estudos de casos (NICOLODI, 2007). A seguir é apresentado o QUADRO 1 com o resumo das principais potencialidades e limitações do modelo *SWAN*.

QUADRO 1 - RESUMO DAS PRINCIPAIS POTENCIALIDADES E LIMITAÇÕES DO MODELO
SWAN

| Processos de propagação de ondas | Processos de geração e dissipação de energia | Limitações |
|--|---|--|
| <p>Propagação no espaço geográfico</p> <p>Refração devido a variações espaciais no fundo e correntes</p> <p>Shoaling devido a variações espaciais no fundo e correntes</p> | <p>Geração de ondas pelo vento</p> <p>Dissipação tipo <i>whitecapping</i></p> <p>Dissipação de quebra de ondas induzida pelo fundo raso</p> | <p>Correntes: o SWAN não calcula correntes induzidas por ondas que ocorrem próximos a praia. Se necessárias, devem ser fornecidas por outro modelo</p> |
| <p>Reflexão por correntes opostas</p> <p>Difração. Incluído no modelo a partir da versão de 2006</p> | <p>Dissipação devido ao fundo</p> <p>Interações não lineares (triplas e quádruplas)</p> | <p>Difração: Versões anteriores a de 2006 não modelavam difração</p> |

FONTE: Nicolodi (2007).

2.4.4.2 Modelo Numérico DELFT3D

O Sistema de Modelagem Delft-3D foi desenvolvido pelo *WL Delft Hydraulics* localizado na Holanda. O sistema é composto pelos módulos: hidrodinâmicos, de onda, transporte de sedimentos, morfologia, qualidade da água, monitoramento da partícula e eutrofização. O módulo hidrodinâmico do Delft-3D é preparado para simular fluxos não estacionários em duas ou três dimensões, fenômenos de transporte resultantes de marés, descarga de água e efeitos meteorológicos. Este módulo pode ser utilizado em mares, regiões costeiras, estuários, reservatórios e rios. O módulo hidrodinâmico soluciona as equações de Navier-Stokes para um fluido complexo levando em consideração águas rasas, escalas horizontais de comprimento e de tempo são expressivamente superiores do que a escala vertical de Boussinesq (DELFT3D-FLOW, 2022).

Em modelos tridimensionais, as velocidades verticais derivam da equação da continuidade. A união de equações diferenciais parciais, com condições iniciais e de contorno apropriadas, é alcançado utilizando o esquema de diferenças finitas.

Os contornos de rios, estuários ou regiões costeiras em geral são curvos e não são bem representados por grades retangulares. Os contornos tornam-se irregulares e podem levar a erros significativos de discretização. Para diminuir esses erros em contornos ortogonais são usadas coordenadas curvilíneas. Coordenadas

curvilíneas também concedem aprimorar a grade localmente em áreas com grandes gradientes horizontais (DELFT3D-FLOW, 2022).

3 MATERIAIS

Neste trabalho é estudado o reservatório de Itaipu, o qual é formado pela implantação de usina hidrelétrica localizada no estado do Paraná, região sul do Brasil. Na sequência é apresentado o geoprocessamento das margens e os softwares *SWAN* e *ONDACAD*, que também foram utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

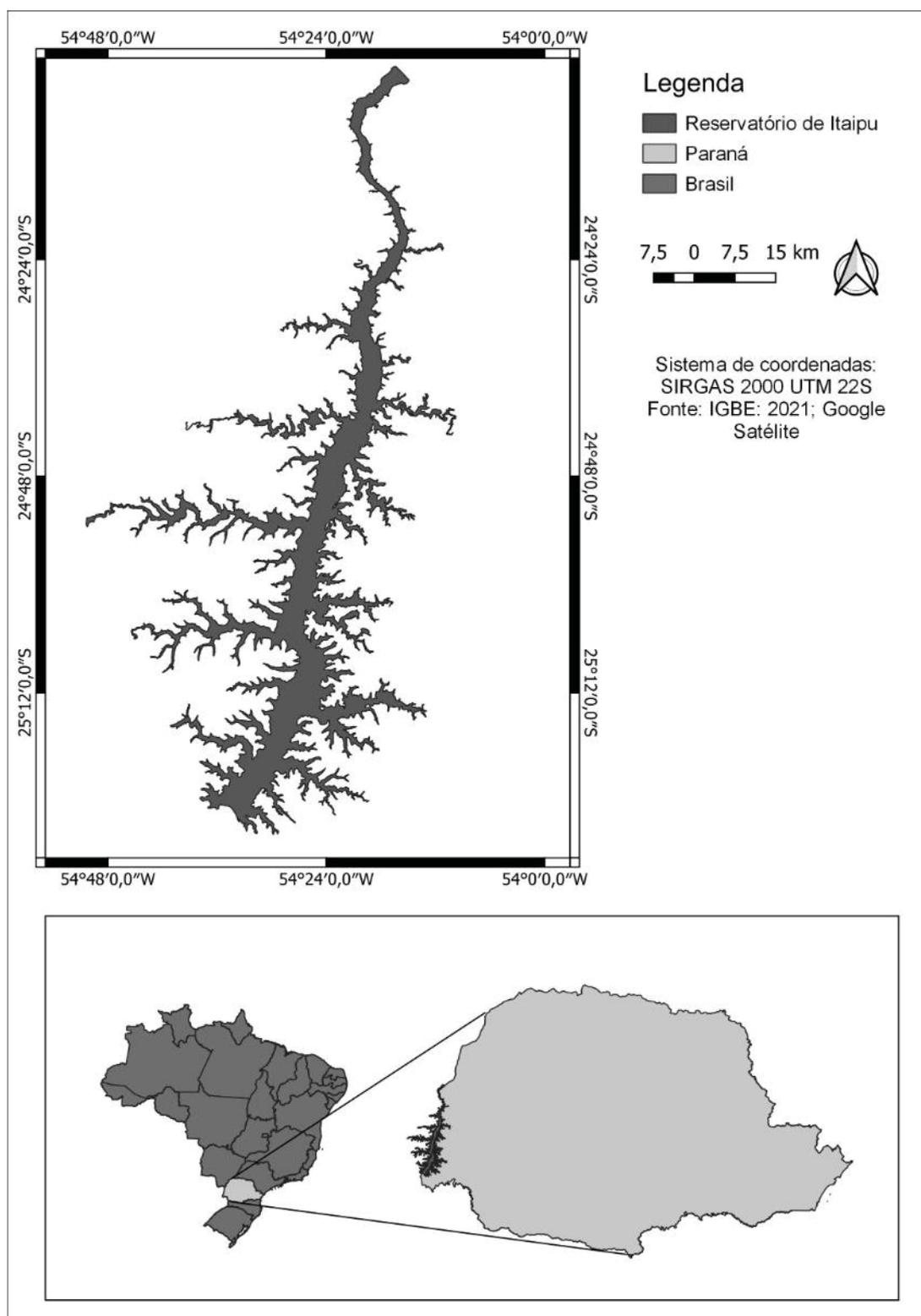
3.1 RESERVATÓRIO DE ITAIPU

O rio Paraná constitui a segunda maior bacia hidrográfica da América do Sul nele encontra-se inserido o Reservatório de Itaipu (HALES; PETRY, 2019). Determinante para a escolha do estudo, devido sua importância energética e seu potencial para a expansão de usos múltiplos, incluindo a aquicultura, turismo, lazer e navegação comercial, conforme representada na Figura 6.

3.1.1 Localização e características do reservatório da UHE de Itaipu

Localizado na divisa do Brasil com o Paraguai, o reservatório de Itaipu contempla um total de área inundada de 1.350 km², responsável pelo abastecimento da maior Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) existente no mundo, em geração de energia, com poder de geração de 14.000 MW, o início de operação da Usina é datado do ano de 1984, desde então já produziu cerca de 2,8 milhões de gigawatts-hora (GWh).

FIGURA 6 - LOCALIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO DE ITAIPU



FONTE: adaptado de Marques *et al.*, (2013)

Do total de energia consumida no Brasil, Itaipu é responsável por 8,4% e por 85,6% da energia que o Paraguai consome (ITAIPU BINACIONAL, 2022).

A localização da hidrelétrica é o Rio Paraná, no espaço de território que faz fronteira entre os dois países (Brasil e Paraguai), em uma distância aproximada de 14 km na localização ao norte da Ponte da Amizade. No caso, a área do presente estudo compreende as regiões de Foz do Iguaçu - *Ciudad del Este* até a cidade de Guaíra, ao norte. O limite a jusante é dado pela barragem de Itaipu, tendo o reservatório 170 km de comprimento e 7 km de largura média. A área total alagada é de 1.350 km², dos quais 770 km² estão em território brasileiro e outros 580 km² pertencem ao Paraguai, compreendendo um volume de água em nível máximo de 29 bilhões de m³. A profundidade média do reservatório é estimada em 22 m, atingindo 170 m nas proximidades da barragem. A área de drenagem é de 820.000 km² e os níveis de água são de 197 m (mínimo) e 220 m (máximo), respectivamente. A vazão média afluente em 2005, no Rio Paraná, foi de 11.094 m³/s, com valores diários que variaram entre 7.532 m³/s e 22.656 m³/s (ITAIPU BINACIONAL, 2007).

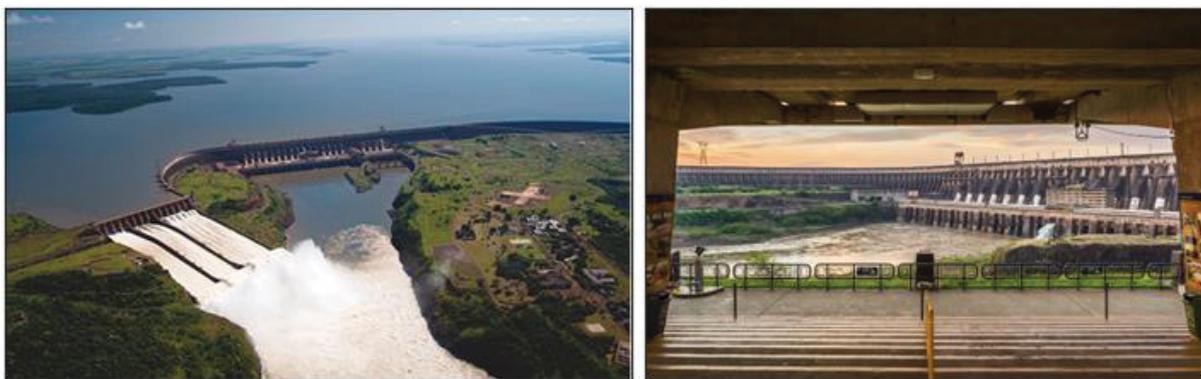
A idealização da usina teve início na década de 1960, período que foram assinados os primeiros acordos de cooperação perante os dois países, o nome Itaipu foi dado em função do local do rio Paraná escolhido, que era chamado de Itaipu significando em tupi “a pedra que canta”. A efetivação do empreendimento sucedeu-se após o tratado de 1973 ser assinado, que além de estabelecer os pontos cruciais para o subsídio da construção e a operação da empresa, em um modelo de sociedade binacional, que pertenciam aos dois países em partes igualitárias, também determinou que, cada um dos países teria a concessão de 50% da energia produzida, ocorrendo de uma das partes não usar toda a cota, deveria comercializar o que sobraria ao sócio sob preço de custo (IPEA, 2010).

Mediante acordo o Paraguai atualmente utiliza uma faixa minoritária totalizando 5% da energia produzida em Itaipu, quantidade suficiente para suprir 95% de sua demanda. A parte excedente é vendida de volta para o Brasil, porém, como o governo brasileiro na época da construção e por meio de acordos na prática custeou sozinho os custos da obra da usina, a capital paraguaia possui uma dívida com Brasília, que será finalizada em 2023, onde em função desta comercializa sua energia excedente com o país vizinho com abatimento de valor. Na época o custo da construção da usina foi de aproximadamente um total de US\$ 1 mil a cada quilowatt instalado, totalizando cerca de US\$ 14 bilhões, a fatia de colaboração do Paraguai para a construção da usina foi de apenas US\$ 50 milhões, que foram subsidiados por meio de financiamento pelo Banco do Brasil (IPEA, 2010).

3.1.2 Barragem

A estrutura de barragem da hidrelétrica é feita com concreto, enrocamento e terra que tem a função de represar a água até que ela chegasse a um desnível de 120 metros de queda bruta nominal, altura que possibilita a operação das turbinas com melhor aproveitamento, possui uma extensão total de 7.919 metros e sua altura de valor máxima é de 196 metros. O acionamento de giro das turbinas depende da parte superior da barragem, onde estão localizadas as tomadas de água, que são estruturas com comporta que permitem a passagem da água até os condutos forçados chegando à caixa espiral, conforme Figura 7 (ITAIPU BINACIONAL, 2022).

FIGURA 7 - VISTA ÁREA (ESQUERDA) E VISTA FRONTAL DA BARRAGEM DE ITAIPU (DIREITA)

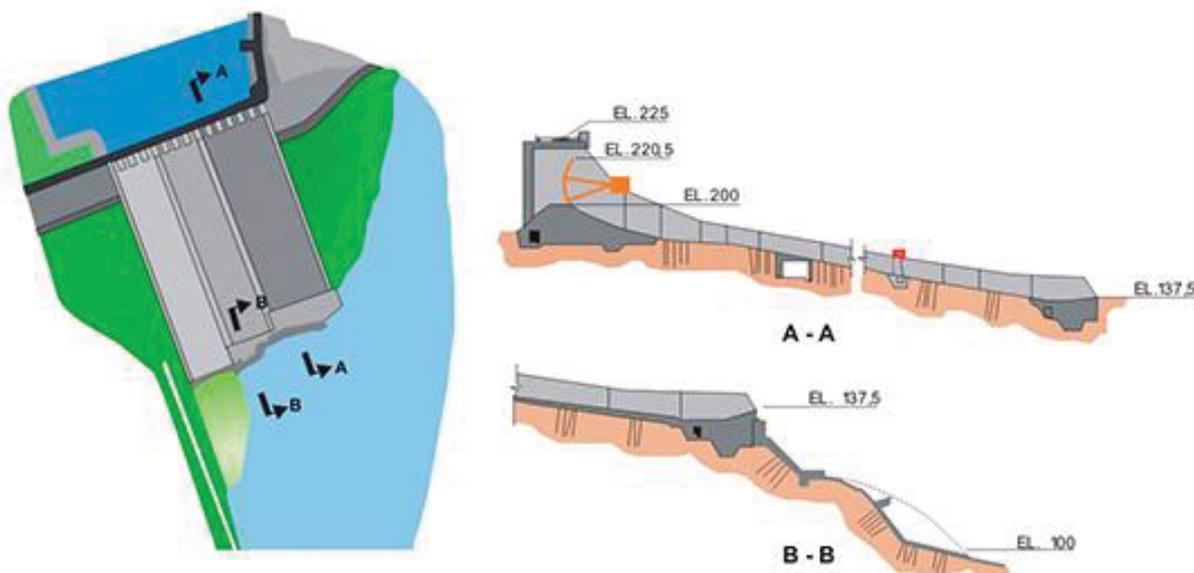


FONTE: Itaipu Binacional (2022).

3.1.3 Vertedouro

O vertedouro possui um valor máximo de vazão de 62.200 m³/s, possuindo no total de 14 comportas, com a função de dispensar a água que não será utilizada na geração de energia devido a capacidade máxima de armazenamento do reservatório estar sendo atingida, conforme a Figura 8. Essa capacidade máxima de extravasamento do vertedouro, supera em 40 vezes à vazão considerada média das Cataratas do Iguaçu, ele foi projetado para suportar uma enchente máxima de projeto no valor de 72.020 m³/s (ITAIPU BINACIONAL, 2022).

FIGURA 8 - VERTEDOURO



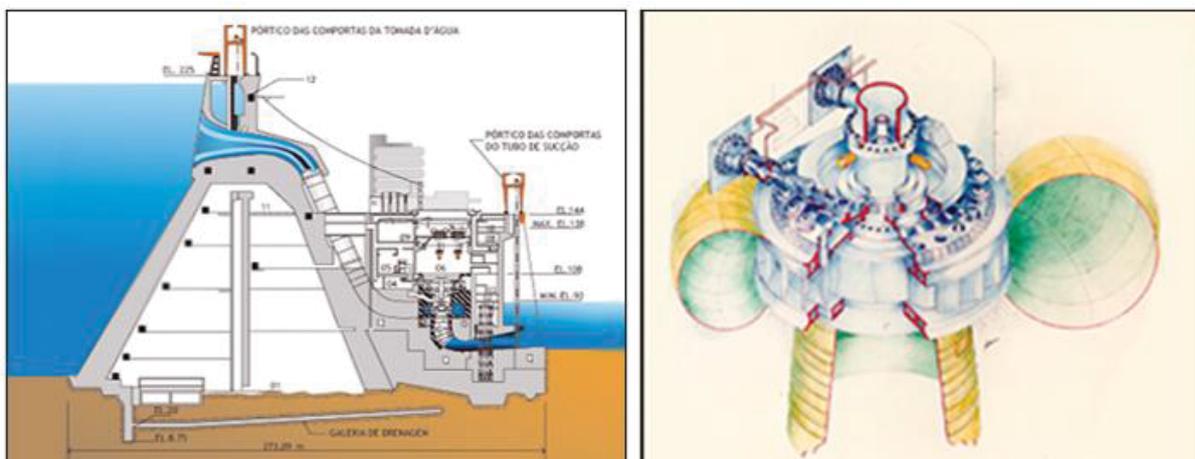
FONTE: Itaipu Binacional (2022).

3.1.4 Casa de força e turbina

A casa de força é o compartimento da estrutura onde estão concentrados os equipamentos eletromecânicos de onde depende toda a produção de energia na Itaipu, abrigando a caixa espiral, o gerador, a turbina, o regulador de velocidade e o sistema de excitação. No total são 20 unidades geradoras, com comprimento total de 968 m, uma largura correspondente de 99 m e possuindo uma altura de 112 m, conforme Figura 9 (ITAIPU BINACIONAL, 2022).

As turbinas existentes na usina são do tipo Francis, possuintes de uma potência nominal unitária de 715 MW, com um total de 20 unidades e velocidade de projeto de 50/60 Hz ou 90,9/92,3 rpm (rotação por minuto), a uma queda líquida de projeto de 118,4 metros de altura, possuindo como peça indivisível mais pesada o seu rotor com cerca de 296 toneladas, totalizando 3.360 toneladas cada unidade, conforme Figura 9 (ITAIPU BINACIONAL, 2022).

FIGURA 9 - CASA DE FORÇA (ESQUERDA) E TURBINA (DIREITA)



FONTE: Itaipu Binacional (2022).

3.1.5 Bacia hidrográfica

A bacia do Rio Paraná está localizada no eixo central do Planalto Meridional brasileiro, abrangendo seis estados e o Distrito Federal. Com uma área de contribuição com o Rio Iguaçu de 820.000 km². O Rio Paraná é detentor da marca de 4.900 km de extensão possuindo o título de segundo maior rio em extensão na América. Sua formação deve-se a união de dois grandes rios, o rio Grande e Parnaíba. Os principais tributários (a montante de Itaipu) do Rio Paraná são os Rios Tietê e Paranapanema (ITAIPU BINACIONAL, 2022). E alguns afluentes importantes como: Rios Ivaí, Piquiri, Verde, Pardo e Amambaí, entre outros.

Na bacia do Rio Paraná, dentro do limite brasileiro, está concentrado o maior núcleo de densidade demográfica do país. A bacia supre a demanda de várias necessidades dentre elas, o consumo humano, a indústria, irrigação, além de outras. Porém, trechos longos dessa água dos principais afluentes da parte superior do Rio Paraná não são indicados para uso humano, bem como a vida aquática, devido a poluição orgânica e inorgânica, causada muitas vezes pelas águas residuárias de origem industrial e agrotóxicos, além da extinção da mata ciliar que exerce efeito negativo na drenagem das águas quando ausentes. De certo modo, os barramentos ao longo dos rios têm contribuído para a autodepuração e retenção de poluentes, sendo constatado que tem melhorado a qualidade da água a jusante das barragens (ITAIPU BINACIONAL, 2022).

Os rios tributários são de grande importância no conhecimento do transporte de sedimentos. As atividades desenvolvidas nas margens da bacia hidrográfica e o

tipo de solo são elementos que precisam ser considerados, pois eles influenciam na quantidade e tipo de sedimento que será descarregado no rio (ZANELLA, 2021).

3.1.6 Clima

As características climáticas da área são estabelecidas resumidamente por três massas de ar que agem mais diretamente sobre a Região, no decorrer do ano (ITAIPU BINACIONAL, 2022).

A massa tropical atlântica age no decorrer do ano e ocasiona chuvas no verão, em contrapartida no inverno, tem grande estabilidade provocando uma estação mais seca. A massa polar atlântica na época em que age é o principal causador pelas chuvas de inverno ao sul da área. Esta massa, atuando com as flutuações da massa tropical atlântica, acarreta dias quentes e secos antes das frentes frias. A ação da massa polar e da massa tropical continental ocasiona a ocorrência de altas temperaturas, precedidas de altas precipitações, no caso da massa tropical, e um calor seco sucessivo de tempestades e temperaturas reduzidas em virtude ao avanço de massa polar (NOGUEIRA, 2010).

O clima na região do Reservatório da Usina de Itaipu é subtropical, temperado úmido, sem estação seca. A temperatura média anual é de 22° C, atingindo máximas perto de 40° C e mínimas em torno de 0° C. A umidade relativa do ar média é alta em todos os meses, com média anual de 80%. Desta forma, desde a criação do reservatório, em outubro de 1982, é realizado pela Itaipu ao longo de todos estes anos o acompanhamento contínuo de todas as ocorrências climáticas, não havendo o registro de nenhum dado científico que evidencie mudanças no comportamento do clima (ITAIPU BINACIONAL, 2022).

3.1.7 Vento

Gonçalves (2007) em sua pesquisa de análise de frequência regional de ventos extremos no Paraná, constatou que no reservatório objeto deste estudo, os dados de vento foram coletados, processados e descritos nas séries de vento horário de todas as estações meteorológicas do SIMEPAR entre os anos de 1997 e 2005.

Nas estações do SIMEPAR, o vento horário é definido como a média dos 10 registros de vento medidos nos 10 últimos segundos de cada hora. Os anemômetros foram instalados a 10 metros de altura, sendo de modelo YOUNG 05103-11A, cujas especificações estão apresentadas na TABELA 2. O anemômetro é composto por quatro hélices que, ao girarem, geram um sinal senoidal com frequência equivalente à velocidade do vento.

TABELA 2 - ESPECIFICAÇÕES DOS ANEMÔMETROS DO SIMEPAR

| Parâmetro | Especificação |
|---|--|
| Modelo | 05103-11A: YOUNG |
| Banda de medição | 0,0 m s ⁻¹ a 60 m s ⁻¹ |
| Rajada máxima | 100 m s ⁻¹ |
| Erro | 0,3 m s ⁻¹ |
| Velocidade mínima para medição da direção | 1,1 m s ⁻¹ |

FONTE: adaptado de Gonçalves (2007)

Guetter *et al.* (2005) declararam que o desenvolvimento de sistemas automáticos de controle de qualidade para vento retrata um desafio relevante, já que diversas vezes é custoso distinguir um registro suspeito de um vento severo de curta duração. Deste modo, o corte de dados duvidosos deve estar condicionado à análise paralela com outros dados meteorológicos e com os dados de estações vizinhas para o instante do registro suspeito. Na condição dos registros espúrios com altos valores sejam preservados nas series, logo se aumentaria a frequência de casos extremos, distorcendo a estimativa de parâmetros que estabelecem a função de probabilidade de extremos e os tempos de retorno. O controle de qualidade não pode, em nenhum de seus testes, descartar os registros extremos reais.

O percentual de falhas e dados espúrios foi de 3,18% para os registros de vento horário do SIMEPAR em Foz do Iguaçu.

Conforme Gonçalves (2007), os ventos extremos para Itaipu são mostrados pela Tabela 3:

TABELA 3 - VENTOS SEVEROS RELACIONADOS A PERÍODOS DE RETORNO

| TR (anos) | 10 | 20 | 50 | 100 |
|-----------|------|------|------|------|
| U (m/s) | 22,8 | 26,4 | 35,3 | 47,8 |

FONTE: adaptado de Gonçalves (2007)

3.2 GEOPROCESSAMENTO DAS MARGENS

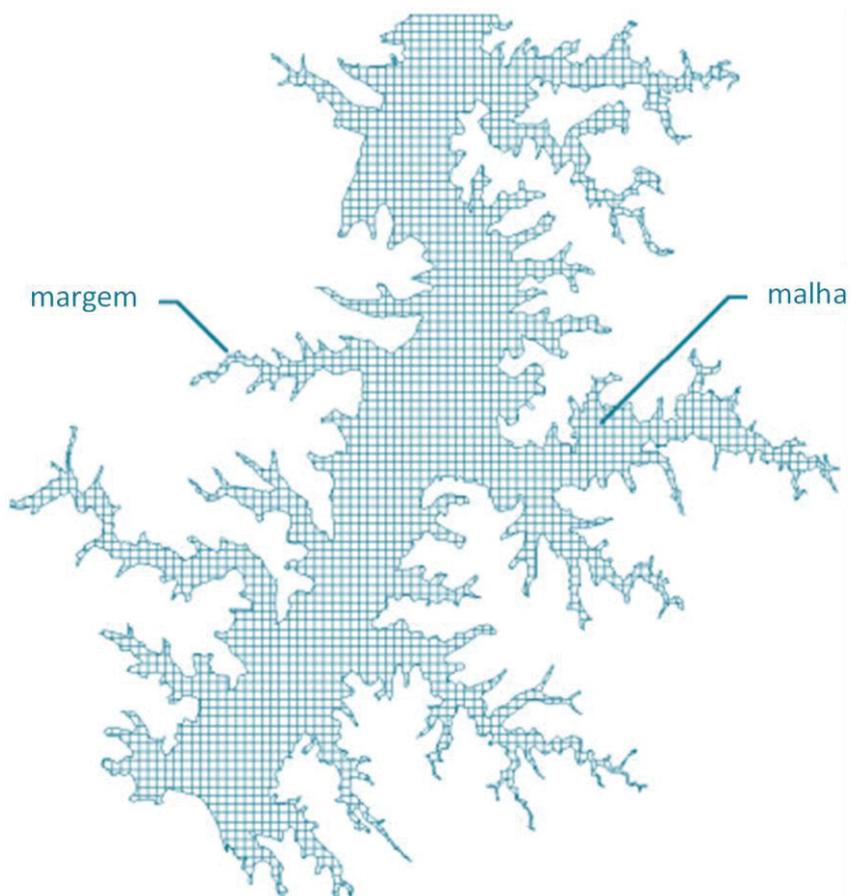
De acordo com Roque *et al.* (2006) a escolha exata dos pontos que delimitam uma área da superfície terrestre sobre um ponto específico é conhecida como georreferenciamento. Trata-se de um método com aprimoração que tem o intuito de possibilitar o conhecimento das coordenadas em um sistema de referência adotado por intermédio de coordenadas de pontos da imagem ou do mapa e serem georreferenciados.

O traçado da linha que contorna a interface ar-água-terra foram identificadas pelos corpos de água através da modelagem. E eventuais oscilações no traçado da margem pela variabilidade dos níveis de água foram desconsideradas.

A determinação precisa por meio de gráfico do contorno do objeto de estudo, neste caso, um reservatório, requer a precisão da base geográfica utilizada. Esta base assume função essencial no processo de determinação do *fetch*. A base de dados geográficos pode ser uma imagem de satélite fornecidas por programas e banco de dados virtuais, um mapa, ou outro elemento de natureza gráfica que permita a extração do contorno da margem (MARQUES; GUETER, 2011).

A execução de um modelo computacional necessita da aplicação de uma malha numérica que permite a discretização da superfície a ser representada, dispondo da margem do reservatório como fronteira. A malha é percorrida de forma automática, sendo os nós contidos o fator de interesse para a determinação do *fetch*. Um arquivo de contorno, em coordenadas UTM foi utilizado na geração da malha conforme representação computacional da Figura 10 (MARQUES; GUETER, 2011).

FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL



FONTE: O Autor (2022)

A escolha de um software de modelagem computacional depende de vários fatores, como dos dados de entrada requisitados pelo modelo, da exatidão requerida, sua validade, objetivos a serem atingidos, facilidade de uso, exigências de hardware, entre outros fatores.

Em razão da dificuldade de se adequar informações gráficas ao processamento matemático, Marques (2013) desenvolveu um programa em linguagem computacional LISP, que dispõe flexibilidade na manipulação de estruturas de dados genéricos associada a uma interface gráfica. O grande desafio no desenvolvimento deste software é adequar um programa com base geométrica com o objetivo a se comportar como um modelo de natureza numérica. Esta adversidade foi solucionada utilizando a linguagem de programação AutoLISP, que contém a linguagem LISP no ambiente AutoCAD.

3.3 MODELOS COMPUTACIONAIS

3.3.1 SWAN

O modelo *SWAN* por ser distribuído gratuitamente e concebido em código aberto é largamente utilizado em pesquisas e atividades de consultoria (HOLTHUIJSEN, 2007).

A técnica de modelagem paramétrica bidimensional é fortemente condicionada pela correlação entre um campo de *fetch* e um campo de ondas. As informações sobre ondas através de imagens de satélite ainda não atingiram o grau e precisão suficiente e a distribuição de uma rede de ondógrafos torna os custos proibitivos. Deste modo, decidiu-se pela geração do campo de ondas com o uso do modelo *SWAN* (HOLTHUIJSEN, 2010). Ao se adotar esse modelo, assumiu-se que os resultados por ele simulados representam fielmente o fenômeno analisado.

Como são consideradas ondas geradas em águas continentais e, portanto, sob influência das margens, adotou-se a condição de campo de ondas limitado pelo *fetch* na obtenção da equação paramétrica bidimensional. A adoção dessa condição é fundamental na utilização do modelo numérico. Deste modo, com base em um campo de vento uniforme e em um campo de *fetch*, é possível a determinação de um campo de ondas.

O modelo *SWAN* além de ser utilizado para obter cálculos do espectro de ondas em áreas costeiras, lagos e estuários, é capaz de utilizar campos de vento, batimetria e correntes fornecidos por demais modelos.

É um modelo não linear espectral, que tem como base uma equação para a duração da ação da onda. Para determinar uma equação paramétrica baseando-se nos resultados de um modelo numérico é fundamental a definição da provável equação e dos coeficientes a serem determinados.

3.3.2 ONDACAD

O modelo *ONDACAD* é um software que vem sendo desenvolvido desde 2005 pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá, visando à simulação do campo de ondas geradas pela ação do vento em corpos d'água como lagos e reservatórios. Apresentado pela primeira vez por Marques e

Guetter (2011) e descrito mais detalhadamente por Marques (2013). Atualmente continua sendo aprimorado, não sendo um software de domínio público.

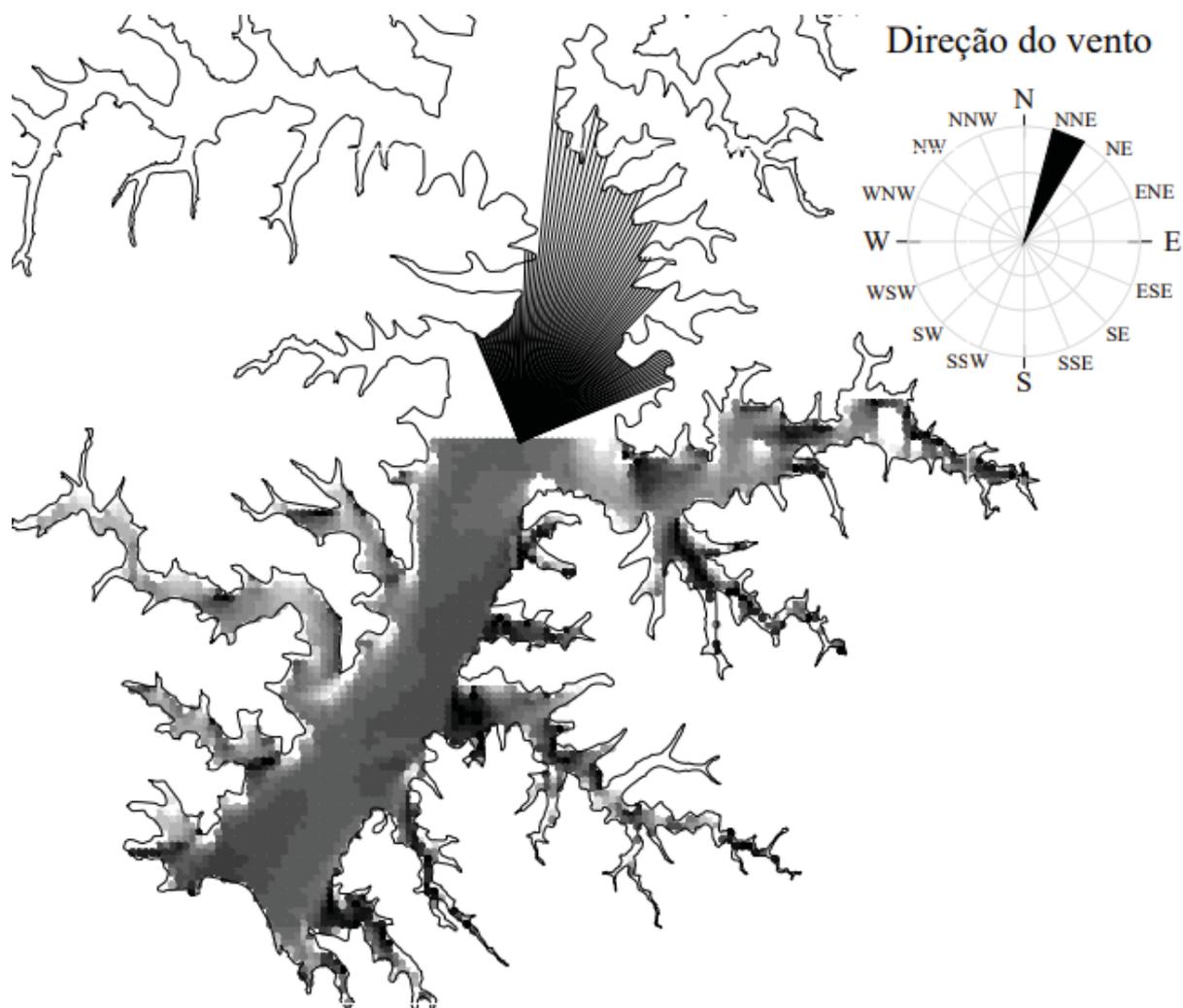
Esse modelo define o campo de altura da onda por meio da utilização de uma equação paramétrica desenvolvida baseado no módulo de ondas do modelo SWAN, viabilizando a concepção de um modelo paramétrico de representação bidimensional. O modelo gera inicialmente um campo de *fetch*, ou seja, a representação bidimensional do *fetch* (ARANTES, 2019).

De acordo com Marques (2005), os métodos para encontrar o *fetch* compõem-se em métodos de aplicação custosa por determinar uma quantidade alta de operações gráficas, situação está que conduz o operador a estabelecer o *fetch* para poucos pontos, incluindo um fator de subjetividade à aplicação do método. Além disso, segundo o autor, a definição do maior *fetch* e sua localização é mais precisa quanto maior for a quantidade de pontos observados.

O modelo computacional ONDACAD foi proposto para solucionar estas dificuldades. Criado em linguagem LISP (*List Processing*), o programa fornece a distribuição do *fetch* com base na discretização da superfície do corpo de água pela geração de uma malha estruturada quadrangular, tendo a margem como limite.

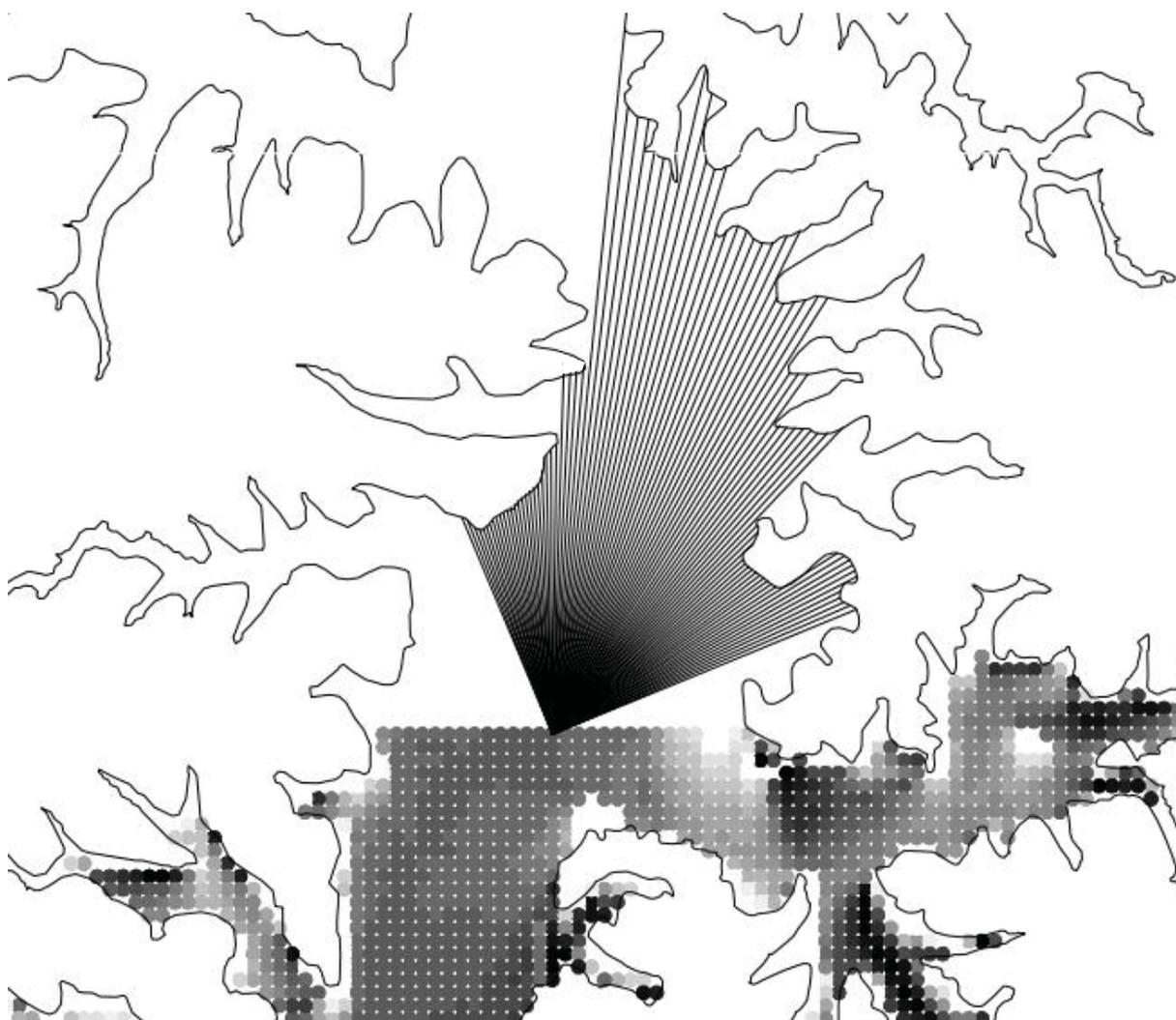
É possível notar os elementos que fazem parte na definição do campo de *fetch* com base na execução do programa ONDACAD para um reservatório de margens tipicamente dendríticas e para o vento de direção norte, onde a técnica de execução do método de Saville foi interrompido de propósito, na Figura 11. É possível também observar as linhas auxiliares para a definição do *fetch* efetivo, a malha usada para determinar os pontos de cálculo e a delimitação da geometria do reservatório. De acordo com a imagem, o campo de *fetch* já foi parcialmente obtido (SILVA, 2017).

FIGURA 11 - DETALHE DOS ELEMENTOS GRÁFICOS ENVOLVIDOS NA EXECUÇÃO DO MODELO



FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 12 - AMPLIAÇÃO DE PARTE DA FIGURA 11



FONTE: O Autor (2022)

A execução do modelo computacional é simples. O usuário deve incluir o formato das margens do reservatório, cujas coordenadas são determinadas no display do AutoCAD, a distância entre os pontos e a direção da malha, as duas são inseridas na linha de comando do AutoCAD. Uma etapa de pré-processamento é essencial para reproduzir a malha, a qual é repetida apenas uma vez para cada direção do vento analisada.

O resultado de um modelo numérico de terceira geração representa uma peça relevante neste processo de correlação da altura significativa da onda com o comprimento do *fetch* e a intensidade do vento. Essa teoria leva à hipótese que norteia este trabalho, a qual considera que a altura da onda pode ser determinada de modo confiável e ágil exclusivamente com base na geometria do reservatório e no campo de vento incidente (MARQUES, 2013).

No processo para determinar uma equação paramétrica baseando-se nos resultados de um modelo numérico torna-se primordial a definição da provável equação e dos coeficientes a serem determinados.

Nesta fase considerou determinar a estrutura da equação paramétrica baseando-se na equação de onda do modelo *SWAN*. Levando em consideração as correlações entre grandezas adimensionais de energia (E^*), altura de onda (H^*) e *fetch* (F^*).

4 MÉTODO

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento desta tese. Esta pesquisa pode ser classificada, quanta a sua natureza, como sendo uma pesquisa aplicada, ou seja, tem uma finalidade prática (VERGARA, 1998).

As normas bibliográficas utilizadas nesta tese estiveram de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2021).

A seguir são descritos os procedimentos metodológicos adotados para alcançar os objetivos propostos desta pesquisa.

4.1 OBTENÇÃO DO MAPA DA UHE DE ITAIPU

Primeiramente, determina-se o traçado da margem do corpo d'água a partir de uma imagem de satélite, sendo esta última opção a adotada no presente trabalho. Com a geometria da superfície definida, são estabelecidas a dimensão e a orientação da malha utilizada para discretizar a área de estudo.

A base cartográfica do contorno do corpo d'água a ser modelado foi composta a partir de imagens de satélite com a utilização do Google Earth (imagens já em arquivo eletrônico). Para a escolha da base ideal levou-se em conta que, a partir da data de geração das imagens, não houve mudanças nos contornos do corpo d'água e o detalhamento dos mesmos era suficiente para os objetivos do projeto. A digitalização do contorno foi feita com o auxílio do software AutoCAD, para posteriormente salvar este arquivo em formato *.dwg. Com a posse da figura a ser digitalizada deve-se colá-la na área de trabalho do AutoCAD.

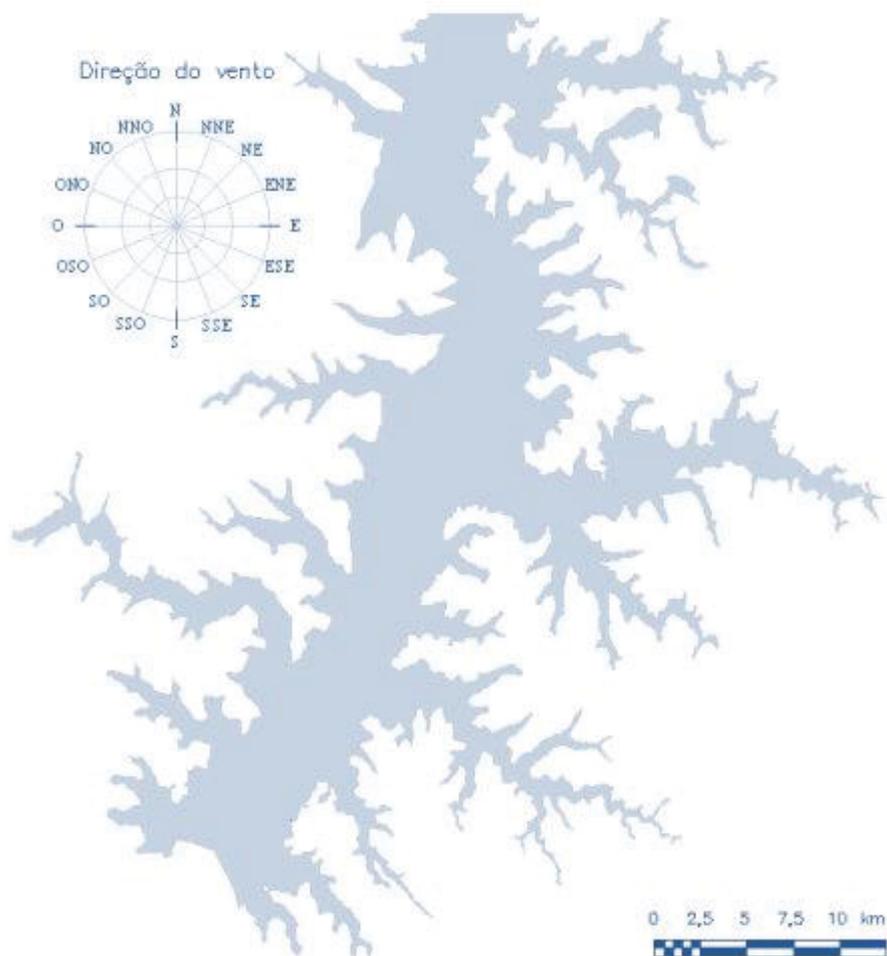
4.2 REALIZAÇÃO DO GEOREFERENCIAMENTO

É a ilustração gráfica da margem que delimita as fronteiras para aplicação do método proposto por Saville (1954). A relevância da definição gráfica precisa do contorno da margem justifica a relevância e a exatidão da base geográfica utilizada. Essa base assume atribuição fundamental no processo para determinação do *fetch*. A base de dados geográficos pode ser um mapa, uma imagem de satélite ou outro elemento de natureza gráfica que permita a extração do contorno da margem. Nesta

pesquisa o contorno georeferenciado das margens foi obtido mediante imagem de satélite igualmente georeferenciada em ambiente AutoCAD.

Após a digitalização da imagem é feita a reescalagem, para que o mapa digitalizado obtenha o tamanho original (com a extensão CAD utilizado), e seu georeferenciamento. O detalhamento dos contornos deve estar de acordo com os objetivos do projeto e a precisão desejada nos resultados da modelagem. A representação georeferenciada do Reservatório de Itaipu está ilustrada na Figura 13.

FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO GEOREFERENCIADA DO RESERVATÓRIO DE ITAIPU



FONTE: O Autor (2022).

4.3 CONFECÇÃO DA MALHA NUMÉRICA

Para interpretação numérica das equações em águas rasas pelo modelo Def3D, e para melhor representar a morfologia natural das áreas modeladas, o modelo supõe uma malha ortogonal e bem-estruturada.

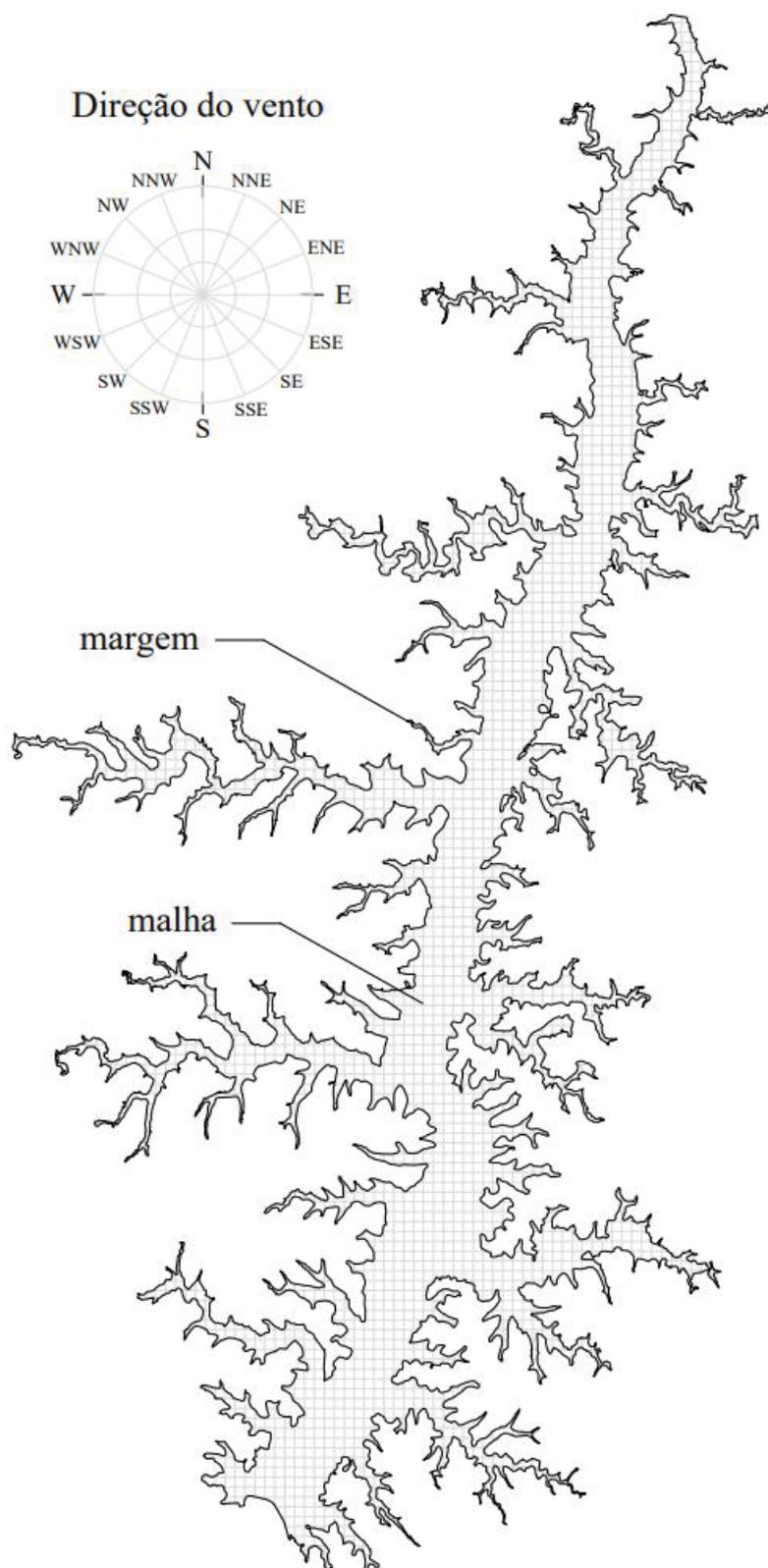
Os nós da malha são percorridos respeitando-se a direção do vento adotada e aplicando o método de determinação do *fetch* indicado pelo operador. Desta forma são realizadas as aplicações do método de Saville (1954) em alta resolução, ou seja, com resolução de um grau entre as linhas radiais. O modelo permite a obtenção do *fetch* em aproximadamente 15 mil pontos distribuídos no reservatório.

A malha obtida é curvilínea, de forma que as linhas de malha na direção longitudinal seguem a direção dos fluxos mais intensos, para minimizar erros numéricos. Nas regiões onde o reservatório é mais estreito, a malha possui maior resolução para que o fluxo seja bem representado em todo o domínio.

O mapa digitalizado é constituído por uma polilinha que contorna o reservatório, ou seja, uma polilinha que divide a água da terra. Esta polilinha deve ser construída manualmente (o usuário vai ajustando com cliques) através do comando *pline* do AutoCAD. É importante salientar que a polilinha do contorno do lago deve ser uma figura geométrica fechada, ou seja, o ponto final da digitalização deve coincidir com o ponto inicial.

A figura geométrica fechada e a malha numérica gerada utilizando polilinha no AutoCad com base nos pontos do contorno do reservatório de Itaipu está ilustrada na Figura 14. A malha numérica abrange o reservatório desde o contorno aberto norte em Guaíra até o contorno aberto sul na barragem de Itaipu e inclui os afluentes das duas margens do reservatório.

FIGURA 14 - MALHA NUMÉRICA



FONTE: O Autor (2022).

Após a malha numérica gerada com a utilização da polilinha do AutoCad, foi necessário determinar o espaçamento da malha e quantidade de nós. Na execução

do modelo computacional, a poligonal que caracteriza a margem, por contornar a superfície livre, é compreendida pelo programa como o objeto de referência na circunscrição da malha. Desta forma, a margem é compreendida como um contorno no qual a malha não pode atravessá-lo.

Para a geração de um mapa de altura de ondas pelo modelo ONDACAD é necessário indicar no modelo a equação paramétrica a ser utilizada, a direção e a velocidade do vento.

Neste trabalho foi adotado um espaçamento de 300 metros na malha para o reservatório estudado, o qual será aplicado para obtenção do campo de *fetch* na execução do modelo computacional.

4.4 OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO PARAMÉTRICA

Para a obtenção da equação paramétrica será adotada a técnica baseada no ajuste de pontos a um diagrama adimensional de *fetch* (ONDACAD) versus altura da onda (SWAN).

4.4.1 Obtenção do campo de *fetch* pelo modelo ONDACAD

A determinação da distribuição do *fetch* é feita com base no método geométrico apresentado por Saville (1954). O modelo ONDACAD obtém a distribuição do *fetch* mediante a discretização da superfície do corpo de água por uma malha estruturada quadrangular. Em cada nó é aplicado o método de Saville em alta resolução para uma determinada direção do vento. Ao todo serão simulados os mapas de distribuição do *fetch* para dezesseis direções.

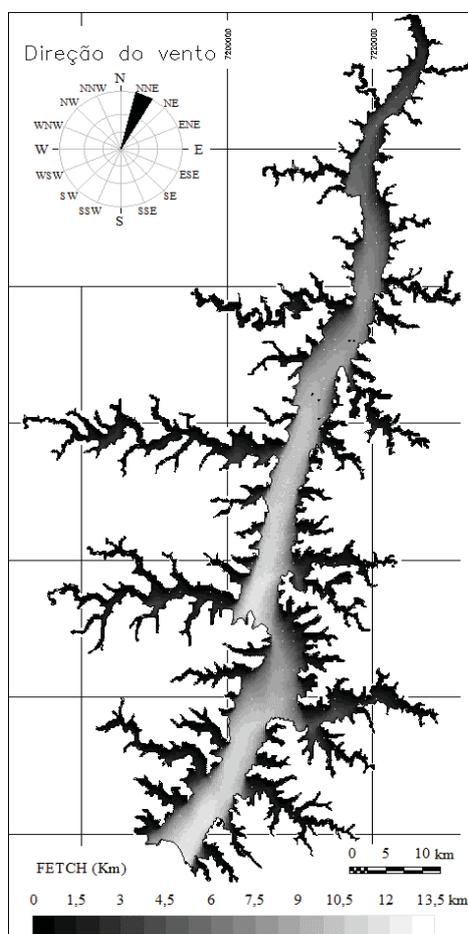
A execução do software ONDACAD concebe 16 arquivos, é executada apenas uma vez para cada uma das dezesseis direções, gerando um arquivo em formato ascii para cada direção do vento. Estes arquivos exibem os dados em três colunas, sendo que as duas primeiras se referem à latitude e longitude do ponto, respectivamente, e a terceira ao valor do *fetch* associado em metros. O arquivo representado pela Figura 15 refere-se, deste modo, à direção nor-nordeste (NNE), ou seja, entre o norte (N) e o nordeste (NE) a 67.5 graus conforme convenção trigonométrica e a malha com resolução de 300 metros.

FIGURA 15 - ESTRUTURA DOS DADOS EM FORMATO ASCII

direção → malha
 ↑
dir67.5-300
 (776900 7307400 906.8)
 (776600 7307400 1087.3)
 (777500 7307100 341.3)
 (777200 7307100 798.2)
 (776900 7307100 1097)
 (776600 7307100 1309.3)
 (777500 7306800 572.4)
 (777200 7306800 980.4)
 (776900 7306800 1282.2)
 (776600 7306800 1501.3)
 ↓ ↓ ↓
 latitude longitude fetch

FONTE: O Autor (2022).

A partir destes arquivos são gerados mapas cromáticos dos campos de *fetch* do reservatório em estudo conforme Figura 16 baseando-se na Figura 15, para direção nor-nordeste.

FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO DO *FETCH* PARA DIREÇÃO NOR-NORDESTE

FONTE: O Autor (2022).

4.4.2 Simulação dos campos de ondas pelo modelo SWAN

A efetividade em converter um campo de *fetch* em um campo de altura de onda, como demonstrado por Marques (2013) por meio da técnica MPB, permitiu que fosse aplicada a equação 2 para a determinação da energia da onda.

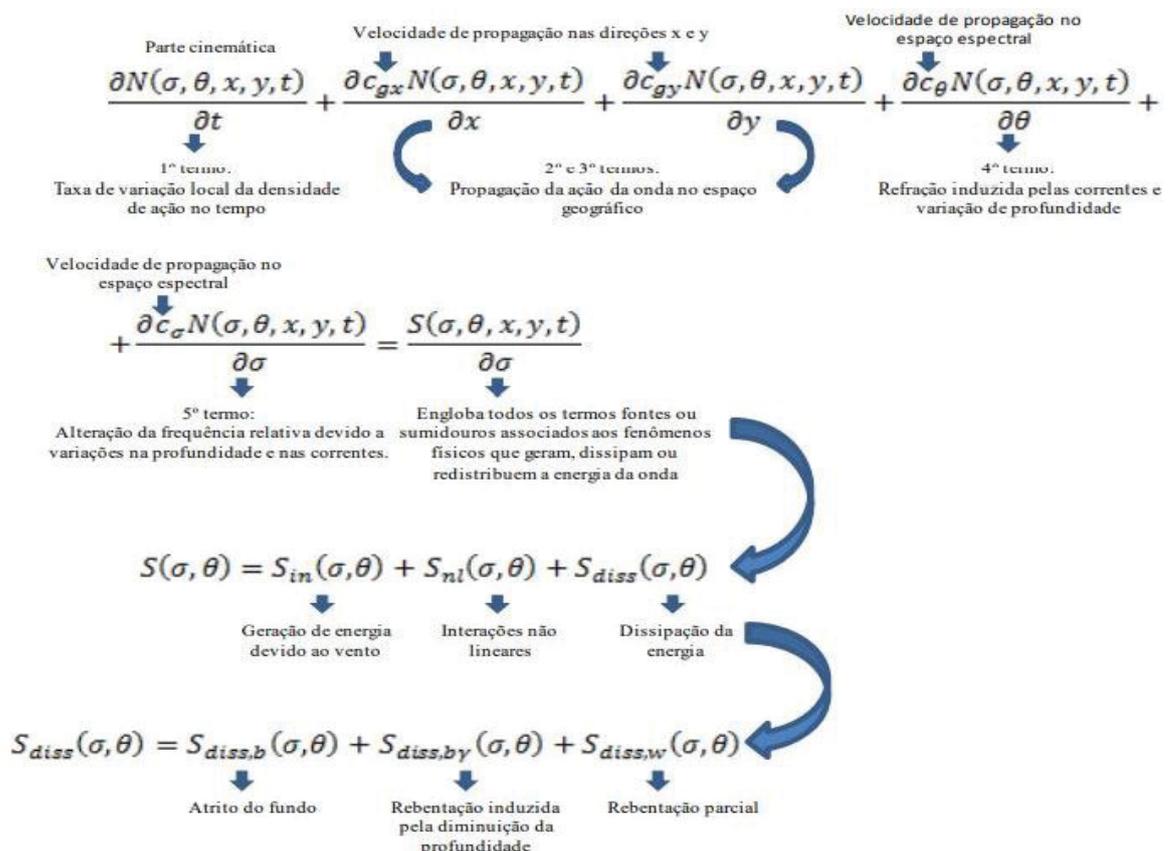
A modelagem da propagação das ondas em zonas costeiras aplicando o modelo *SWAN* baseia-se na evolução da densidade de ação $N(x,t,\sigma,\theta)$, no espaço x e no tempo t , ao contrário do espectro de densidade de energia $E(\sigma,\theta)$. Isso dado que a densidade de ação é perpetuada na existência de correntes, ao oposto da densidade de energia (Whitham *et al.*, 1974 apud Holthuijsen, 2007), segundo a equação a seguir:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (6)$$

sendo σ a frequência angular e θ a direção das ondas.

As equações base do modelo *SWAN* são apresentadas a seguir na Figura 17:

FIGURA 17 - EQUAÇÕES BASE DO MODELO SWAN



FONTE: Booij *et al.* (1996)

Para a obtenção do campo de ondas pelo *SWAN*, assim como utilizado no modelo *ONDACAD*, foi definida uma malha com 300m de resolução, permitindo a construção de aproximadamente 15 mil nós.

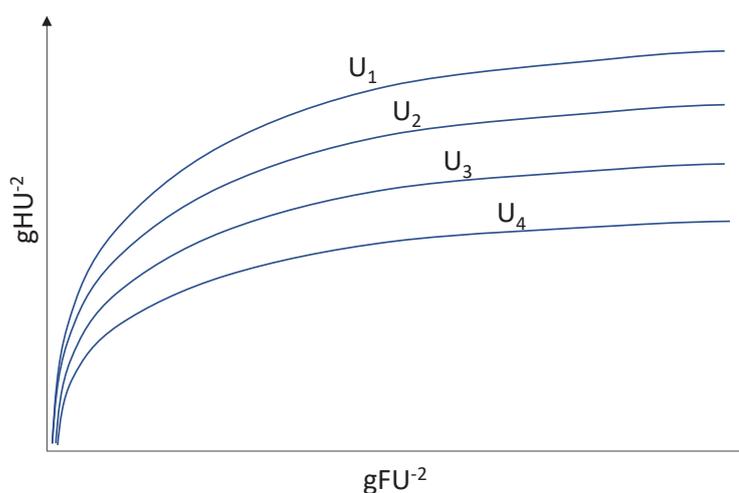
Para a intensidade do vento, foram realizadas simulações do campo de ondas para o reservatório da UHE de Itaipu utilizando-se ventos de 5, 10, 15 e 20 ms^{-1} .

Desta forma, os mapas de simulação de altura de ondas obtidos pela aplicação do modelo *SWAN* foram utilizados aos mapas de *fetch* de modo a permitir a concepção de uma equação paramétrica específica que relacione a altura da onda ao *fetch* e à intensidade do vento.

4.4.3 Obtenção da equação paramétrica de altura de ondas

Essa equação é determinada por análise dimensional pela utilização dos resultados dos modelos computacionais *SWAN* e *ONDACAD* a partir da técnica MPB. Para a obtenção da equação paramétrica que relaciona o *fetch* (F) e a intensidade do vento (U) à energia da onda, foi considerada a topologia de uma curva do tipo potência no diagrama de *fetch* adimensional (gF/U^2) versus altura da onda adimensional (gH/U^2), apresentada na Figura 18.

FIGURA 18 - DIAGRAMA ADIMENSIONAL DE *FETCH* VERSUS ALTURA DE ONDA



FONTE: O Autor (2022).

A topologia de uma curva tipo potência é representada pela seguinte equação:

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha \left(\frac{gF}{U^2} \right)^\beta \quad (7)$$

Sendo:

H: altura da onda (m)

g: aceleração gravitacional (9,81 m/s²)

U: velocidade do vento (m/s)

F: comprimento do *fetch* (m)

Ou seja, a partir da relação entre os adimensionais, representados pelo asterisco nas equações a seguir:

$$H^* \left(\frac{gH}{U^2} \right) \quad (8)$$

$$F^* \left(\frac{gF}{U^2} \right) \quad (9)$$

Isolando a altura da onda (H), que nos interessa resulta em:

$$H = \alpha \frac{U^2}{g} \left(\frac{gF}{U^2} \right)^\beta \quad (10)$$

Os valores de altura de onda adimensional, obtidos pelo modelo *SWAN*, são posicionados no eixo vertical, obtendo-se um diagrama adimensional de *fetch* vs. ondas. Os valores de *fetch* adimensionais obtidos pela simulação do campo de *fetch* na direção do maior *fetch*, pelo modelo *ONDACAD*, são posicionados no eixo horizontal de um gráfico x-y.

O ajuste de curvas do tipo potência às nuvens de pontos permitirá a obtenção da equação paramétrica que transformará um campo de *fetch* em um campo de ondas. Com o resultado foi possível obter uma equação paramétrica específica de altura de ondas para o reservatório estudado, representada nas equações 11 e 12:

$$(gHU^{-2}) = \alpha (gFU^{-2})^\beta \quad (11)$$

$$H = \alpha \frac{U^2}{g} (gFU^{-2})^\beta \quad (12)$$

Ou seja, os coeficientes α e β serão determinados pela análise de correlação entre o campo de *fetch* gerado pelo modelo ONDACAD e o campo de ondas gerado pelo módulo *SWAN*.

O modelo paramétrico Itaipu consiste na equação paramétrica contendo os coeficientes α e β determinados.

4.5 VALIDAÇÃO DO MODELO

O processo de validação consiste na comparação dos mapas de altura de ondas gerados pelo modelo *SWAN* com os mapas gerados pelo modelo ONDACAD mediante a aplicação da equação paramétrica concebida. A comparação será feita mediante a geração de mapas de desvio para o reservatório para quatro condições de vento (5, 10, 15 e 20 ms^{-1}).

Os desvios percentuais entre as alturas de ondas do modelo *SWAN* (H_{SWAN}) e o modelo Itaipu (H_{ITAIPU}) são determinados em cada nó da malha computacional e, portanto, pixel a pixel, conforme a equação seguinte:

$$\text{Desvio}(\%) = \left| \frac{H_{\text{SWAN}} - H_{\text{ITAIPU}}}{H_{\text{SWAN}}} \right| * 100 \quad (13)$$

A aplicação da equação anterior diretamente sobre a malha computacional dá origem a um mapa de distribuição dos desvios, apresentando a distribuição comparativa entre os modelos.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos assim como uma discussão acerca destes.

Serão demonstrados os resultados obtidos a partir da aplicação do programa computacional ONDACAD. Tal software possibilitou a realização do cálculo de *fetch* para uma extensa quantidade de pontos distribuídos sobre as superfícies do reservatório estudado, levando em consideração diferentes direções do vento, com exatidão e com tempo reduzido de processamento.

Os campos de *fetch* resultantes para o reservatório foram construídos com base no Método de Saville, com o objetivo de se realizar uma comparação entre métodos distintos para cálculo de *fetch*.

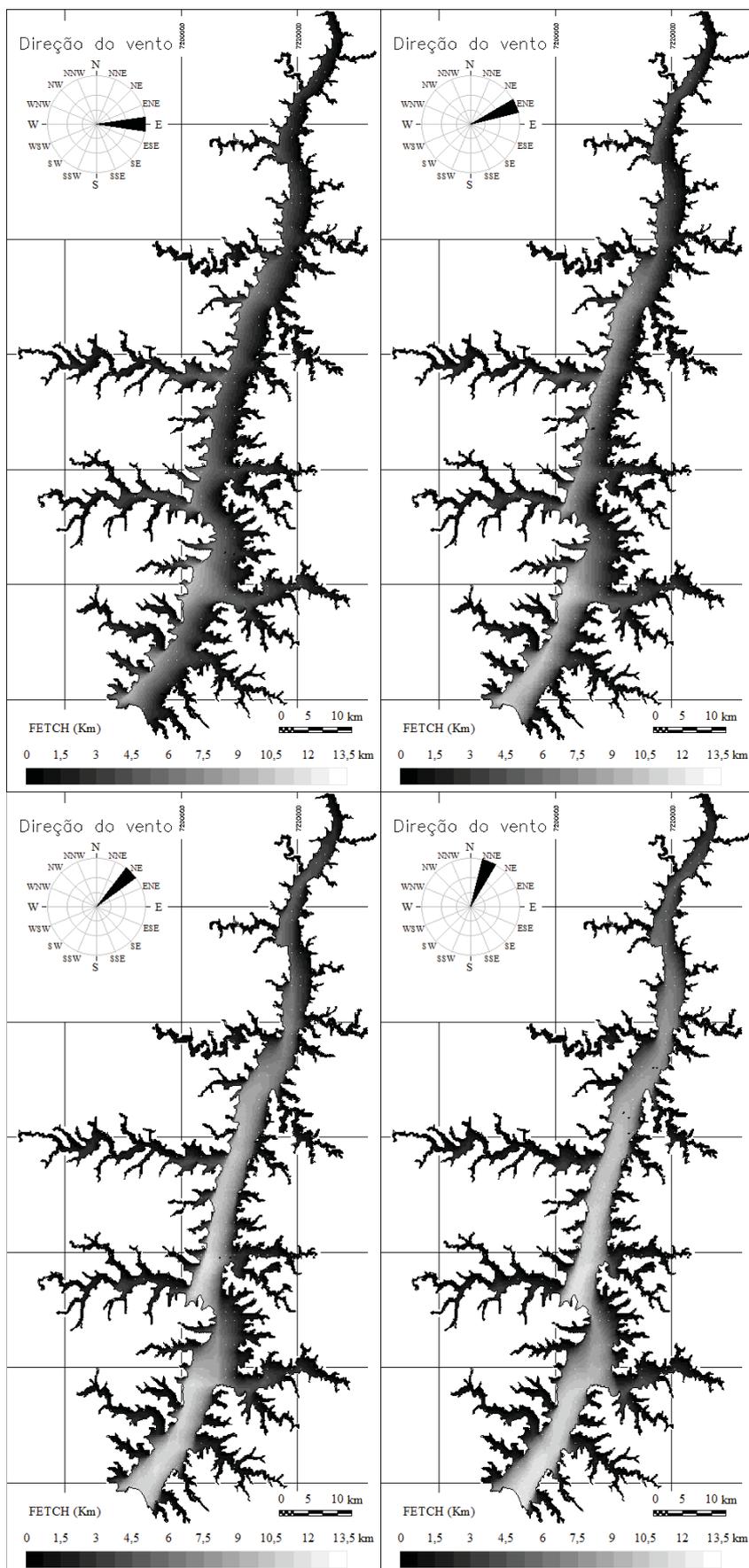
Além destes resultados relativos aos campos de *fetch*, foi realizada a simulação das alturas significativas de ondas para o reservatório de Itaipu, com a intenção de se estudar uma importante aplicação destes campos. A partir do *fetch* efetivo calculado, aplicou-se um modelo paramétrico conhecido como SMB para calcular a altura de onda.

5.1 CAMPOS DE FETCH

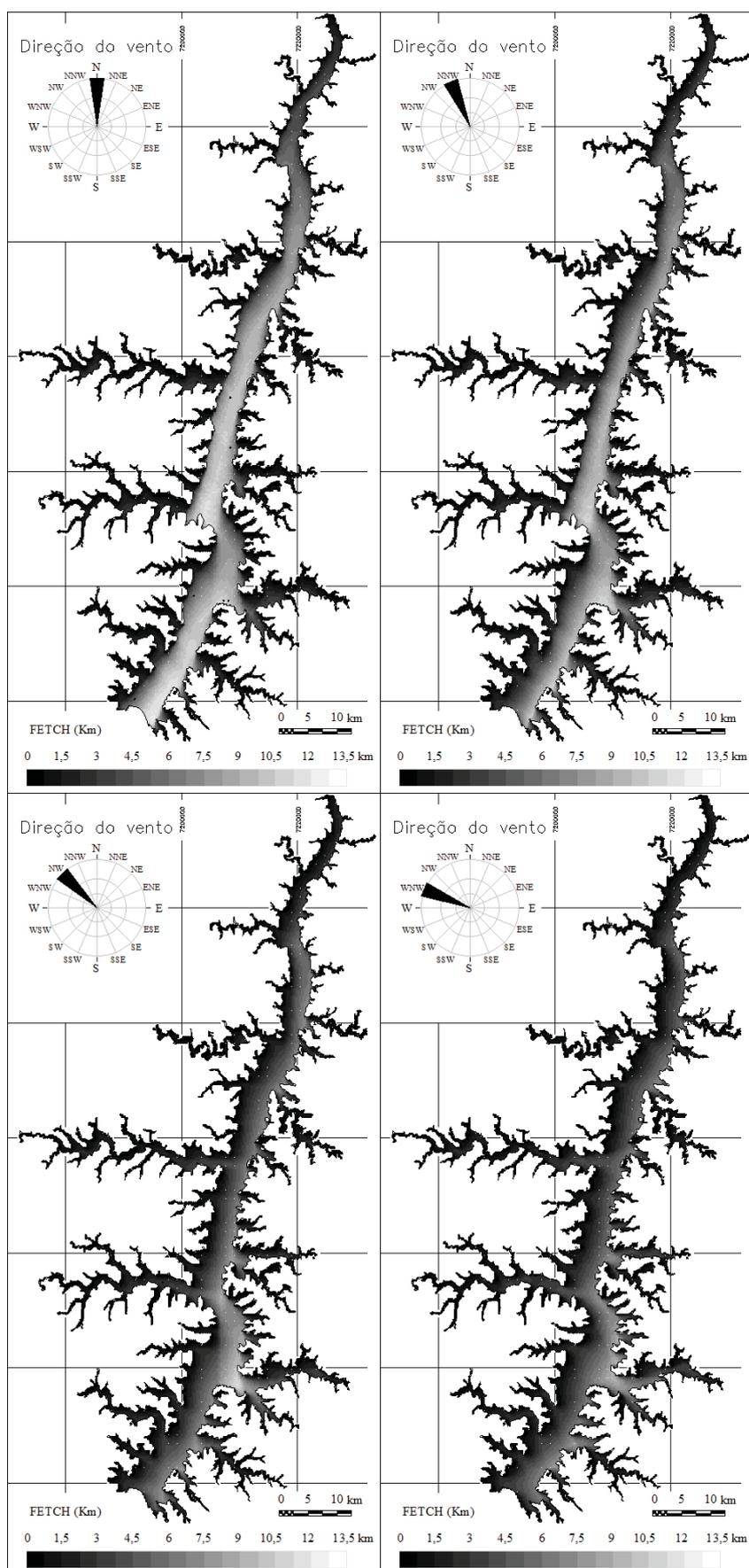
Pela adoção do método de Saville (1954) implementado no modelo ONDACAD, foram efetuados os cálculos dos campos de *fetch* para o reservatório estudado para 16 direções do vento. A malha computacional aplicada à representação do reservatório se constitui em malha quadrangular de 300 metros de resolução.

Cada mapa gerado se constitui no agrupamento de quase quinze mil nós da malha numérica, possibilitando a obtenção de mapas de distribuição bidimensional.

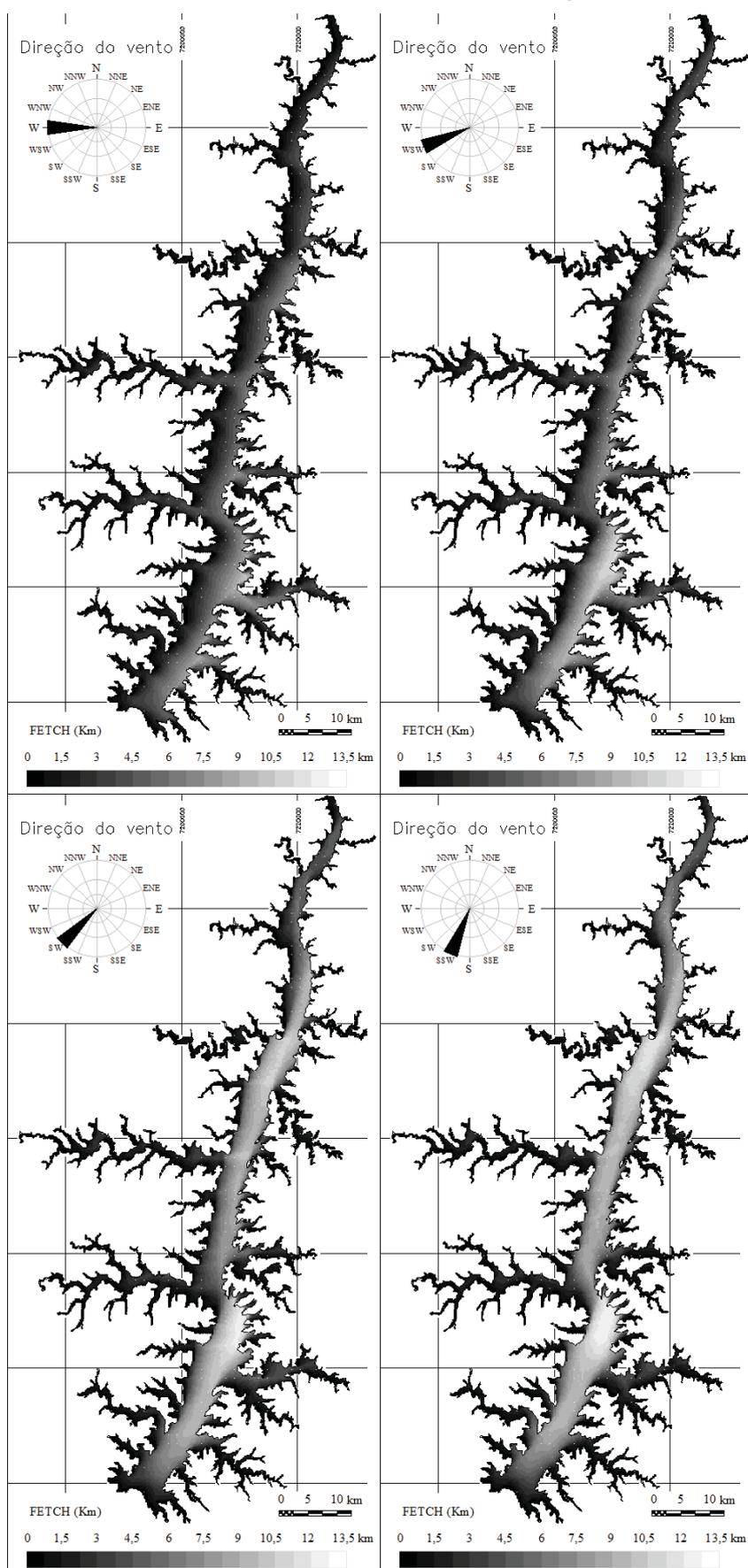
Foram obtidos os mapas de distribuição do *fetch* para dezesseis direções (Figuras 19 a 22).

FIGURA 19 - CAMPOS DE *FETCH* DE ITAIPU PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE E NNE

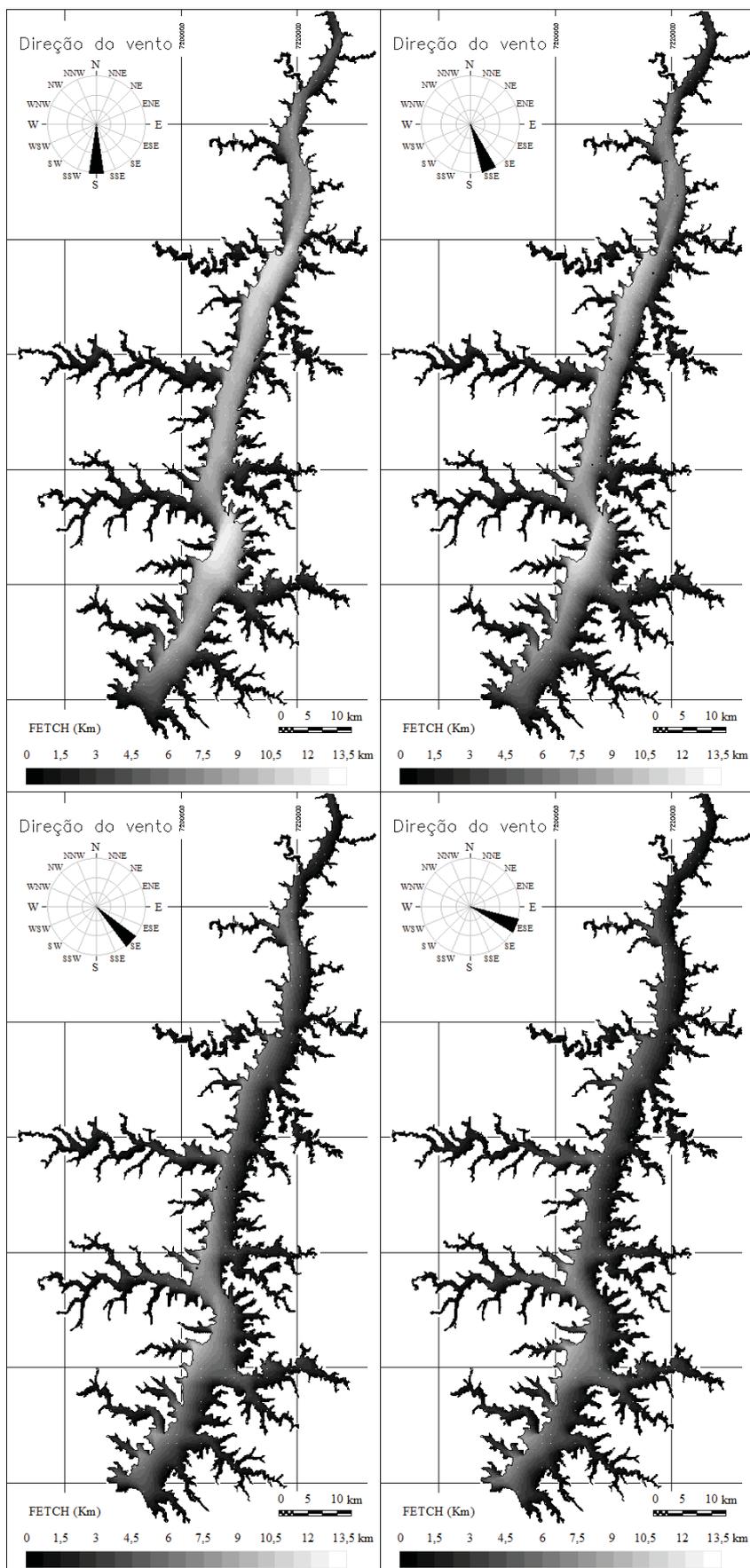
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 20 - CAMPOS DE *FETCH* DE ITAIPU PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW E WNW

FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 21 - CAMPOS DE *FETCH* DE ITAIPU PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW E SSW

FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 22 - CAMPOS DE *FETCH* DE ITAIPU PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE E ESE

FONTE: O Autor (2022).

Com base nos dezesseis mapas apresentados pelas figuras anteriores, foram obtidos os maiores comprimentos de *fetch* para cada direção, resultando na Tabela 4.

TABELA 4 - MAIORES COMPRIMENTOS DE *FETCH* PARA CADA DIREÇÃO

| Direção | E | ENE | NE | NNE | N | NNW | NW | WNW |
|----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Fetch máx (km) | 7,72 | 11,08 | 10,59 | 12,10 | 10,07 | 10,48 | 9,43 | 6,53 |
| Direção | W | WSW | SW | SSW | S | SSE | SE | ESE |
| Fetch máx (km) | 6,97 | 10,80 | 10,38 | 12,02 | 11,71 | 10,97 | 10,16 | 7,03 |

FONTE: O Autor (2022).

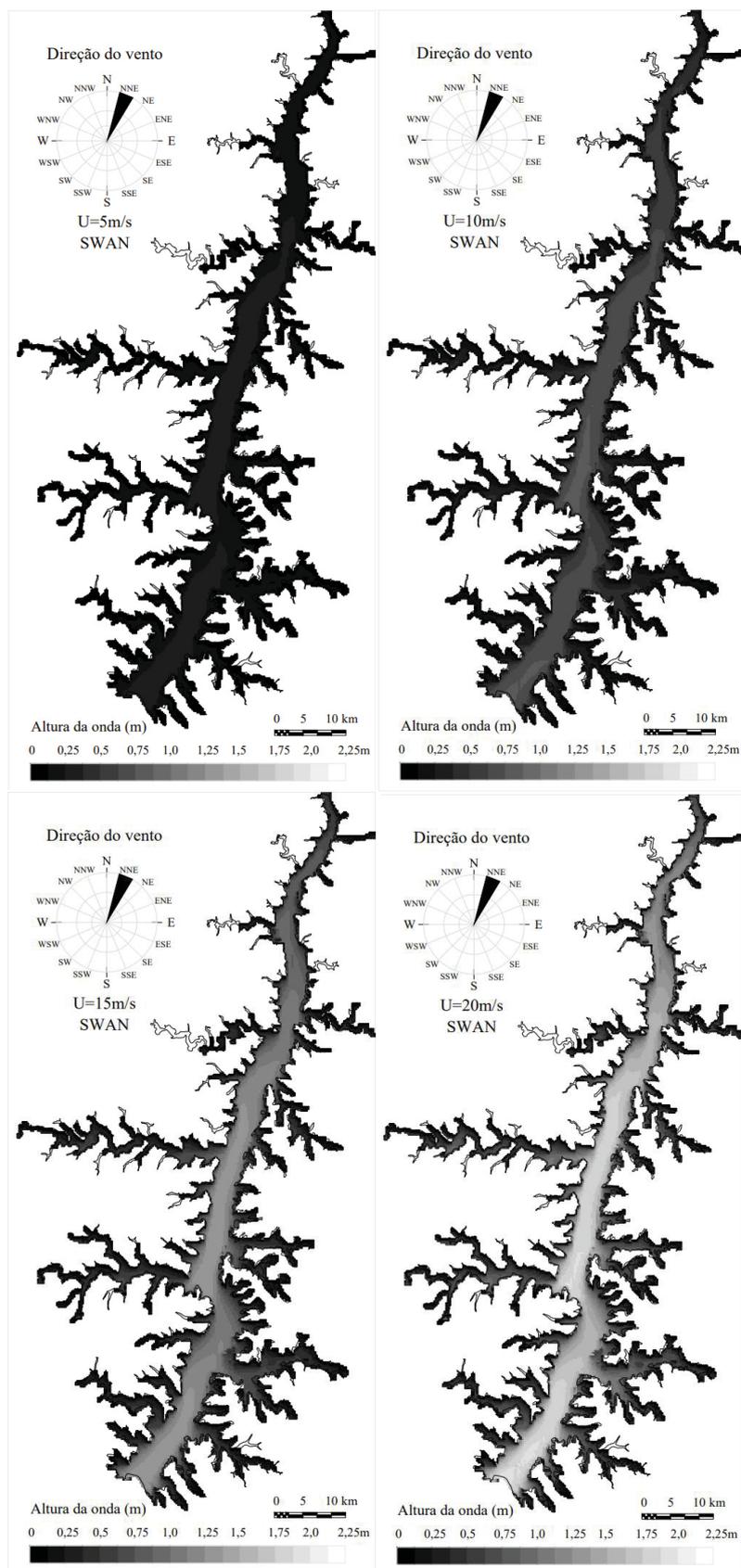
Com base na Tabela 4, se constata que a direção NNE se refere à direção do maior comprimento do *fetch* no reservatório. A direção WNW resultou no menor entre os maiores comprimentos de *fetch* e, curiosamente, as duas direções têm entre si ângulo de 90 graus. Por se constituir a direção em que ocorre o maior comprimento de *fetch*, a direção NNE foi adotada para dirigir o campo uniforme de vento nas ações de simulação do modelo SWAN.

Estes mapas de distribuição de *fetch* serão úteis, não somente para a obtenção da equação paramétrica, mas também para auxiliar na quantificação da agitação da água por pesquisadores não familiarizados com as atividades de simulação computacional, permitindo consultas rápidas e especialmente localizadas.

5.2 ALTURA DE ONDAS PELO MODELO SWAN

Após de ser a adotada a direção NNE como campo uniforme de vento, foram realizadas as simulações pelo modelo SWAN. Os resultados de altura das ondas para os ventos de 5, 10, 15 e 20 ms⁻¹ estão ilustrados nos mapas da Figura 23.

FIGURA 23 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA VENTOS DE 5, 10, 15 E 20 MS⁻¹ NA DIREÇÃO NNE OBTIDOS PELO MODELO SWAN



FONTE: O Autor (2022).

Pela Tabela 5 foram reunidas as maiores alturas de ondas obtidas pelo modelo SWAN para direção NNE.

TABELA 5 - MAIORES ALTURAS DE ONDA PELO MODELO SWAN PARA A DIREÇÃO NNE

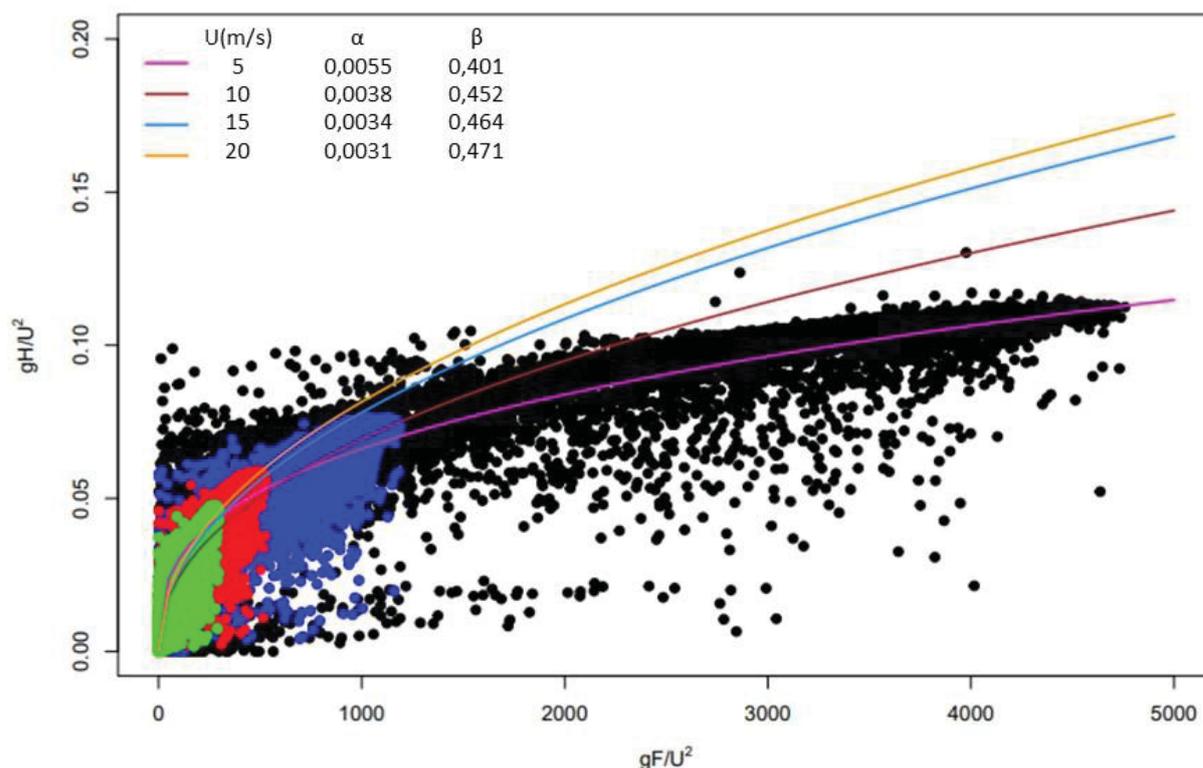
| U (m/s) | 5 | 10 | 15 | 20 |
|---------|------|------|------|------|
| Hs | 0,42 | 0,95 | 1,38 | 1,87 |

FONTE: O Autor (2022).

5.3 DETERMINAÇÃO DO MODELO PARAMÉTRICO PARA ITAIPU

A obtenção dos coeficientes do modelo paramétrico foi precedida pela construção do diagrama adimensional que relaciona à altura de onda adimensional e o *fetch* adimensional, conforme Figura 24.

FIGURA 24 - DIAGRAMA ADIMENSIONAL



FONTE: O Autor (2022).

Deste modo, o desenvolvimento demonstra a possibilidade em se obter uma equação paramétrica do tipo potência que correlacione o termo de *fetch* adimensional ao termo de altura de onda adimensional pela determinação dos coeficientes α e β conforme equações seguintes:

$$(gHU^{-2}) = \alpha (gFU^{-2})^\beta \quad (14)$$

$$H = \alpha \frac{U^2}{g} (gFU^{-2})^\beta \quad (15)$$

Os coeficientes obtidos se encontram na parte superior esquerda da Figura 24.

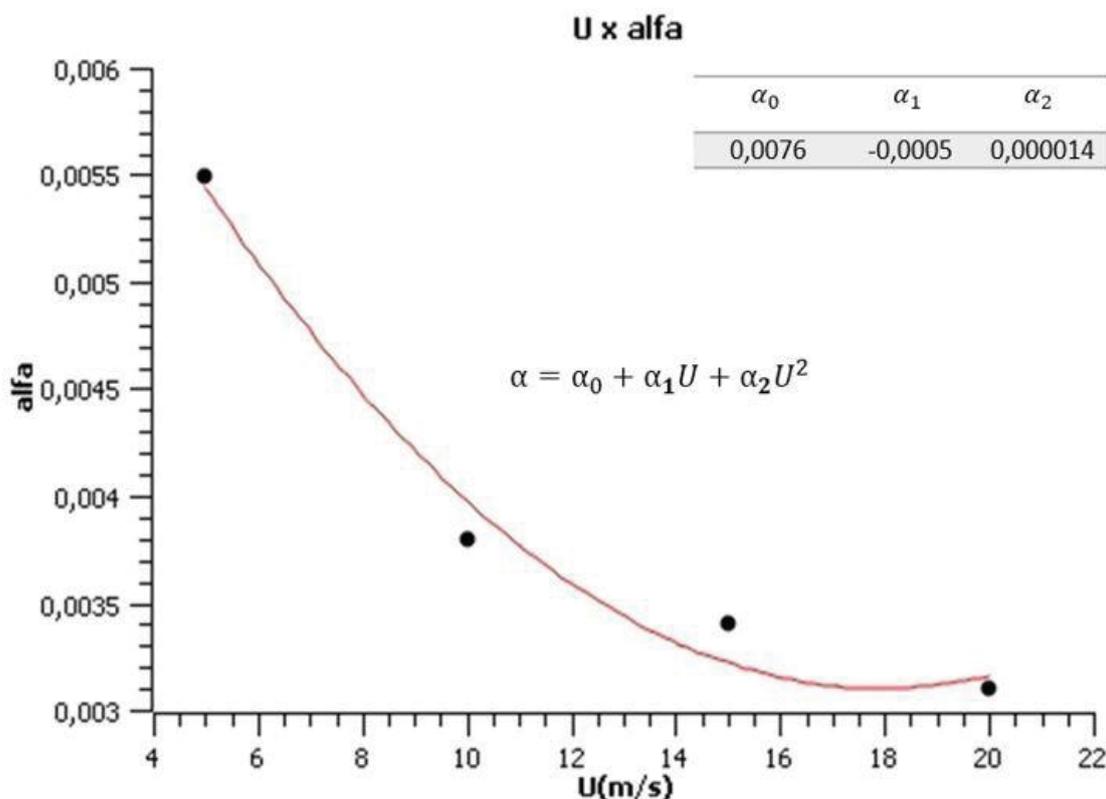
Foi verificado que os coeficientes são condicionados pela intensidade do vento. Decidiu-se por determinar uma equação para os coeficientes.

As equações que melhor representaram os coeficientes alfa e beta tiveram a mesma topologia:

$$k = k_0 + k_1U + k_2U^2 \quad (16)$$

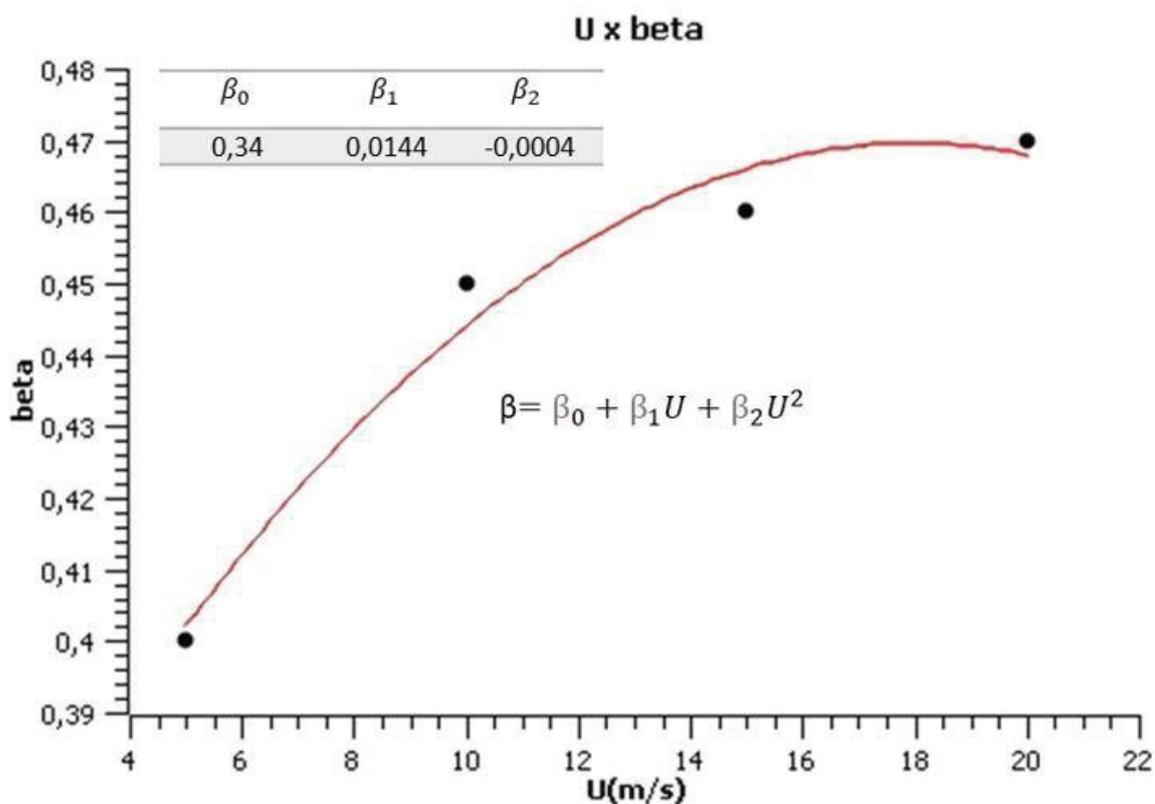
O traçado dos diagramas resultou nos Gráficos 1 e 2.

GRAFICO 1 - INTENSIDADE DO VENTO X ALFA



FONTE: O Autor (2022).

GRÁFICO 2 - INTENSIDADE DO VENTO X BETA



FONTE: O Autor (2022).

Os coeficientes estão reunidos pela Tabela 6 e as equações apresentadas na sequência.

TABELA 6 - COEFICIENTES ALFA E BETA

| k | k_0 | k_1 | k_2 |
|----------|--------|---------|----------|
| α | 0,0076 | -0,0005 | 0,000014 |
| β | 0,34 | 0,0144 | -0,004 |

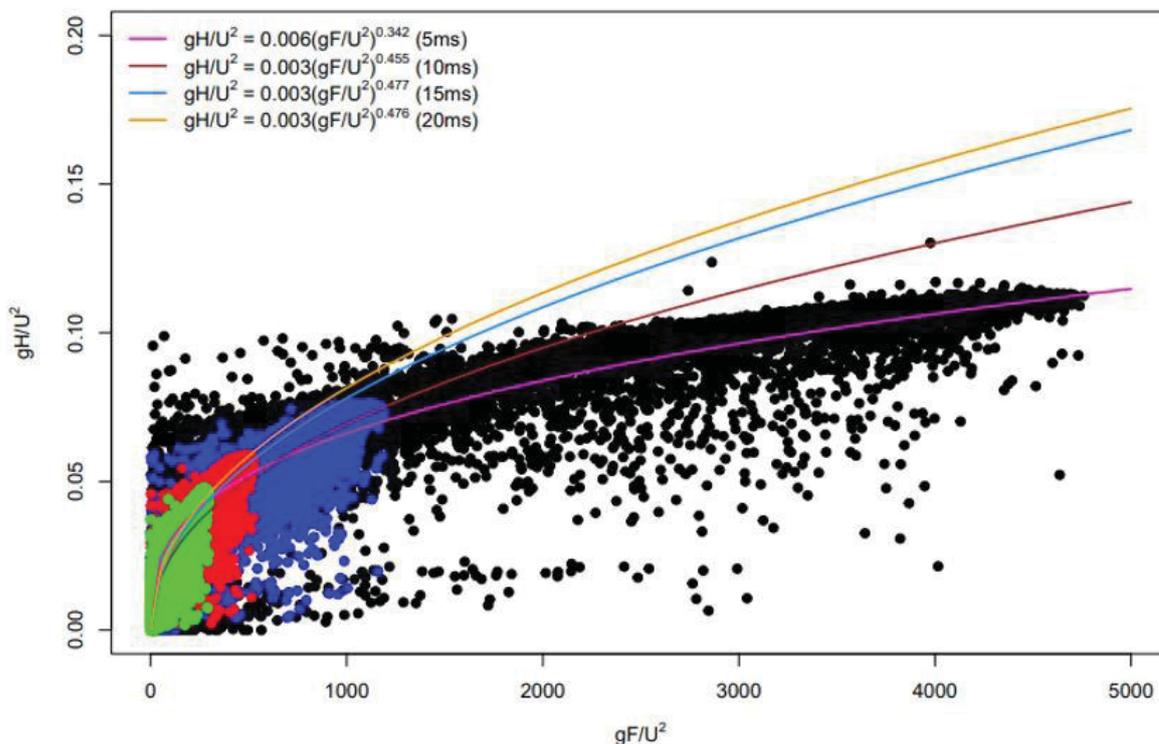
FONTE: O Autor (2022).

$$\alpha = 0,0076 - 0,0005U + 0,000014U^2 \quad (17)$$

$$\beta = 0,34 + 0,0144U - 0,0004U^2 \quad (18)$$

A geração das novas curvas sobre a nuvem de pontos gráficos, condicionada pela equação de coeficientes obtida, é representada pela Figura 25.

FIGURA 25 - CURVAS OBTIDAS COM AS EQUAÇÕES DE COEFICIENTES



FONTE: O Autor (2022).

Mediante uma análise mais geral é possível constatar que o coeficiente alfa parte de 0,006 para ventos pouco intensos e converge para 0,03 para intensidades do vento iguais ou superiores a 10ms^{-1} . Já o coeficiente beta parte de 0,342 para ventos fracos de 5ms^{-1} e tende a 0,5 para ventos severos.

Uma análise comparativa entre modelos paramétricos será realizada mais adiante, quando poderão ser comparados aspectos como a topologia das equações e magnitude dos coeficientes dos modelos amplamente difundidos na literatura especializada.

5.4 VALIDAÇÃO DO MODELO DE ITAIPU

Por se tratar de um modelo computacional amplamente difundido mundialmente para simular fenômenos hidrodinâmicos, como é o caso dos fenômenos relacionados às ondas de vento, o modelo SWAN foi validado por Booij, Ris e Holthuijsen (1999) em estudos na Alemanha e Holanda.

O Modelo SWAN é considerado confiável porque é baseado em técnicas de previsão avançada e é verificado regularmente com dados dinâmicos de satélite e

observações da maré. Além disso, é desenvolvido e mantido por instituições científicas respeitadas, como o Instituto Nacional de Oceanografia e Atmosfera dos EUA, o que garante que os algoritmos utilizados e os dados sejam rigorosamente validados.

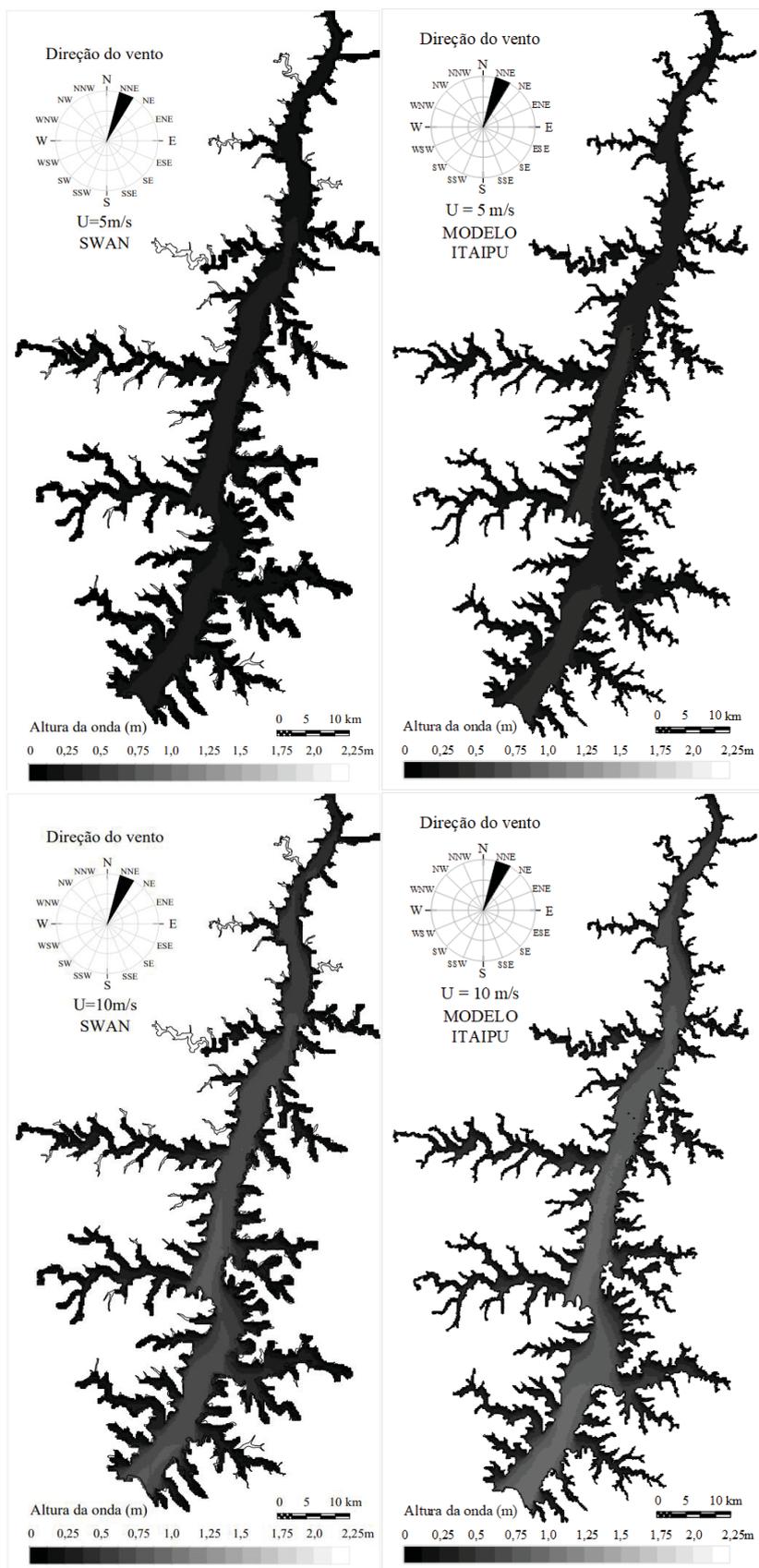
O modelo ITAIPU visa atingir os mesmos resultados de distribuição espacial de altura de ondas obtidas pelo modelo *SWAN*, porém, partindo de uma metodologia geométrica computacionalmente leve, ao invés de uma modelagem matemática de base física, de capacidade computacional muitíssimo mais exigente.

A validação do modelo ITAIPU consiste em realizar uma análise comparativa bidimensional com os resultados gerados pelo modelo *SWAN*. A análise consiste em comparar os resultados pela elaboração de mapas de distribuição do desvio, permitindo quantificar não somente os desvios, mas a localização destes no reservatório.

5.4.1 Alturas de ondas pelos modelos *SWAN* e ITAIPU

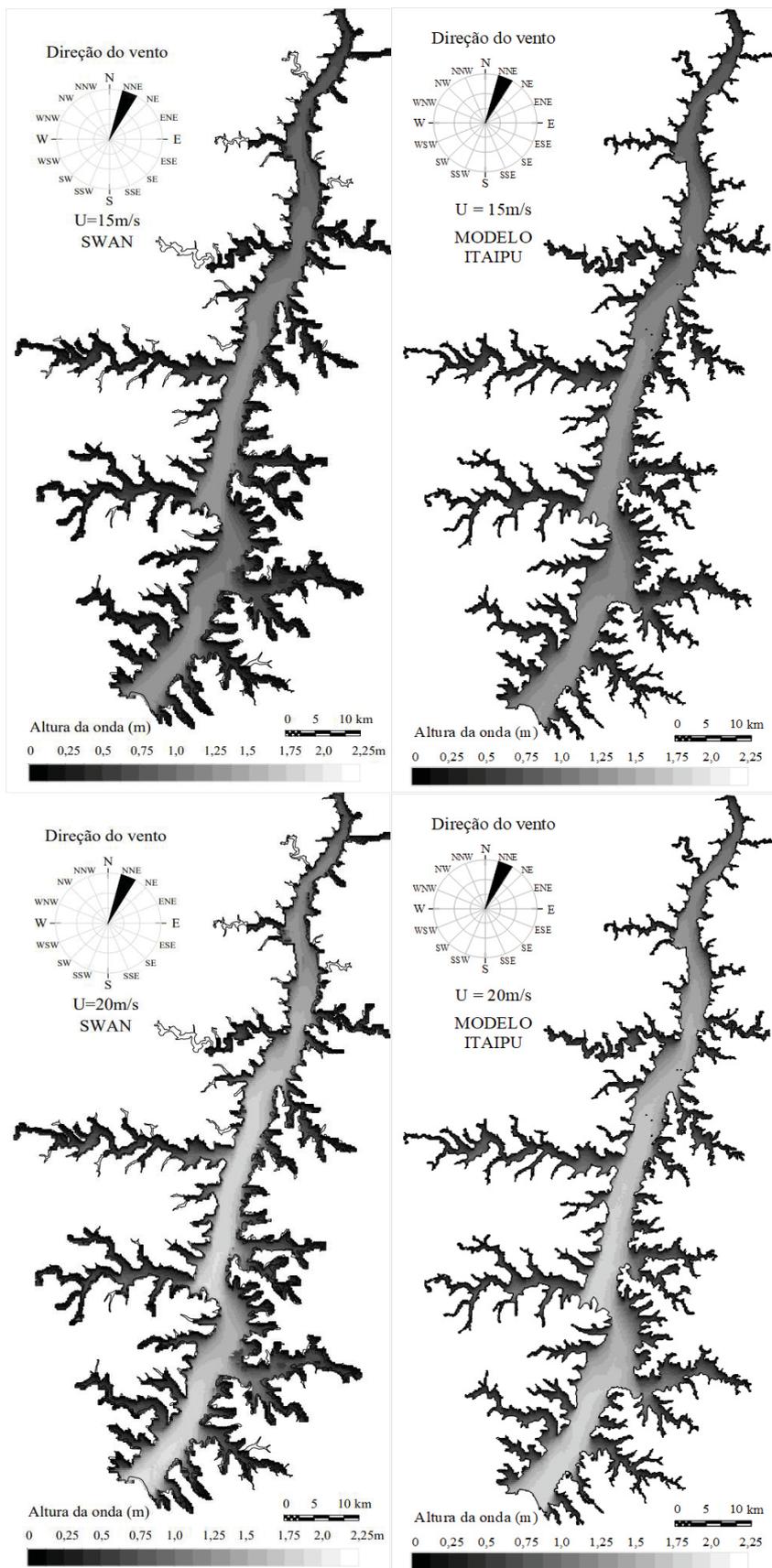
A análise comparativa entre os resultados dos modelos *SWAN* e ITAIPU foram iniciadas pela elaboração dos mapas de campos de ondas de intensidades de 5, 10, 15 e 20 ms^{-1} , representados pelas Figuras 26 e 27.

FIGURA 26 - MAPAS DE ALTURA DE ONDA PARA VENTOS 5 E 10 MS⁻¹ OBTIDOS PELOS MODELOS SWAN (ESQUERDA) e ITAIPIU (DIREITA).



FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 27 - MAPAS DE ALTURA DE ONDA PARA VENTOS 15 E 20 MS⁻¹ OBTIDOS PELOS MODELOS SWAN (ESQUERDA) e ITAIPU (DIREITA).

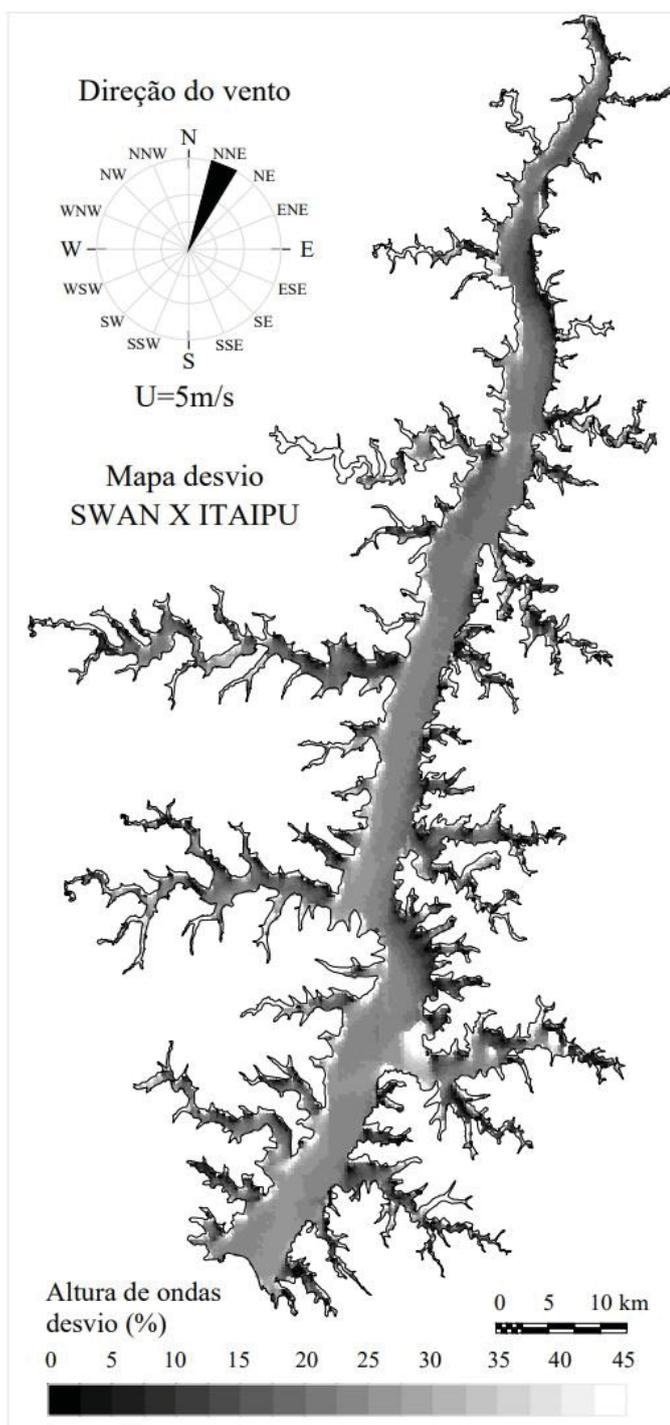


FONTE: O Autor (2022).

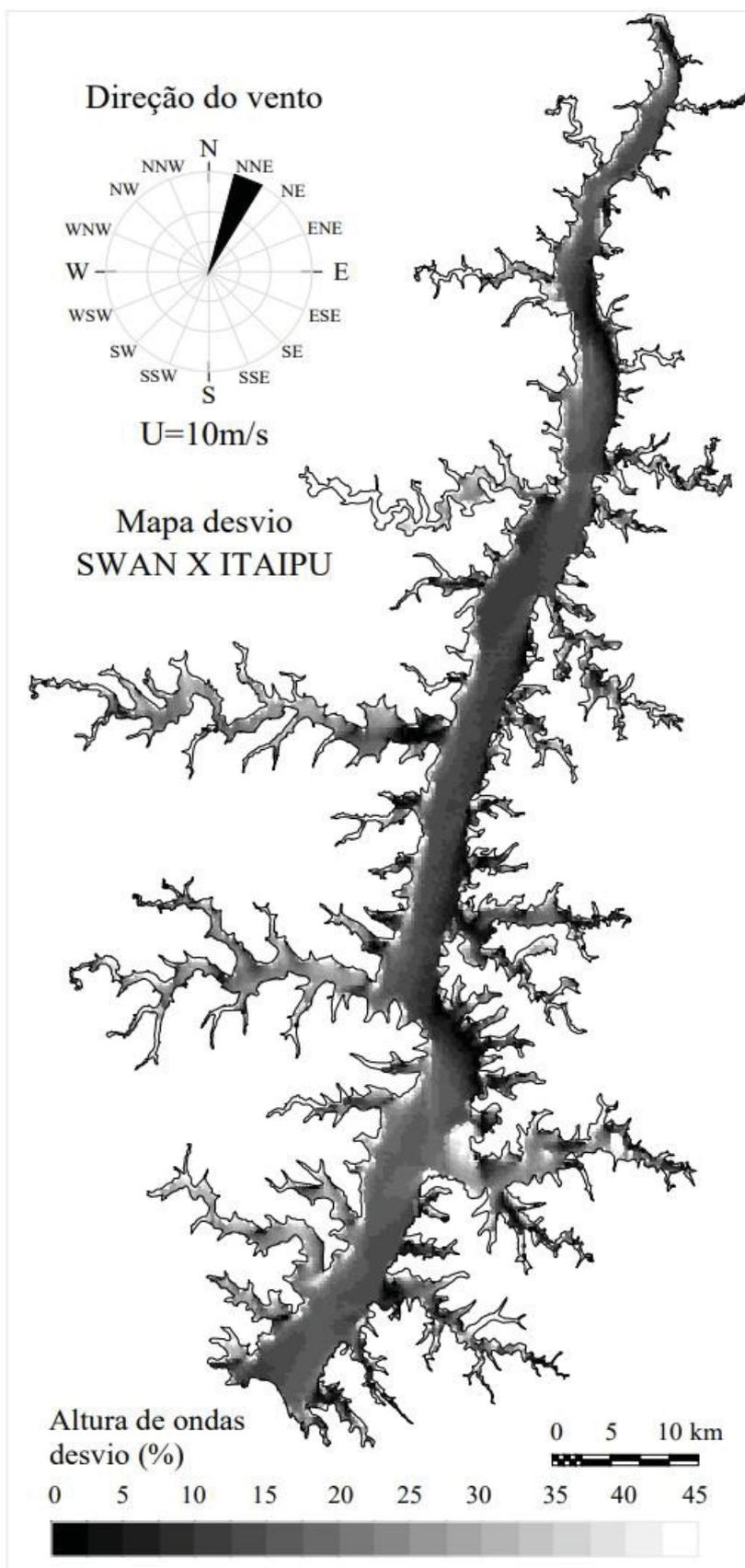
5.4.2 Mapas de desvio entre os modelos SWAN e ITAIPU

Com base nos mapas de altura de onda foram mapeados os desvios percentuais entre os resultados dos modelos comparados, representados pelas Figuras 28 a 31.

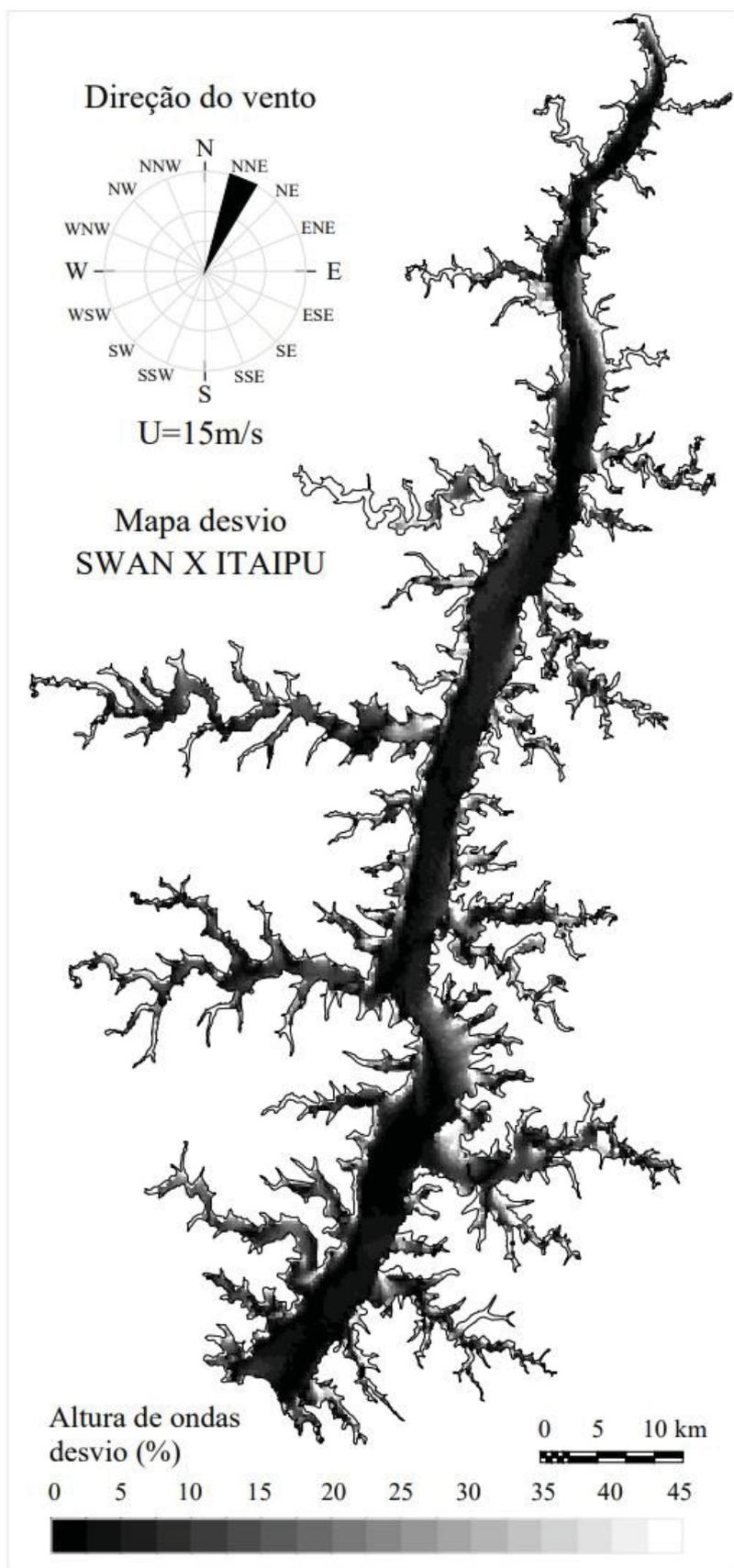
FIGURA 28 - MAPA DE DESVIO ENTRE OS MODELO SWAN E ITAIPU PARA VENTO DE 5 MS⁻¹



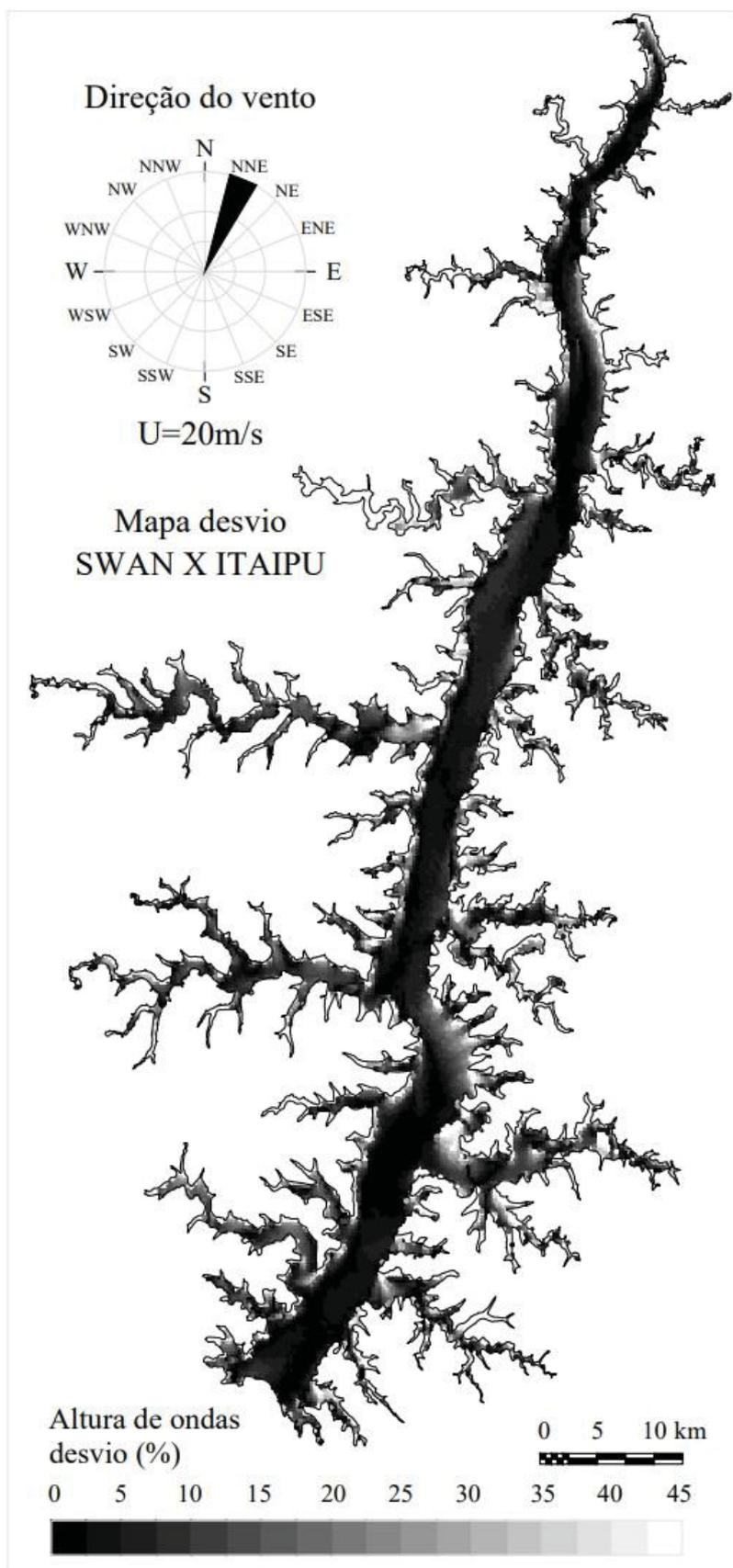
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 29 - MAPA DE DESVIO ENTRE OS MODELO SWAN E ITAIPU PARA VENTO DE 10 MS⁻¹

FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 30 - MAPA DE DESVIO ENTRE OS MODELO SWAN E ITAIPU PARA VENTO DE 15 MS⁻¹

FONTE: O Autor (2022)

FIGURA 31 - MAPA DE DESVIO ENTRE OS MODELO SWAN E ITAIPU PARA VENTO DE 20 MS⁻¹

FONTE: O Autor (2022)

Quanto aos mapas de desvio entre os modelos, se verificam desvios maiores nos pontos próximos às margens de barlavento, em relação às de sotavento. Esta constatação provavelmente se deve à linearidade de obtenção do *fetch* pelo método ITAIPU. Este método, por sua natureza geométrica, faz com que o *fetch* e conseqüentemente a onda, cresçam gradualmente de modo mais uniforme. Já o modelo *SWAN* determina a altura da onda propagando-a numericamente pelos nós da malha por meio da solução de uma equação numérica aplicando técnicas de modelagem computacional. Deste modo, ondas próximas à margem a barlavento não têm sua altura tão fortemente condicionada pelo *fetch*, mas a fatores relacionados às convergências numéricas inerentes aos modelos de base física.

Outra constatação se refere à intensidade do vento. Quanto mais intensos os campos de vento, se verifica um menor desvio entre os resultados dos modelos. Indica, portanto, que os desvios entre os resultados dos modelos propiciam aplicações com resultados mais precisos quanto maior a severidade do vento. Na modelagem matemática de base física, as ondas são consideradas restauradas pela aceleração gravitacional. No modelo *SWAN* também é assim. Entretanto, em ondas de pequena altura, é constatada grande influência da tensão superficial da água na formação da onda. Conforme a onda ganha amplitude, as forças devido às tensões tangenciais vão se tornando menos importantes e a aceleração gravitacional vai gradativamente ganhando importância. Isto pode explicar as divergências entre os modelos de ondas em casos de pequena amplitude, ou seja, para condições de ventos de pouca intensidade.

5.5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MODELOS PARAMÉTRICOS

Visando situar o método ITAIPU entre os modelos paramétricos amplamente difundidos na literatura especializada, é realizada a análise comparativa dos modelos. Antes, porém, cada método é apresentado.

5.5.1 Modelo SMB

De acordo com Bretschneider (1966), o método conhecido como SMB foi originalmente proposto por Sverdrup e Munk (1947) e depois modificado pelo próprio Bretschneider, sendo nomeado com as iniciais dos sobrenomes de seus

idealizadores. Esse método tem passado por inúmeras revisões e é considerado um dos mais importantes para previsão de ondas (CARDONE; ROSS, 1977), sendo amplamente utilizado devido à sua simplicidade e eficácia (CARDONE; ROSS, 1977; KINSMAN, 1965; WIEGEL, 1970).

O método SMB utiliza a análise dimensional para identificar os parâmetros fundamentais relevantes no estudo das características das ondas, a saber:

$$H_{\frac{1}{3}} = f(F, W, U, t, d, g) \quad (19)$$

sendo $H_{1/3}$ a altura significativa, F o *fetch*, t a duração e U a intensidade do vento, d é a profundidade local e W a largura da área afetada pelo vento. A largura (W) é considerada quando a sua medida for significativamente menor que comprimento do *fetch*, como no caso de canais.

Os grupos adimensionais são:

$$\frac{gH_{\frac{1}{3}}}{U^2} = f\left(\frac{gF}{U^2}, \frac{gt}{U}, \frac{gd}{U^2}, \frac{W}{F}\right) \quad (20)$$

Em superfícies estreitas ($W < F$), a influência do vento na geração de ondas é atenuada. Razões W/F de 0,5-1,0-1,5 levam a alturas significativas de onda de 65%, 88% e 98%, respectivamente. A estimativa do *fetch* requer um procedimento geométrico que leva em consideração, indiretamente, a influência da largura (W). Em águas oceânicas abertas, W/F é igual à unidade (SAVILLE, 1954). A teoria linear de ondas classifica a influência da profundidade na altura da onda com base na relação entre o comprimento da onda (λ), a profundidade (d) e a intensidade do vento a 10 m de altura (U_{10}). A onda se propaga em águas profundas quando $d/\lambda \geq 0,5$. Em termos adimensionais, assumindo as hipóteses relativas à teoria linear de ondas, quando $gd/U_{10}^2 \geq 3$ o efeito do vento gera somente ondas de águas profundas (WIEGEL, 1964).

Portanto, respeitadas as condições $W/F \geq 1$ (largura considerada pelo método de Saville) e $gd/U_{10}^2 \geq 3$ (ondas em águas profundas), a equação antecedente toma a seguinte forma:

$$\frac{\varphi H_{1/3}}{U^2} = f \left(\frac{\varphi F}{U^2}, \frac{\varphi t}{U} \right) \quad (21)$$

De acordo com o método SMB, a onda limite é limitada pelo *fetch* e não é atingida. Portanto, na equação mencionada anteriormente, o termo relacionado à duração pode ser omitido:

$$\frac{\varphi H_{1/3}}{U^2} = f \left(\frac{\varphi F}{U^2} \right) \quad (22)$$

O método SMB tem sido revisado inúmeras vezes, resultando em modificações nos coeficientes que relacionam os parâmetros adimensionais do método. A versão do método aqui utilizado é a atribuída ao *United States Department of the Interior – Bureau of Reclamation* (1973), ou seja:

$$H_s^* = 0,283 \tanh[0,0125F^{*0,42}] \quad (23)$$

com F^* , H_s^* representando os termos adimensionais descritos pelas equações [8] e [9], os quais, desenvolvidos pela aplicação da equação [23], resulta na seguinte equação:

$$H_{1/3} = \frac{U_{10}^2}{\varphi} 0,283 \tanh \left[0,0125 \left(\frac{\varphi F}{U_{10}^2} \right)^{0,42} \right] \quad (24)$$

Em outra revisão conduzida por Sibul (1955) foram estabelecidos os coeficientes para adequar o método SMB à condição de águas rasas, como ilustrado nas equações a seguir:

$$H_{1/3} = \frac{U_{10}^2}{\varphi} 3,23 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\varphi F}{U_{10}^2} \right)^{0,435} \quad (25)$$

$$\varphi F / U_{10} < 3 \cdot 10^4 \quad (26)$$

5.5.2 Modelo de SAVILLE

Saville *et al.* (1962) indicaram alterações na fórmula de Bretschneider, com base na observação de ventos e ondas nos lagos de Texoma e Okeechobee,

respeitando-se os limites de validade entre $10 < gF/U^2 < 4000$. Assim, têm-se:

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0,0026 \cdot \left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{0,47} \quad (27)$$

5.5.3 Modelo de WILSON

Antes do modelo proposto por de Wilson (1961) os modelos assumiam que o campo de vento uniforme, ou seja, sua intensidade e direção permaneciam constantes ao longo do tempo. Com a abordagem de Wilson, tornou-se possível prever a altura das ondas em relação a ventos que variam no espaço. O modelo de Wilson (*apud* EARLE, 1979; MITSUYASU, 1982) está fundamentado nas relações empíricas entre velocidade do vento, *fetch*, altura significativa da onda, período e celeridade, de acordo com as equações a seguir:

$$\frac{c}{U} = 1,37 \left\{ 1 - \left[1 + 0,008 \left(\frac{gF}{U^2}\right)^{1/3} \right]^{-5} \right\} \quad (28)$$

$$\frac{gH_s}{U^2} = 0,30 \left\{ 1 - \left[1 + 0,004 \left(\frac{gF}{U^2}\right)^{1/2} \right]^{-2} \right\} \quad (29)$$

As ondas são geradas e se propagam ao longo de uma linha na direção desejada. Em aplicações de engenharia a direção da linha é selecionada para coincidir com a propagação das maiores ondas. As equações de propagação são obtidas, respectivamente, pela diferenciação das equações [28] e [29], ou seja:

$$\frac{dc}{dx} = 8,013 \cdot 10^{-2} \cdot U^{-1} \cdot z^{-\frac{6}{5}} \cdot \left(z^{-\frac{1}{5}} - 1\right)^{-2} \quad (30)$$

$$\frac{dH_s}{dx} = 2,918 \cdot 10^{-2} \cdot y^{-\frac{3}{2}} \cdot \left(y^{\frac{1}{2}} - 1\right)^{-1} \quad (31)$$

sendo:

$$U = U_{10}(x, t) \quad (32)$$

$$z = \frac{1,37}{1,37 - \left(\frac{c_s}{U}\right)} \quad (33)$$

$$y = \frac{0,30}{0,30 - \left(\frac{g \cdot H_s}{U^2}\right)} \quad (34)$$

Para aplicar o método de Wilson é necessário cumprir as seguintes condições:

$$\frac{c_s}{U} < 1,37 \quad (35)$$

$$\frac{g \cdot H_s}{U^2} < 0,30 \quad (36)$$

5.5.4 Modelo de FALVEY

Em seu estudo sobre o comportamento de ondas em um lago, Falvey (1974) propôs um método para determinar a distribuição de alturas de ondas. Suas hipóteses incluíram a proporcionalidade entre a transferência de quantidade de movimento fornecida pelo vento e a tensão tangencial gerada. Assumiu-se ainda que a variação de energia no sistema é igual ao trabalho exercido sobre a superfície livre menos a energia dissipada, esta última foi considerada desprezível, chegando-se à seguinte relação:

$$H_s = \left(3,1 \cdot 10^4 U_{10}^2 + 1,6 \cdot 10^{-2} U_{10}\right) (F \cdot 10^3)^{\frac{1}{2}} \quad (37)$$

O método segue o sistema internacional de unidades e limita as aplicações às seguintes condições: (i) águas profundas; (ii) ondas limitadas pelo *fetch*; (iii) $2 < F < 200\text{km}$; e (iv) $U_{10} > 10 \text{ ms}^{-1}$.

5.5.5 Modelo JONSWAP

O projeto *JONSWAP (Joint North Sea Wave Project)* consistiu em uma série de levantamentos de dados de ventos e ondas realizados no mar do Norte ao longo dos anos de 1968 e 1969, com o objetivo de melhor compreender o processo de formação das ondas pelo vento (HASSELMANN *et al.*, 1973; HASSELMANN *et al.*, 1976; HASSELMANN *et al.*, 1980). Ao longo da costa oeste da Dinamarca, foi realizado um levantamento de dados em uma extensão de 160 km a partir da costa. Com base nos resultados obtidos neste estudo, foram estabelecidas fórmulas de

previsão para a altura significativa e período de ondas. Estas fórmulas consideraram uma velocidade constante do vento, bem como as limitações de pista e duração para o desenvolvimento das ondas.

O modelo desenvolvido pelo projeto *JONSWAP* parte do modelo de Pierson e Moskowitz, que, ao empregarem registros de onda do nordeste do Atlântico, sugeriram uma formulação para campo de ondas limitado tanto pelo *fetch* como pela duração.

No Método *JONSWAP*, a frequência de pico (f^*) e a energia total (E^*) do espectro estão relacionadas com o *fetch* (F) e a velocidade do vento (U) conforme as equações seguintes:

$$f_p^* = 3,5F^{*-0,33} \quad (38)$$

$$E^* = 1,6 \cdot 10^{-7} F^* \quad (39)$$

Para a altura (H_s) de ondas limitadas pelo *fetch* (F), têm-se:

$$\frac{gH_s}{U^2} = 0,0016 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

Para a altura (H_s) de ondas limitadas pela duração do vento (t), têm-se:

$$\frac{gH_s}{U^2} = 8,29 \cdot 10^{-5} \left(\frac{gt}{U} \right)^{\frac{5}{7}} \quad (41)$$

A equação para quantificar a altura da onda, de acordo com o modelo *JONSWAP*, é determinada quando a duração do vento (t) é um fator condicionante.

$$\frac{gt}{U} = 68,8 \cdot \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (42)$$

5.5.6 Modelo MARQUES

A topologia exponencial do método MARQUES, o qual relaciona a altura da onda e o *fetch*, foi determinada a partir da equação do balanço de energia utilizada pelos modelos numéricos. Os coeficientes α e β também variam com a intensidade

do vento. Tem-se, então, a seguinte equação:

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha \left(\frac{gF}{U^2} \right)^\beta \quad (43)$$

sendo H a altura significativa da onda, F o *fetch*, U a velocidade do vento e α e β os coeficientes que são determinados pelo ajuste entre o *fetch* do modelo ONDACAD e a altura de onda do modelo SWAN.

Os coeficientes alfa e beta são determinados pelas equações seguintes:

$$\alpha = 0,09778 \left(e^{-U/2,35503} \right) + 0,0028 \quad (44)$$

$$\beta = 0,51148 - [0,66223 (0,84304^U)] \quad (45)$$

5.5.7 Modelo ITAIPU

O modelo ITAIPU, determinado pelo presente estudo consiste na equação de mesma topologia utilizada por Marques (2013) e JONSWAP, conforme a equação e coeficientes alfa e beta seguintes:

$$\frac{gH}{U^2} = \alpha \left(\frac{gF}{U^2} \right)^\beta \quad (46)$$

$$\alpha = 0,0076 - 0,0005U + 0,000014U^2 \quad (47)$$

$$\beta = 0,34 + 0,0144U - 0,0004U^2 \quad (48)$$

5.5.8 Comparação entre os métodos

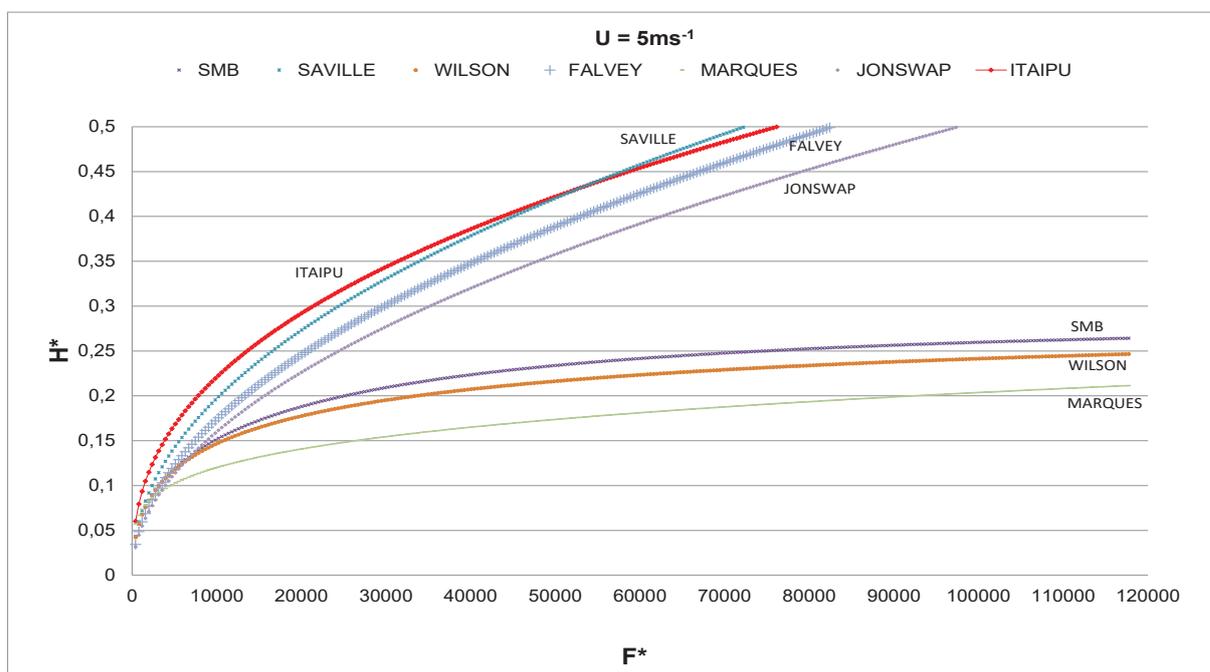
Para o processo de comparação entre os modelos decidiu-se pelo traçado de todos os modelos em diagrama de altura adimensional da onda (gHU^{-2}) *versus* *fetch* adimensional (gFU^{-2}). Esta medida permite verificar a posição relativa entre as curvas conforme se aumenta gradualmente a intensidade do vento.

Os diagramas são apresentados através das Figuras 32 a 35.

Pelo diagrama da Figura 32, o campo de ondas é submetido a um vento com intensidade de 5ms^{-1} . Para esta condição o método ITAIPU apresenta as maiores alturas de ondas entre os métodos comparados, até o limite de gFU^{-2} no valor de

60.000. Considerando que a aceleração gravitacional é de $9,81\text{ms}^{-2}$ e a intensidade do vento é de 5ms^{-1} , desenvolvendo o termo de *fetch* adimensional, chega-se a um valor de *fetch* de 23,5 km. Portanto, caso o modelo fosse aplicado a reservatórios ou lagos com mais de 23,5 km de *fetch*, nas regiões a partir deste comprimento de *fetch*, a aplicação do modelo Saville resultaria em alturas de ondas superiores ao modelo ITAIPU.

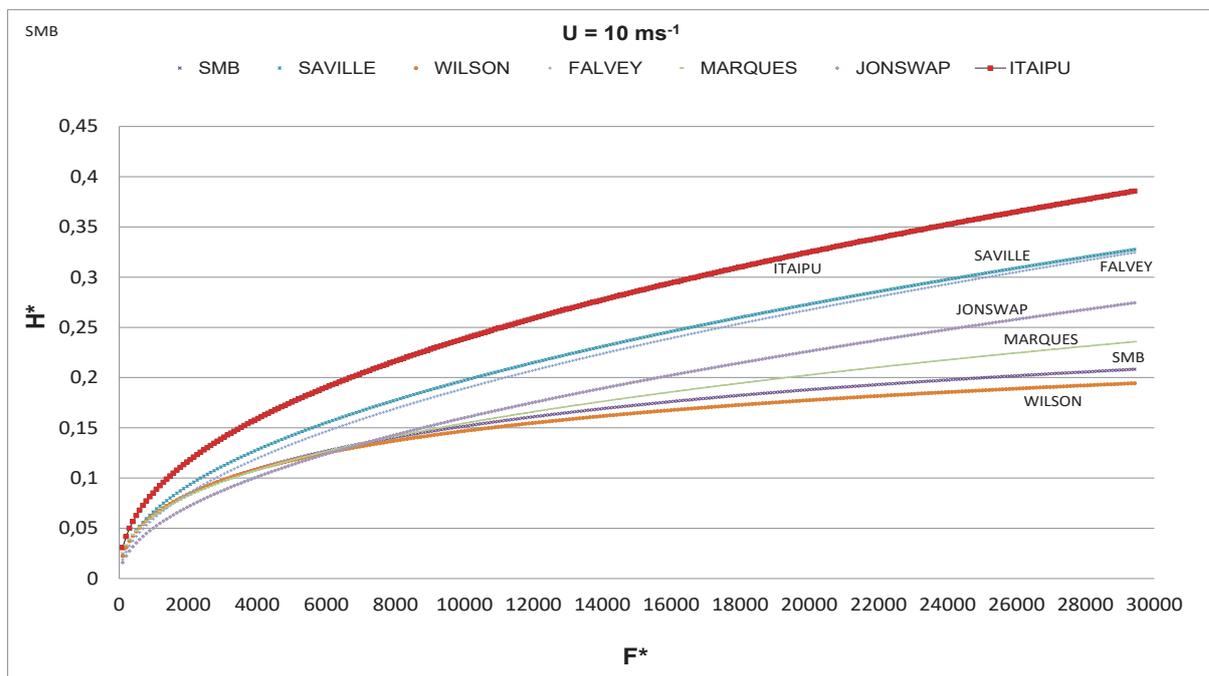
FIGURA 32 - COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS PARAMÉTRICOS PARA INTENSIDADE DO VENTO DE 5MS^{-1}



FONTE: O Autor (2022).

Pelo diagrama da Figura 33, o campo de ondas é submetido a um vento com intensidade de 10ms^{-1} . Para esta condição o método ITAIPU apresenta as maiores alturas de ondas entre os métodos comparados. Os modelos JONSWAP e SAVILLE praticamente coincidiram para esta intensidade do vento. Com o aumento da intensidade do vento, o modelo MARQUES passou a emitir alturas de ondas superiores aos modelos SMB e WILSON.

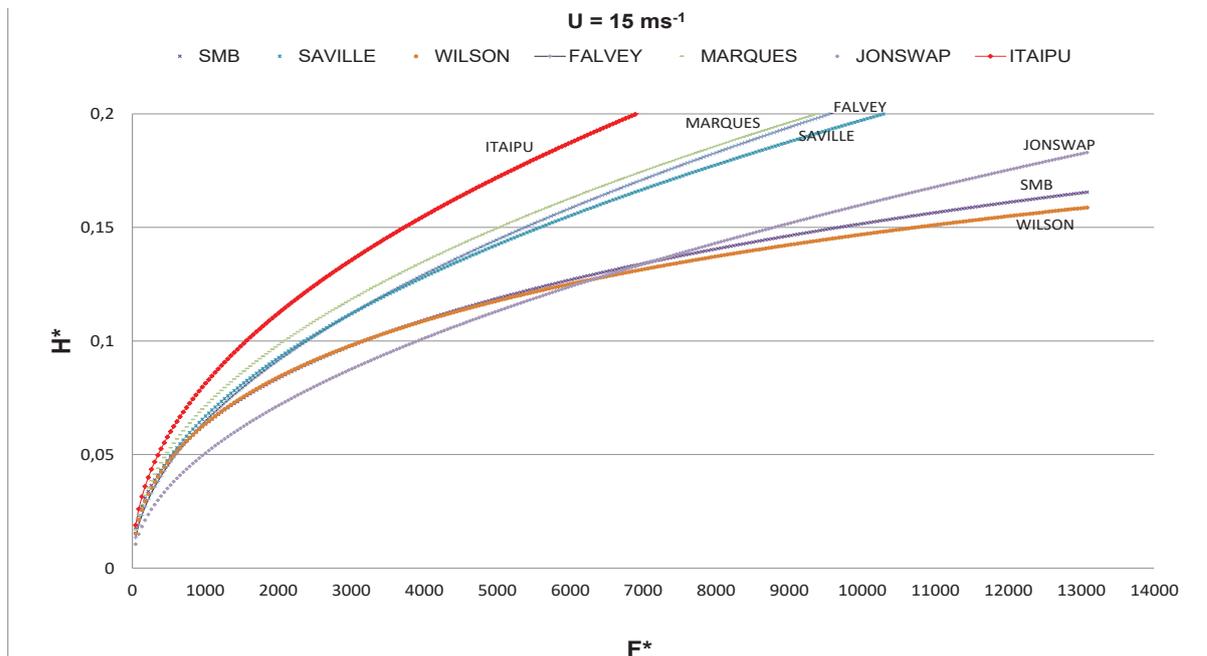
FIGURA 33 - COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS PARAMÉTRICOS PARA INTENSIDADE DO VENTO DE 10 MS⁻¹



FONTE: O Autor (2022).

Pelo diagrama da Figura 34, o campo de ondas é submetido a um vento com intensidade de 15ms⁻¹. Para esta condição o método ITAIPU continua apresentando as maiores alturas de ondas entre os métodos comparados. O modelo FALVEY passa a emitir alturas de onda ligeiramente superiores ao modelo SAVILLE. Nota-se que o modelo MARQUES sofreu um deslocamento vertical colocando-o abaixo somente do modelo ITAIPU.

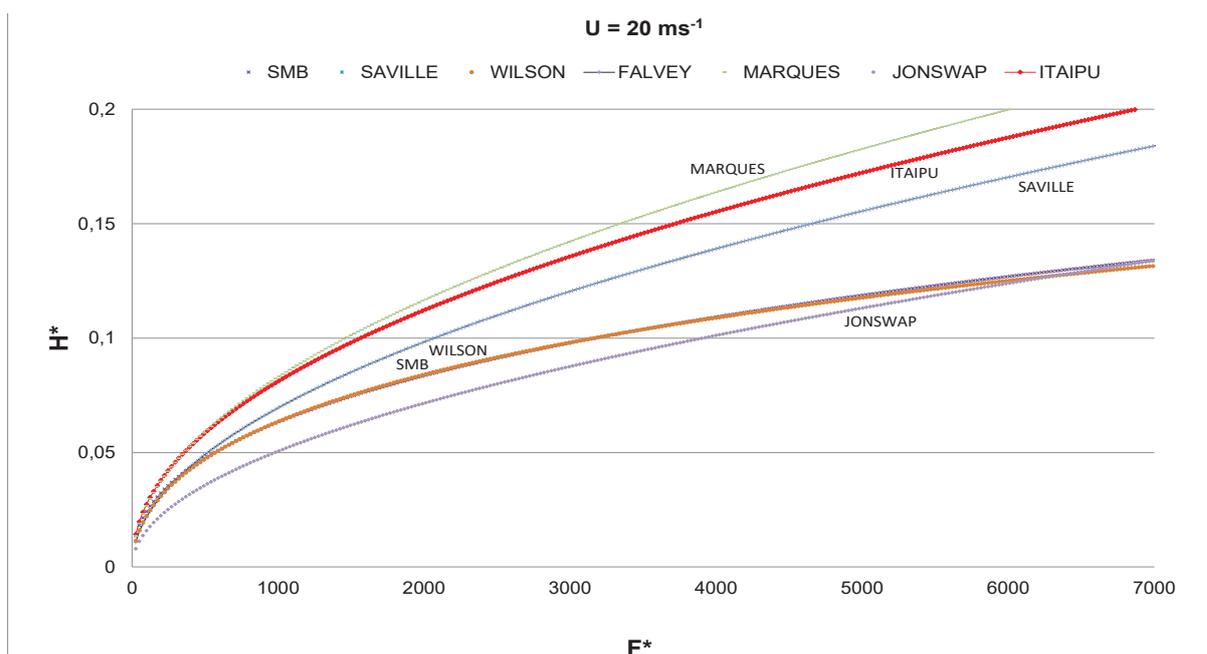
FIGURA 34 - COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS PARAMÉTRICOS PARA INTENSIDADE DO VENTO DE 15 MS⁻¹



FONTE: O Autor (2022).

Pelo diagrama da Figura 35, o campo de ondas é submetido a um vento com intensidade de 20ms⁻¹. Para esta condição o método ITAIPU deixou de apresentar as maiores alturas de ondas, passando ao modelo MARQUES.

FIGURA 35 - COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS PARAMÉTRICOS PARA INTENSIDADE DO VENTO DE 20 MS⁻¹



FONTE: O Autor (2022).

De modo geral, com o aumento da intensidade do vento, as curvas dos modelos mantiveram a mesma posição relativa, com exceção do modelo MARQUES, que se deslocou continuamente para cima conforme se aumentou a intensidade de vento.

Para facilitar a visualização desta constatação, foi elaborada a Tabela 7 em que para cada intensidade do vento foi atribuída um número variando de 1 a 7, de baixo para cima, de acordo com a posição da curva no diagrama.

TABELA 7 - POSIÇÃO RELATIVA DAS CURVAS PARA CADA INTENSIDADE DO VENTO

| Modelo | 5ms ⁻¹ | 10ms ⁻¹ | 15ms ⁻¹ | 20ms ⁻¹ |
|---------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| MARQUES | 1 | 3 | 6 | 7 |
| WILSON | 2 | 1 | 1 | 5 |
| SMB | 3 | 2 | 2 | 2 |
| JONSWAP | 4 | 4 | 3 | 1 |
| FALVEY | 5 | 5 | 5 | 3 |
| SAVILLE | 6 | 6 | 4 | 4 |
| ITAIPU | 7 | 7 | 7 | 6 |

FONTE: O Autor (2022).

Nota-se que para cada intensidade do vento, as posições relativas entre os métodos WILSON e SAVILLE, aproximadamente adjacentes, trocando posições discretas entre os membros deste grupo destacado na tabela. Enquanto o método ITAIPU tende a limitar superiormente as demais curvas, o método MARQUES se desloca no diagrama à medida que aumenta a intensidade do vento, passando a limitar superiormente as demais curvas à partir de ventos com intensidade superior a 20ms⁻¹.

É oportuno destacar que dentre todos os métodos comparados, os dois únicos métodos com coeficientes variáveis são os métodos MARQUES e ITAIPU. Os métodos diferem pelo modo como foram constituídos. O modelo MARQUES foi obtido com base na modelação simultânea de quatro corpos hídricos de diferentes dimensões e formatos visando um modelo mais genérico, aplicável a corpos hídricos de quaisquer dimensões e formatos. O modelo ITAIPU é concebido para utilização exclusiva para o reservatório de ITAIPU. Acredita-se que o método seja também adequado para corpos hídricos de mesma magnitude, ou seja, de *fetch* máximo da ordem de 12 quilômetros. Porém a confirmação desta hipótese carece de estudos adicionais.

O fato dos modelos MARQUES e ITAIPU possuírem coeficientes variáveis condicionados pela intensidade do vento pode explicar uma constatação pouco tratada na literatura especializada: a posição relativa fixa das curvas em um diagrama adimensional.

Com exceção de MARQUES e ITAIPU, cabe recordar que os demais modelos paramétricos foram concebidos com base em dados coletados em águas oceânicas abertas. Neste ambiente de águas abertas, o *fetch* é comumente determinado como o comprimento de uma linha reta até atingir a margem ou obstáculo a barlavento.

Outra característica já mencionada é a abordagem metodológica adota que determina os coeficientes constantes.

Portanto, o desenvolvimento de modelos paramétricos dotados de coeficientes variáveis é capaz de explicar a existência da imensa diversidade de equações paramétricas e de não ser notada uma convergência entre estas em um diagrama adimensional. Esta questão conceitual é comprovada pelo presente capítulo por meio desta análise comparativa e lança luz na busca de equações paramétricas de altura de ondas cada vez mais precisas.

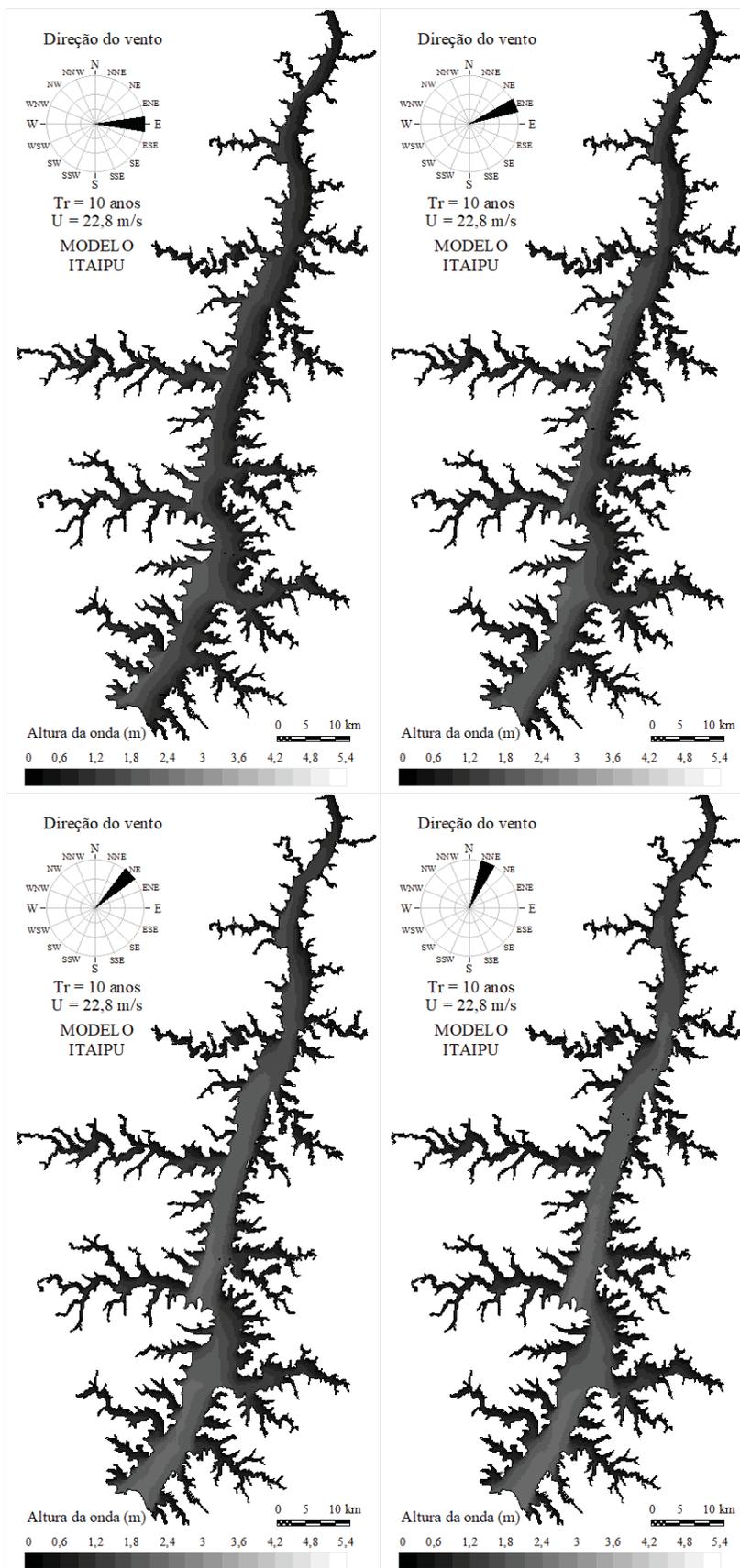
5.6 APLICAÇÃO DO MODELO ITAIPU

5.6.1 Altura de ondas

Pela aplicação do modelo ITAIPU no modelo ONDACAD, foram obtidos 64 mapas de distribuição dos campos de ondas.

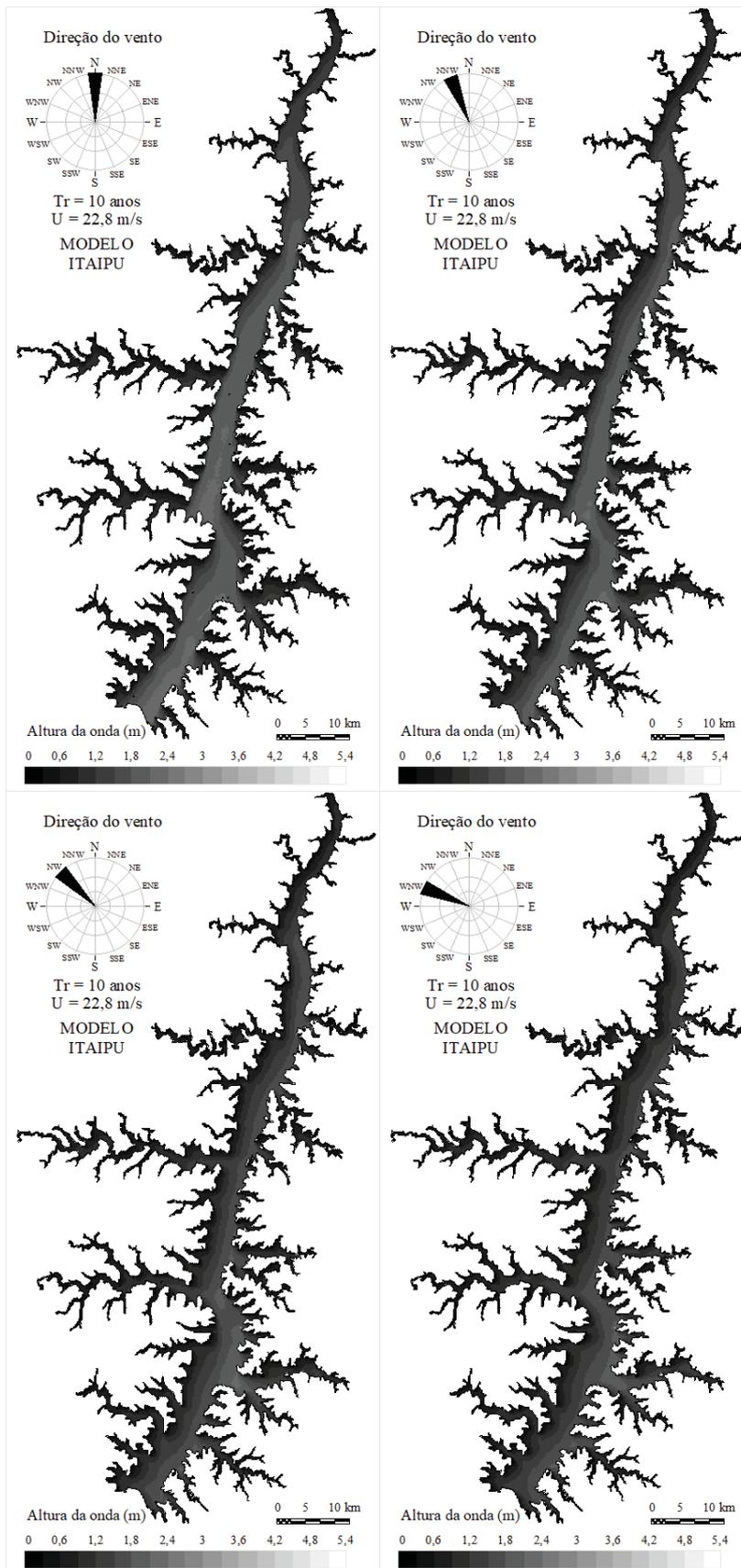
As Figuras 36 a 39 ilustram os campos de ondas para os ventos com período de retorno de 10 anos (TR=10 ANOS). As Figuras 40 a 43 representam os campos de ondas para os ventos com período de retorno de 20 anos (TR=20 ANOS). Já as Figuras 44 até 47 demonstram os campos de ondas para os ventos com período de retorno de 50 anos (TR=50 ANOS) e por fim as Figuras 48 a 51 ilustram os campos de ondas para os ventos com período de retorno de 100 anos (TR=100 ANOS).

FIGURA 36 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE
PRODUZIDAS POR VENTOS DE $22,8 \text{ MS}^{-1}$ (TR=10 ANOS)



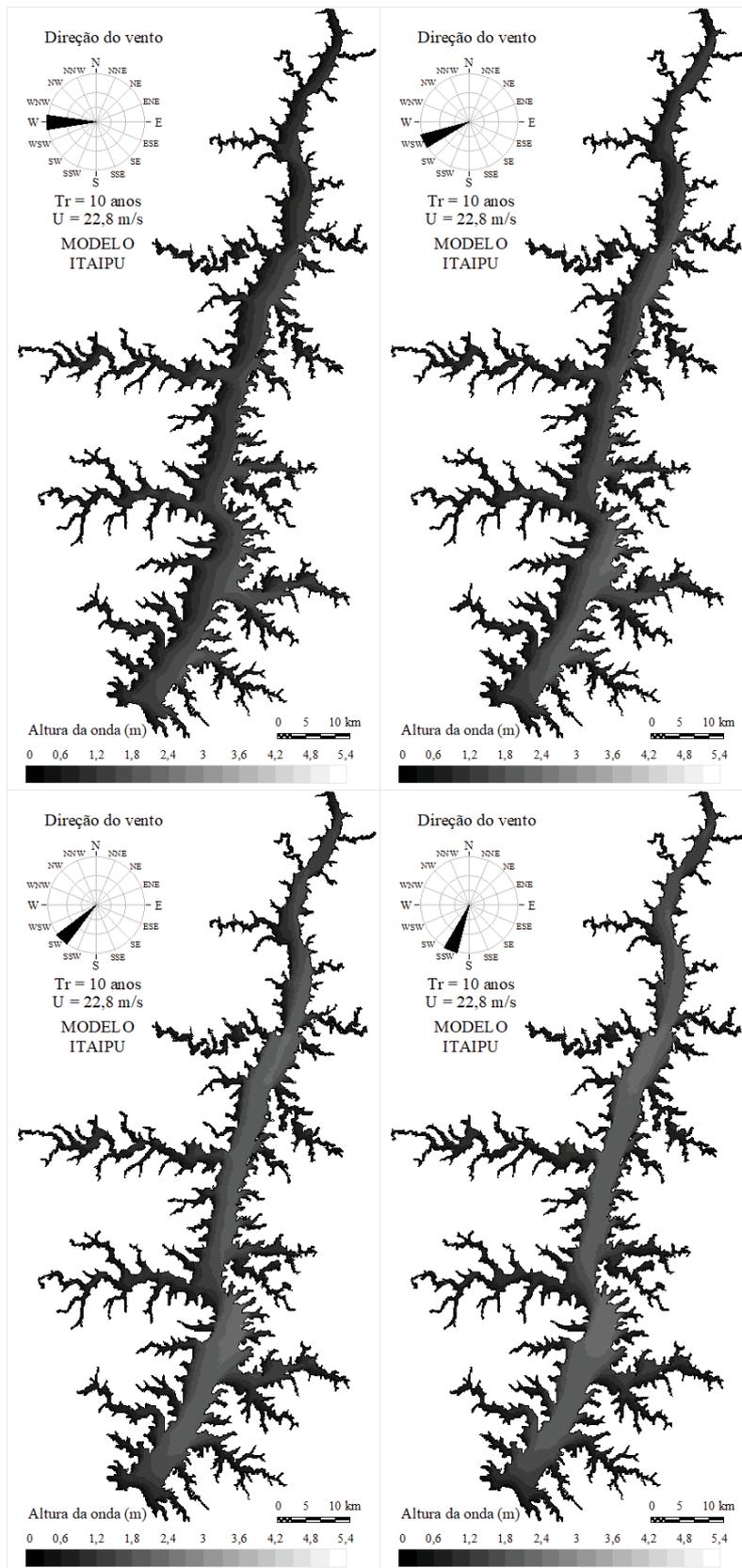
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 37 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW
 PRODUZIDAS POR VENTOS DE 22,8 MS⁻¹ (TR=10 ANOS)



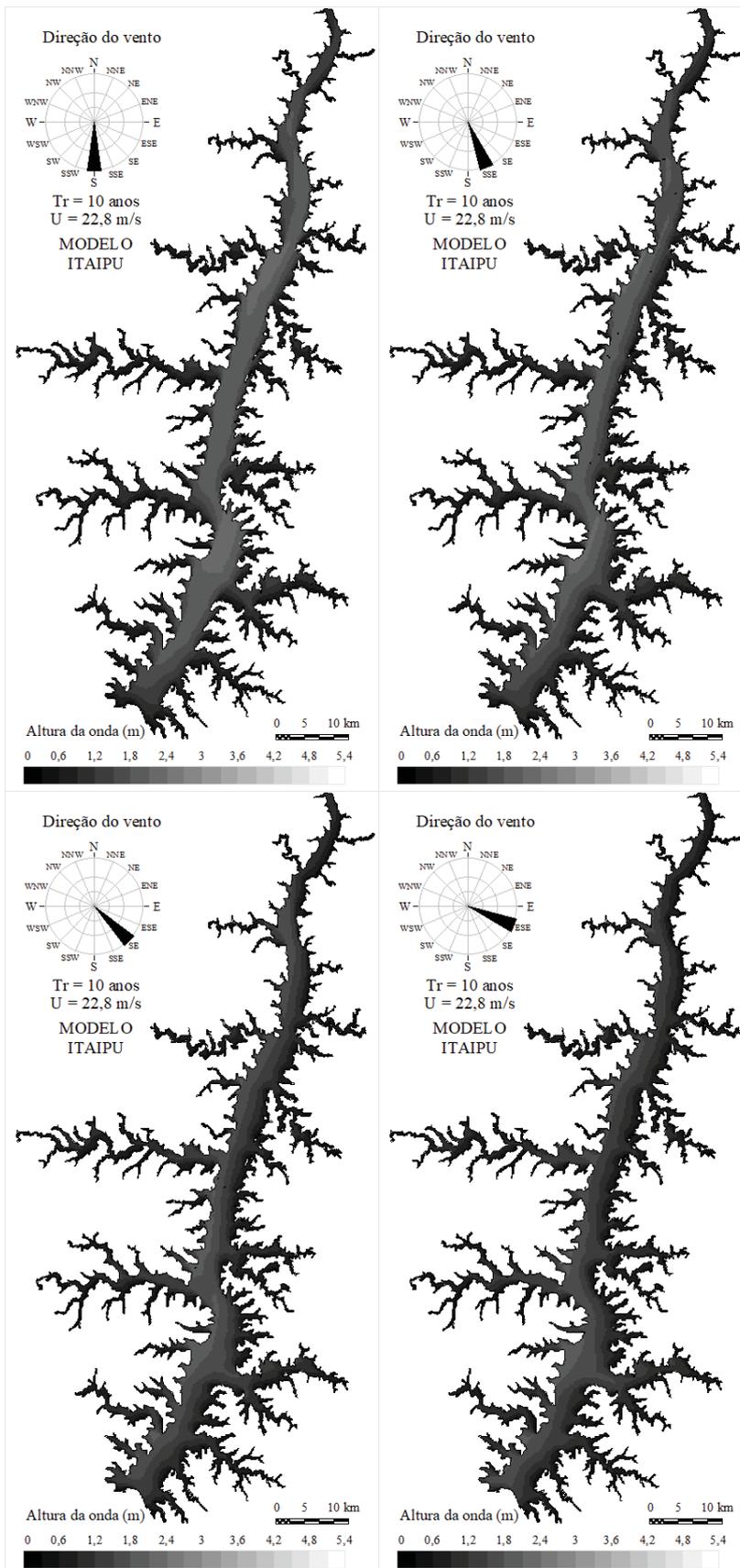
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 38 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW
 PRODUZIDAS POR VENTOS DE 22,8 MS⁻¹ (TR=10 ANOS)



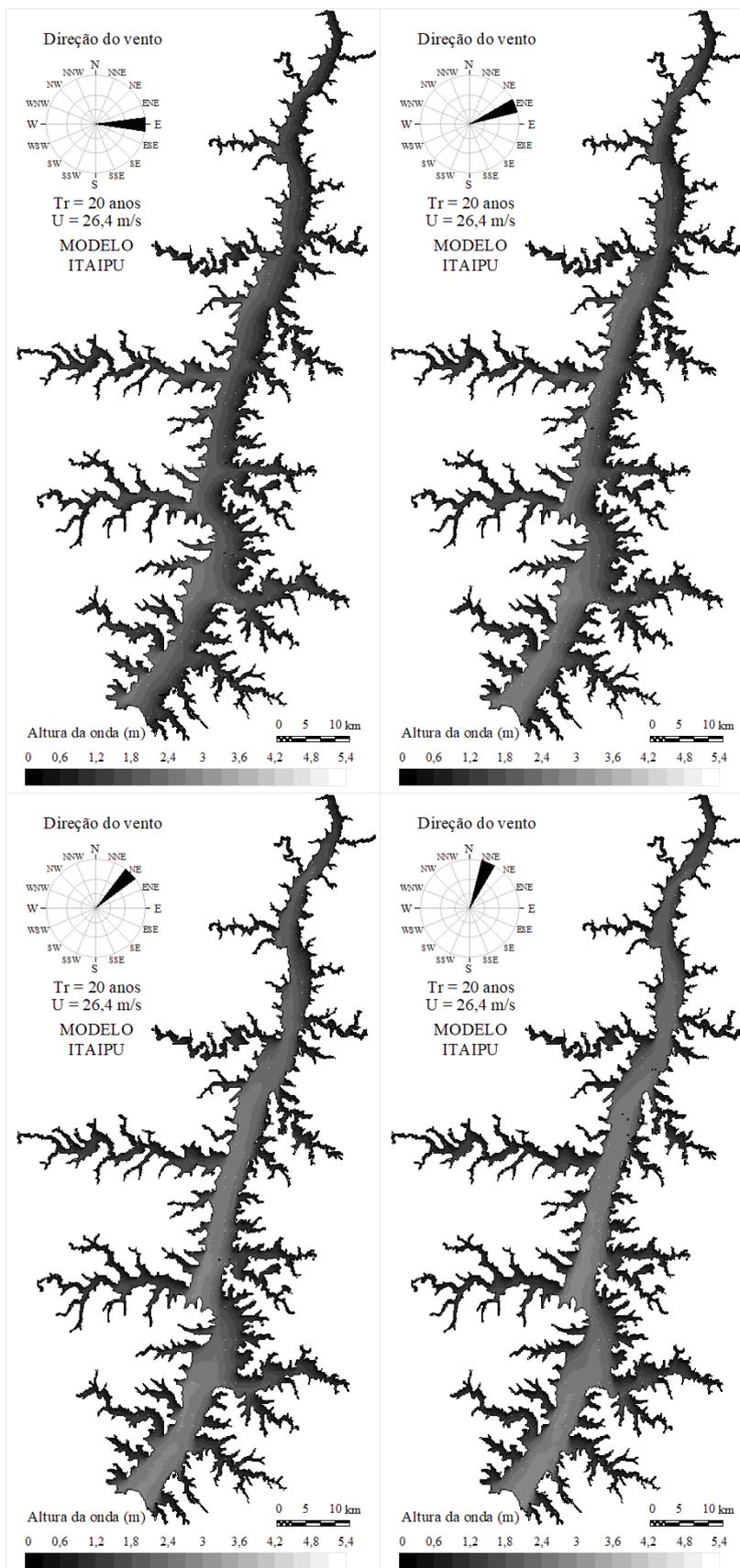
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 39 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE
 PRODUZIDAS POR VENTOS DE 22,8 MS⁻¹ (TR=10 ANOS)



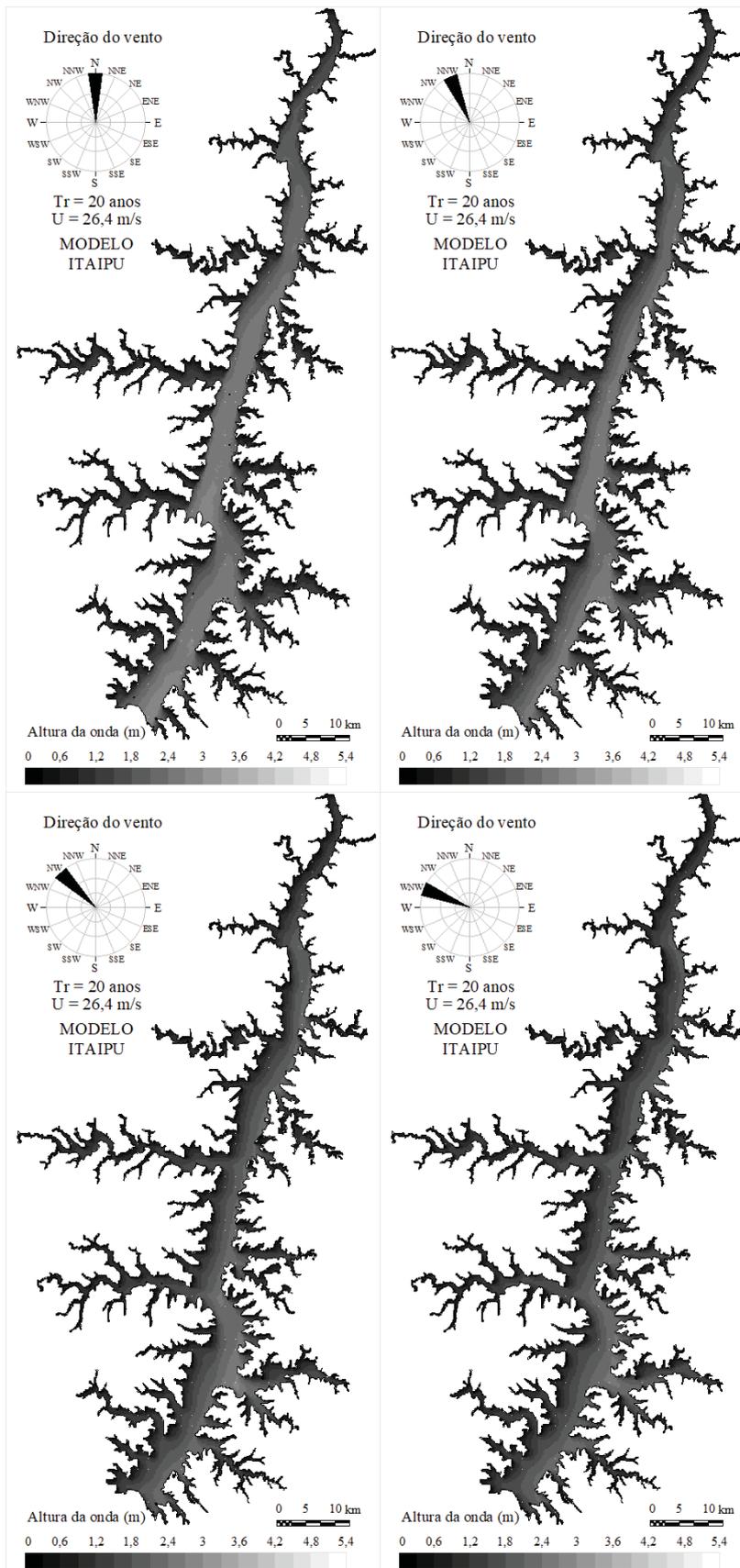
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 40 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE
PRODUZIDAS POR VENTOS DE 26,4 MS⁻¹ (TR=20 ANOS)



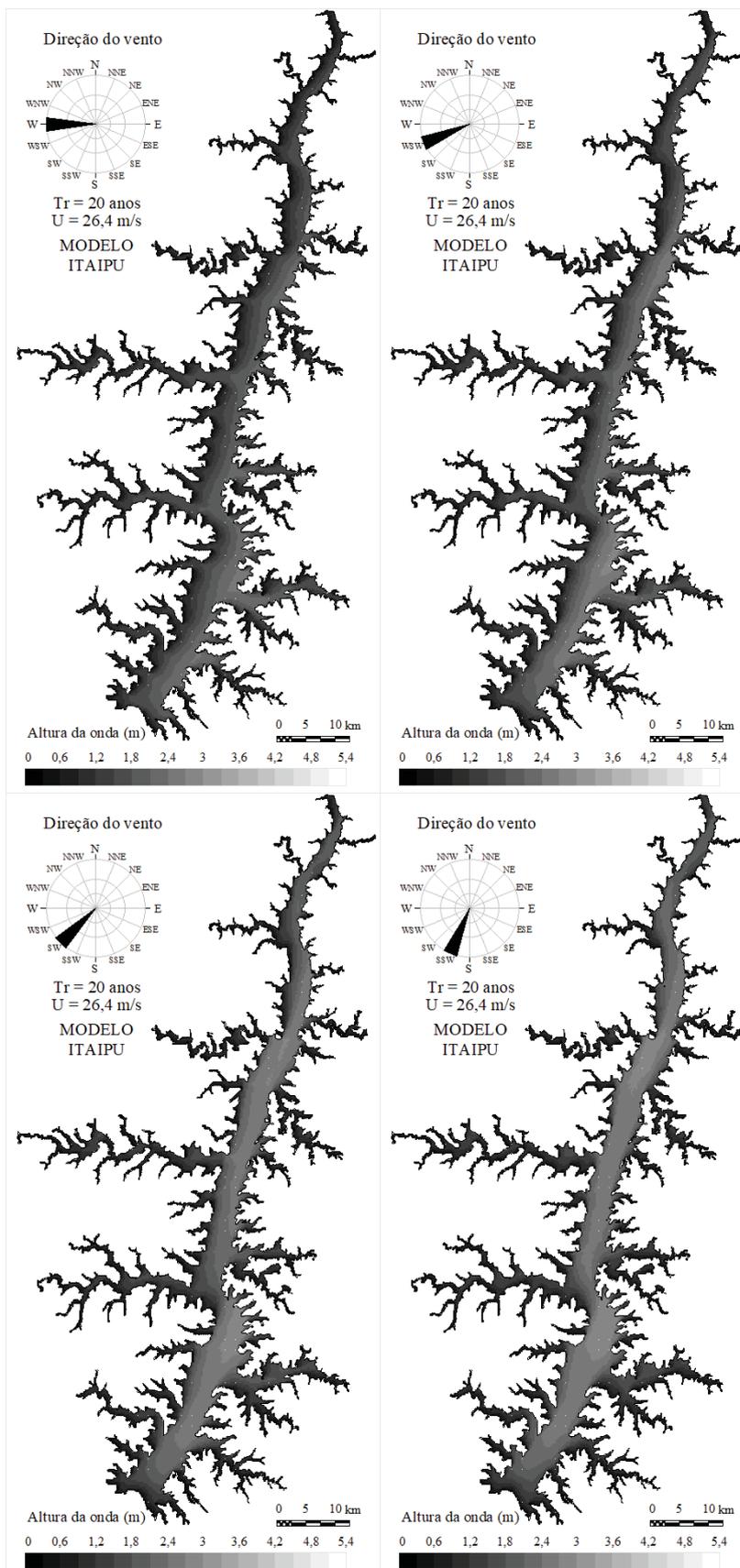
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 41 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW
 PRODUZIDAS POR VENTOS DE $26,4 \text{ MS}^{-1}$ (TR=20 ANOS)



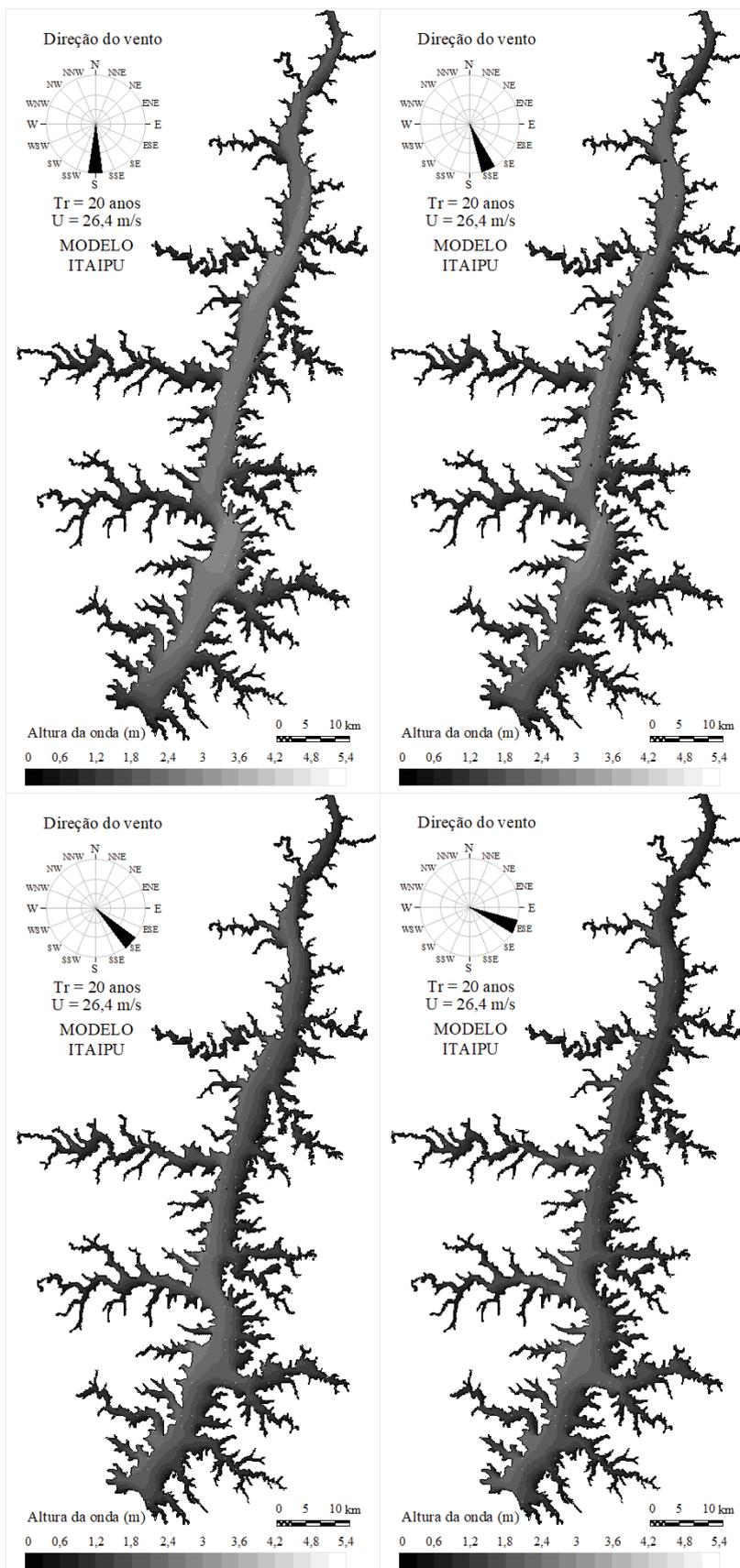
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 42 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW
PRODUZIDAS POR VENTOS DE 26,4 MS⁻¹ (TR=20 ANOS)



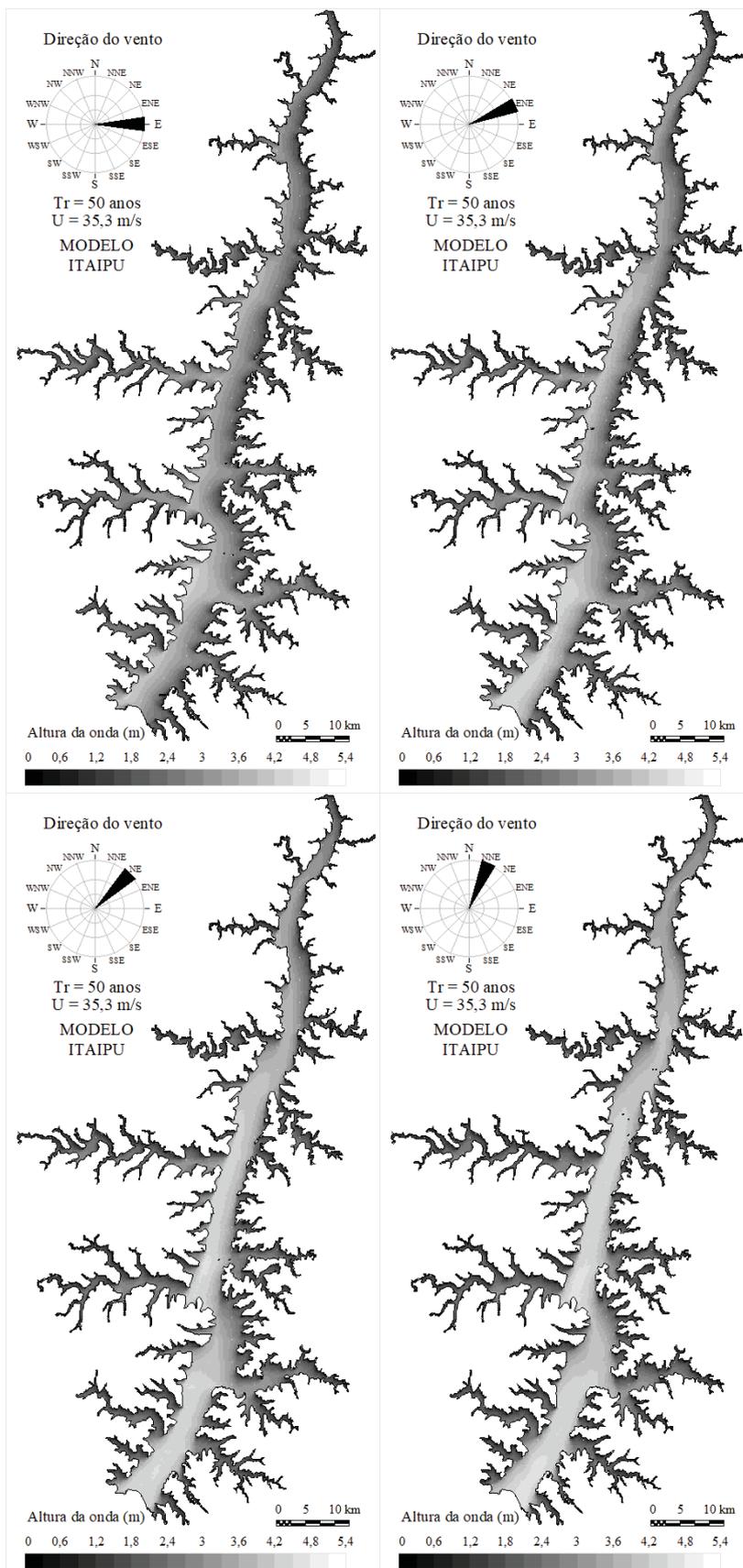
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 43 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE
PRODUZIDAS POR VENTOS DE $26,4 \text{ MS}^{-1}$ (TR=20 ANOS)



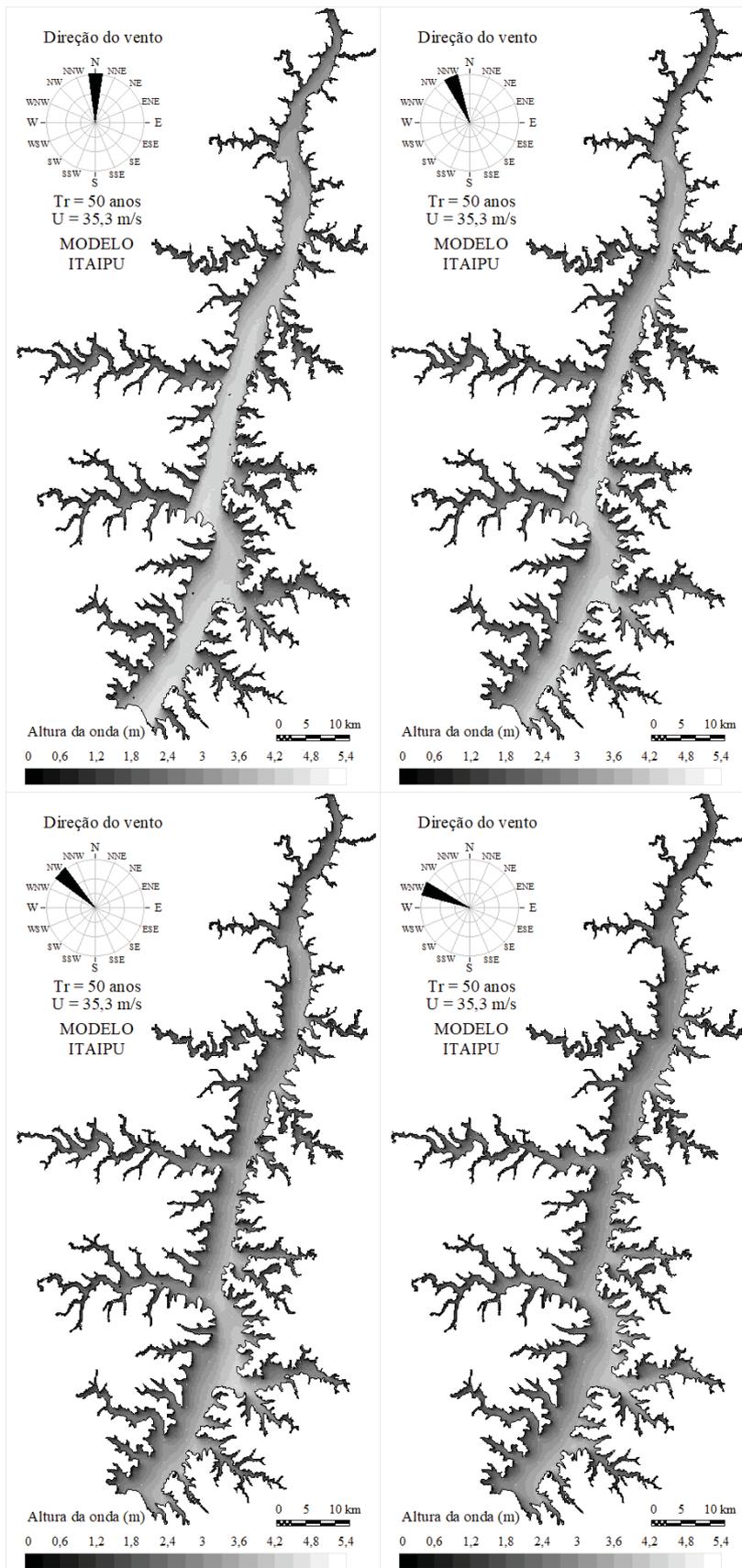
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 44 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE
PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS⁻¹ (TR=50 ANOS)



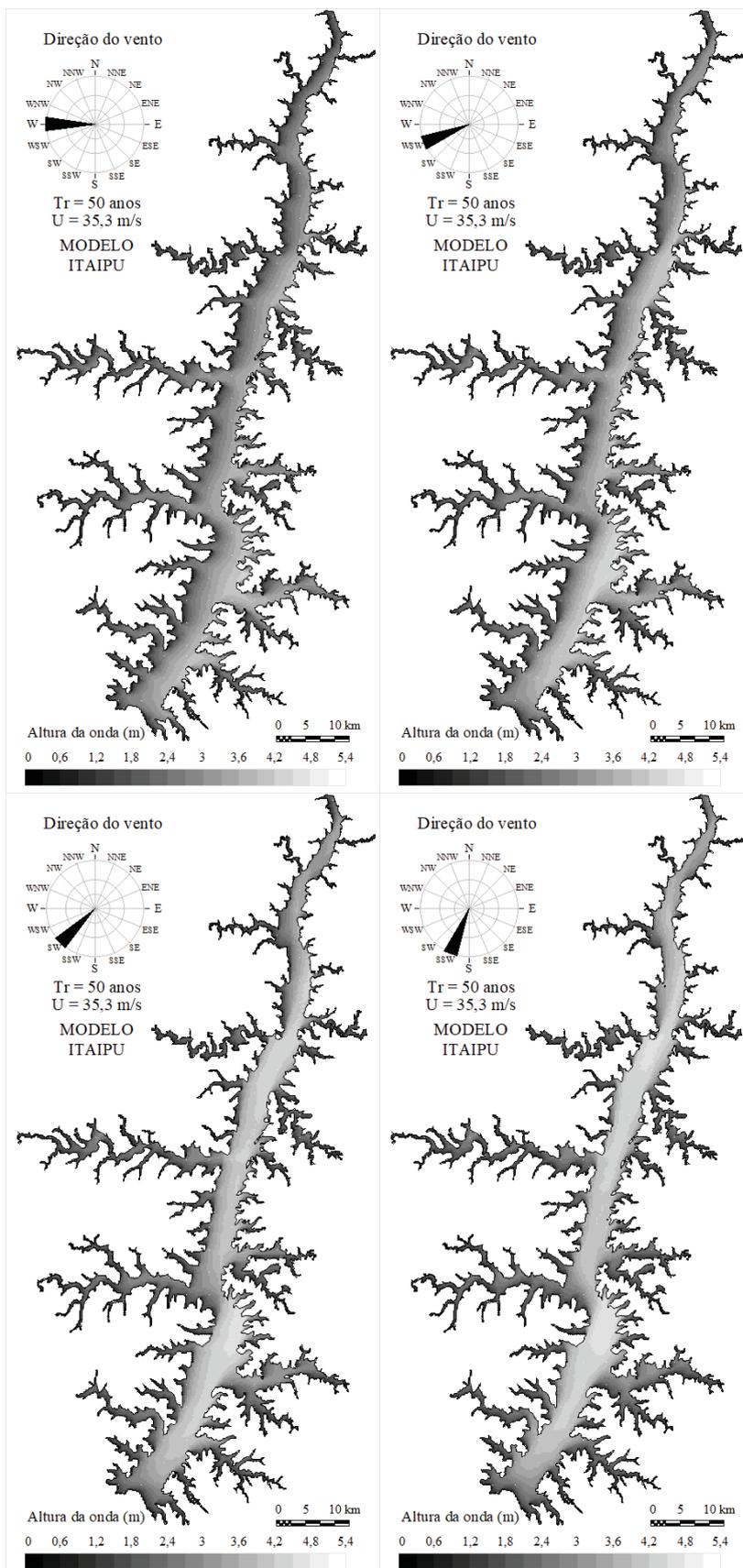
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 45 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW
 PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS⁻¹ (TR=50 ANOS)



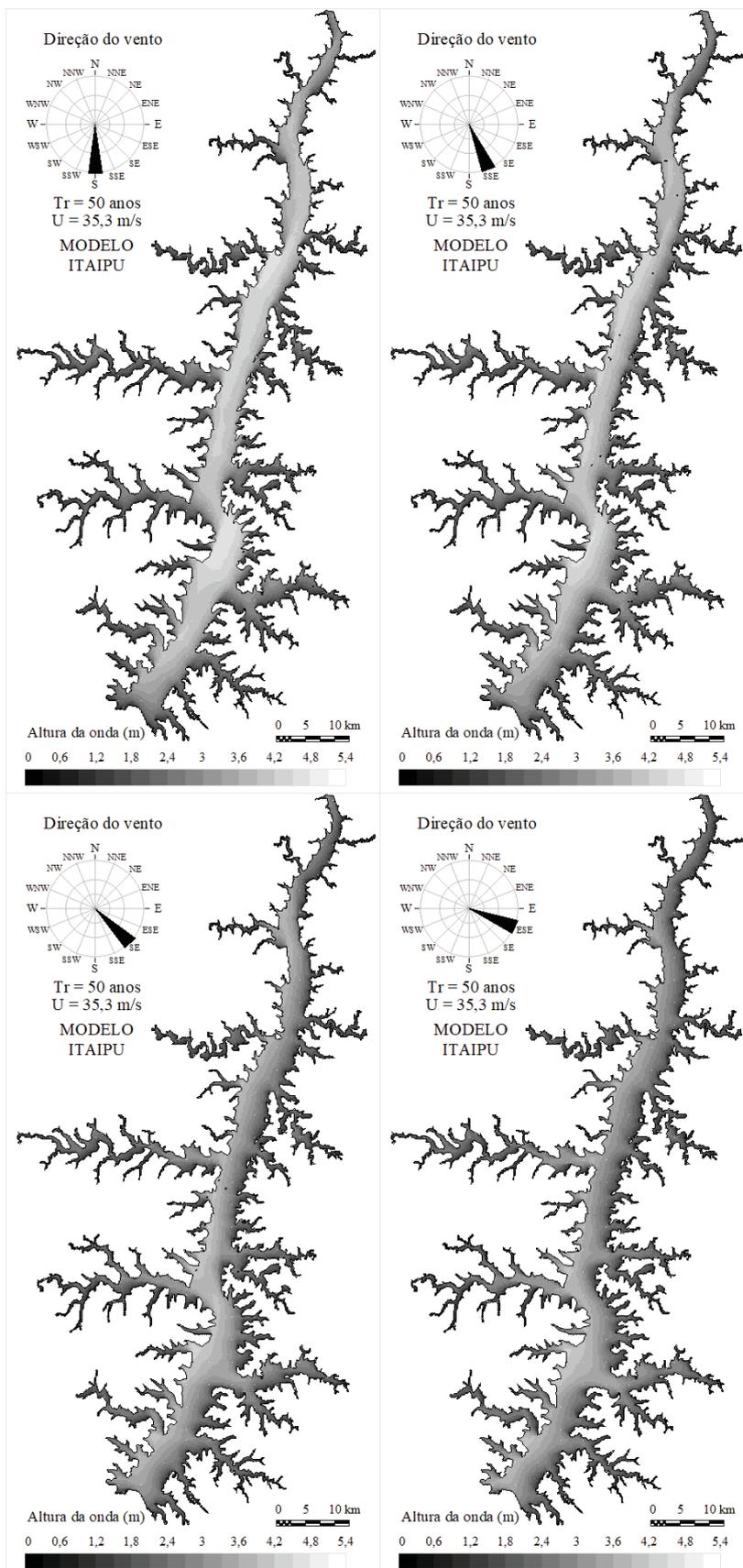
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 46 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW
 PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS⁻¹ (TR=50 ANOS)



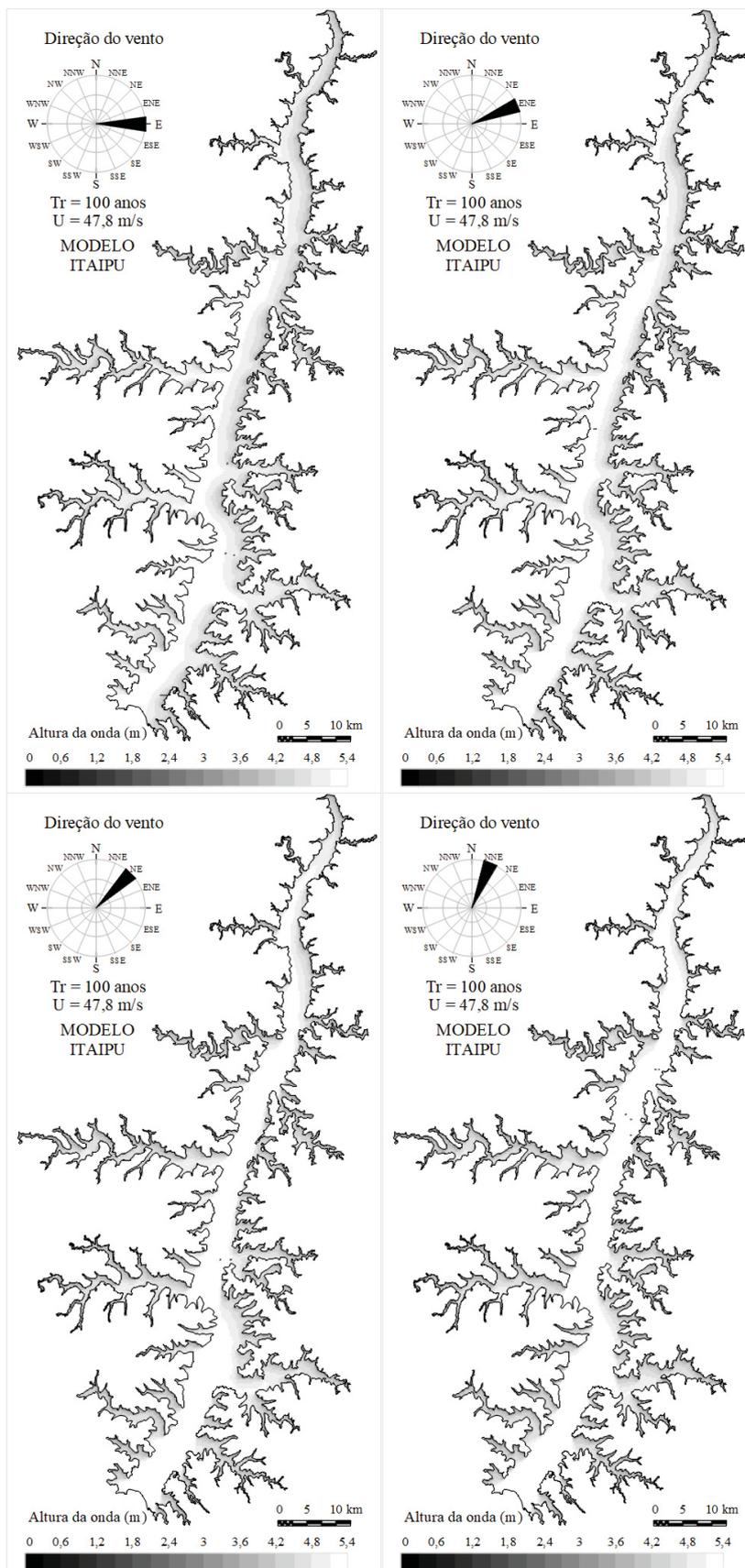
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 47 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE
PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS⁻¹ (TR=50 ANOS)



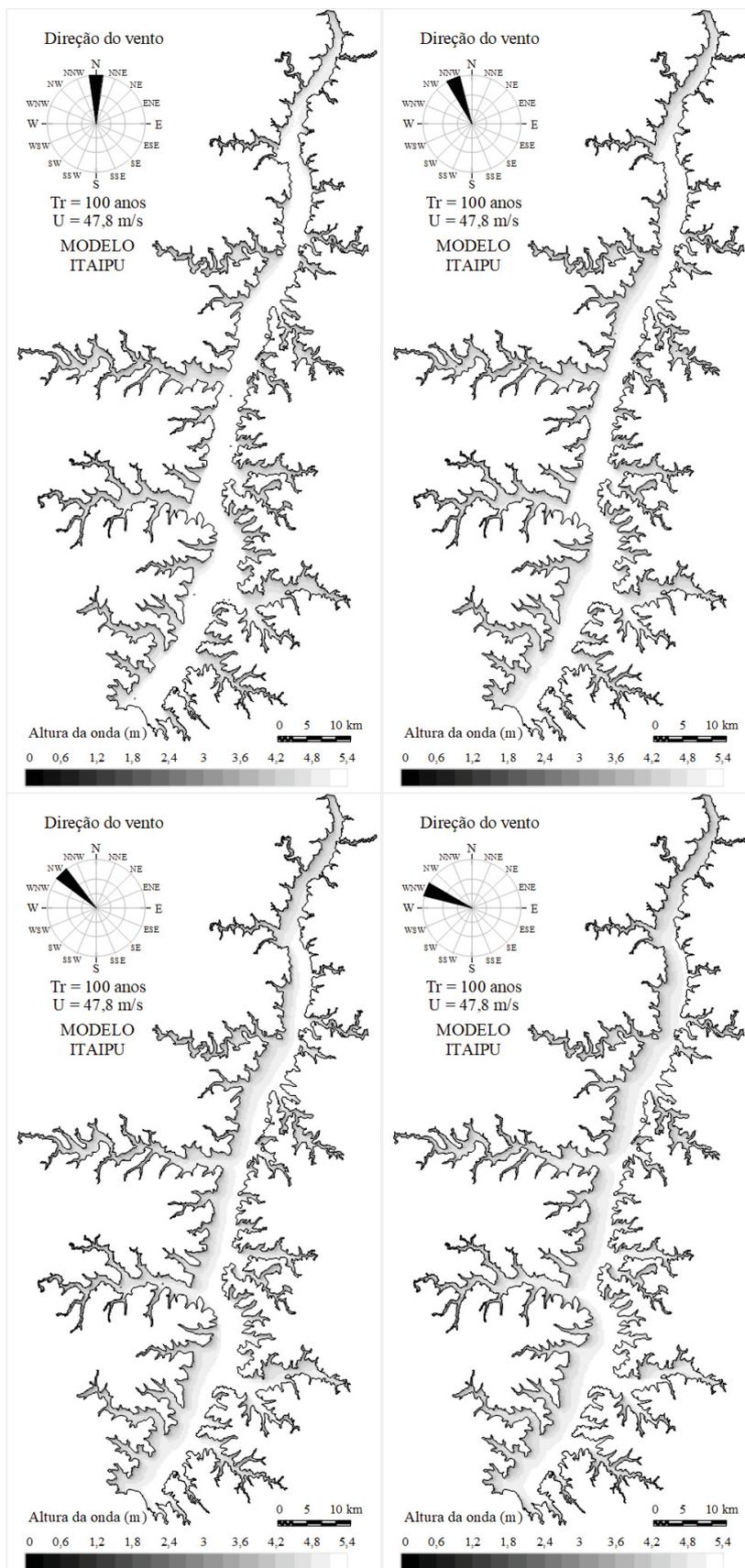
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 48 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE
 PRODUZIDAS POR VENTOS DE $47,8 \text{ MS}^{-1}$ (TR=100 ANOS)



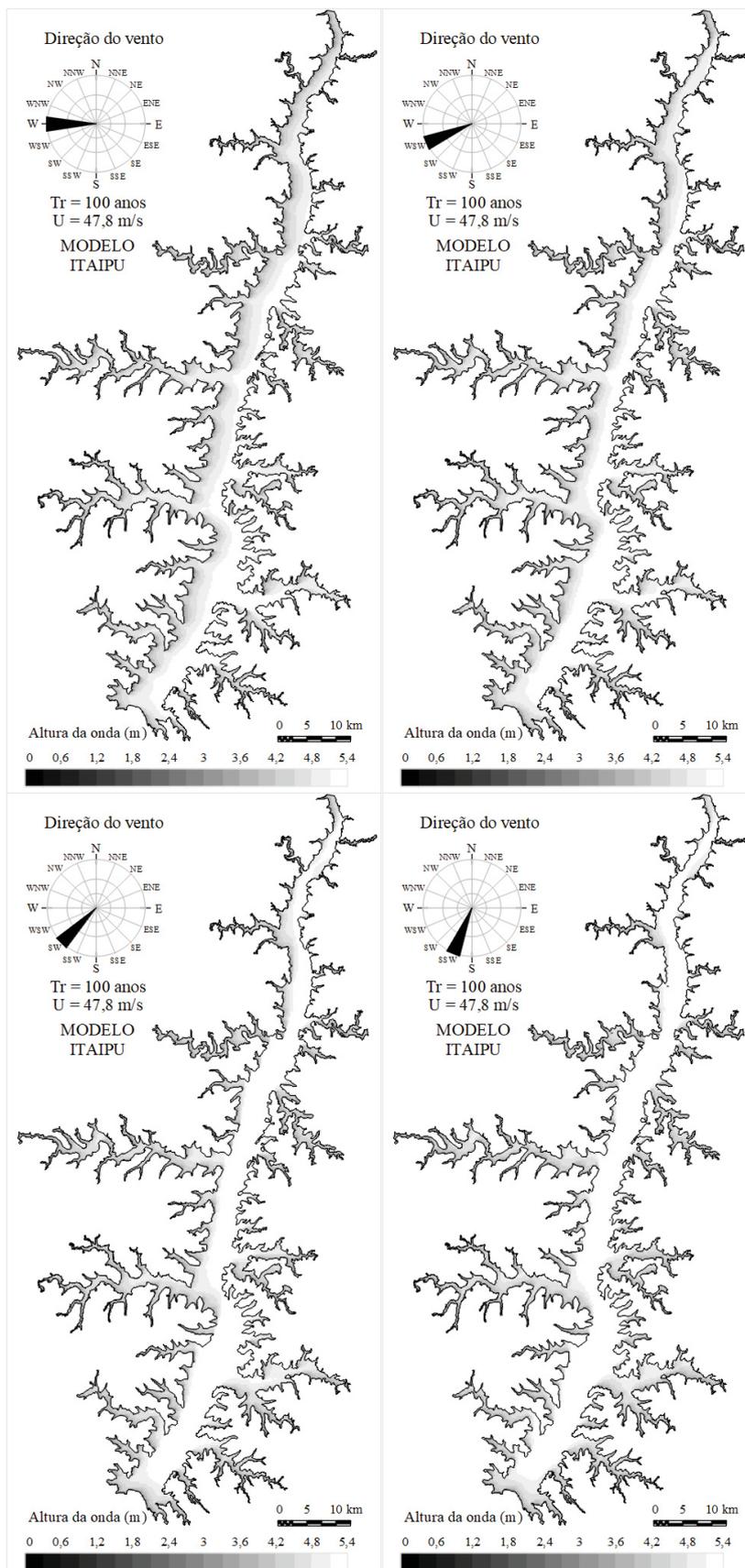
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 49 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW
PRODUZIDAS POR VENTOS DE $47,8 \text{ MS}^{-1}$ (TR=100 ANOS)



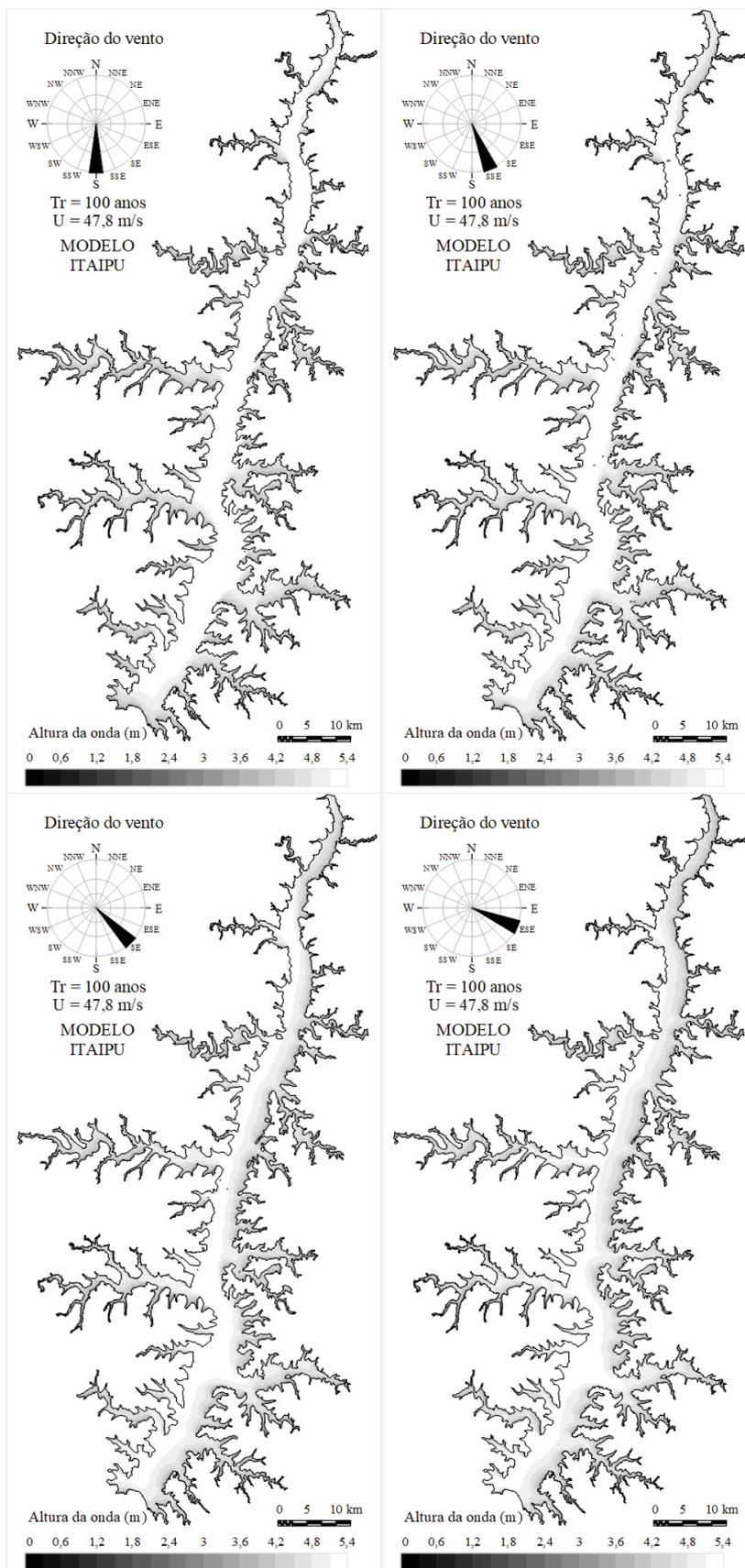
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 50 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW
 PRODUZIDAS POR VENTOS DE $47,8 \text{ MS}^{-1}$ (TR=100 ANOS)



FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 51 - MAPAS DE ALTURA DAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE
 PRODUZIDAS POR VENTOS DE $47,8 \text{ MS}^{-1}$ (TR=100 ANOS)



FONTE: O Autor (2022).

A tabulação das maiores alturas de ondas para cada condição de vento extremo e cada direção, é mostrada através da Tabela 8:

TABELA 8 - MAIORES ALTURAS DE ONDAS

| Direção | | E | ENE | NE | NNE | N | NNW | NW | WNW |
|----------------|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Fetch máx (km) | | 7,72 | 11,08 | 10,59 | 12,10 | 10,07 | 10,48 | 9,43 | 6,53 |
| Hs (m) | U=22,8 m/s | 1,83 | 2,16 | 2,11 | 2,25 | 2,06 | 2,10 | 2,00 | 1,69 |
| | U=26,4 m/s | 2,34 | 2,74 | 2,69 | 2,85 | 2,63 | 2,68 | 2,56 | 2,17 |
| | U=35,3 m/s | 3,95 | 4,49 | 4,42 | 4,63 | 4,34 | 4,40 | 4,24 | 3,73 |
| | U=47,8 m/s | 5,45 | 5,68 | 5,65 | 5,74 | 5,62 | 5,65 | 5,58 | 5,35 |

| Direção | | W | WSW | SW | SSW | S | SSE | SE | ESE |
|----------------|------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Fetch máx (km) | | 6,97 | 10,80 | 10,38 | 12,02 | 11,71 | 10,97 | 10,16 | 7,03 |
| Hs (m) | U=22,8 m/s | 1,74 | 2,13 | 2,09 | 2,24 | 2,21 | 2,15 | 2,07 | 1,75 |
| | U=26,4 m/s | 2,24 | 2,71 | 2,67 | 2,84 | 2,81 | 2,73 | 2,64 | 2,24 |
| | U=35,3 m/s | 3,81 | 4,45 | 4,38 | 4,62 | 4,57 | 4,47 | 4,35 | 3,83 |
| | U=47,8 m/s | 5,39 | 5,67 | 5,64 | 5,74 | 5,72 | 5,68 | 5,63 | 5,40 |

FONTE: O Autor (2022).

Os maiores comprimentos de *fetch* foram verificados para ventos soprando da direção NNE, o que se verificou igualmente para as maiores ondas. Do mesmo modo, o menor dentre os maiores comprimentos de *fetch* ocorreu para a direção WNW. Estas constatações atestam a consistência na aplicação do modelo na obtenção dos resultados de *fetch* e altura de ondas.

Quanto às maiores alturas atingidas pelas ondas, estas se referem à direção NNE e variaram de 2,25 m para período de retorno de 10 anos a 5,74 m para período de retorno de 100 anos.

A previsão de altura de ondas geradas por ventos extremos é um aspecto crítico na avaliação de riscos. Portanto, é compreensível que se tenha surpresa ao obter resultados de modelos computacionais que indicam alturas de ondas da ordem de 6m geradas por ventos de período de retorno tão elevado quanto 100 anos. Nesta análise serão exploradas as possíveis razões para essa constatação e avaliar a previsão de altura de ondas em circunstâncias extremas.

Ventos com períodos de retorno tão altos quanto 100 anos parecem superdimensionados porque são eventos extremos e relativamente raros. Eventos climáticos com essa magnitude ocorrem apenas em circunstâncias específicas,

como tempestades de vento intensas ou furacões, que são relativamente raros em muitas regiões do mundo.

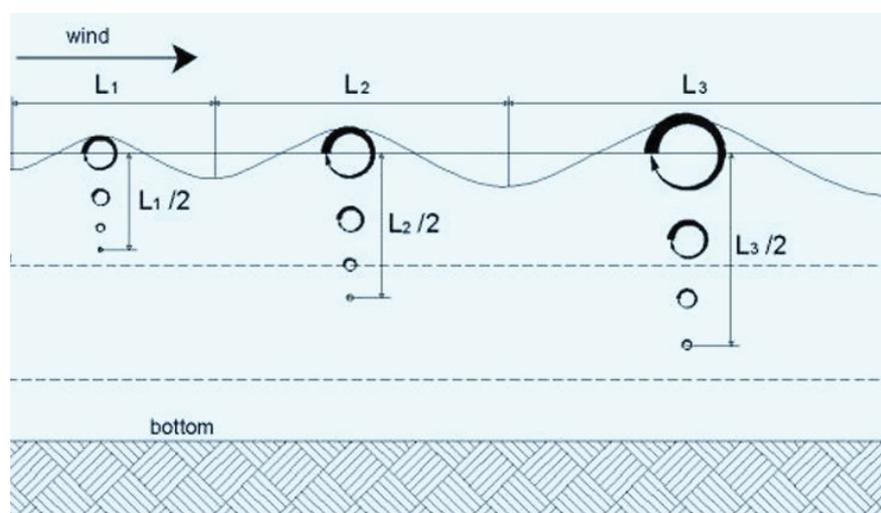
Além disso, a pequena probabilidade de que eventos climáticos com períodos de retorno tão altos sejam observados na prática é sustentada pelo período disponível para a observação, geralmente da ordem de décadas no Brasil.

Deste modo, ventos com períodos de retorno tão altos quanto 100 anos podem parecer superdimensionados porque são eventos extremos e raros, e sua probabilidade de serem observados na prática é dependente do período disponível para a observação e registros de dados consistentes e sem falhas.

5.6.2 Profundidade de mistura

O termo profundidade de mistura é definido como a profundidade máxima afetada pela onda ao se propagar. O efeito da dispersão longitudinal provocado por ondas geradas pela ação do vento constitui-se em um processo de importante impacto no ambiente podendo provocar ressuspensão de sedimentos e desestratificação térmica do corpo hídrico. O conceito se baseia na constatação que uma onda de determinado comprimento, propagando-se, perturba a massa líquida a uma profundidade máxima equivalente à metade de seu comprimento. Desse modo, ao determinar a metade do comprimento da onda em um ponto, se está determinando a profundidade de mistura, conforme Figura 52.

FIGURA 52 - REPRESENTAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE MISTURA PARA ONDAS DE COMPRIMENTO L



Fonte: Adaptado de Marques (2013)

A ação do vento sobre a superfície de reservatórios pode ser importante principalmente quando o eixo longitudinal do corpo hídrico é orientado na direção do vento predominante. A profundidade média dos reservatórios também é um fator importante, pois, corpos de água rasos têm uma resposta mais rápida a processos de aquecimento e resfriamento ou a ação de ondas. Estas induzem processos de mistura em toda coluna d'água tendendo a destruir a estratificação vertical favorecendo a criação de gradientes longitudinais e transversais mais intensos, de acordo com Smith (1994).

Este conceito é aplicado ao reservatório de Itaipu de modo a obter a representação da profundidade de mistura em toda a superfície livre para 16 direções e para ventos relacionados a períodos de retorno de 10, 20, 50 e 100 anos.

As profundidades são determinadas com base em representações bidimensionais da superfície do corpo hídrico pela aplicação do modelo ONDACAD.

Pela técnica de modelagem adotada, um campo de *fetch* é convertido em um campo de profundidade de mistura através de uma equação paramétrica. A equação paramétrica é obtida com base em conceitos físicos tratados pela teoria linear de ondas, para a qual o comprimento da onda em águas profundas é definido pela equação:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (49)$$

Onde L é o comprimento da onda, g é a aceleração gravitacional e T é o período da onda.

Para a determinação do período da onda é adotado o modelo SMB. Trata-se de uma equação paramétrica amplamente difundida no meio técnico e tratada com profundidade por Marques (2013). O período da onda é condicionado pela aceleração da gravidade (g), pelo comprimento do *fetch* (F) e pela intensidade do vento (U), conforme a equação:

$$T = 7,54 \frac{U_{10}}{g} \tanh \left[0,077 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0,25} \right] \quad (50)$$

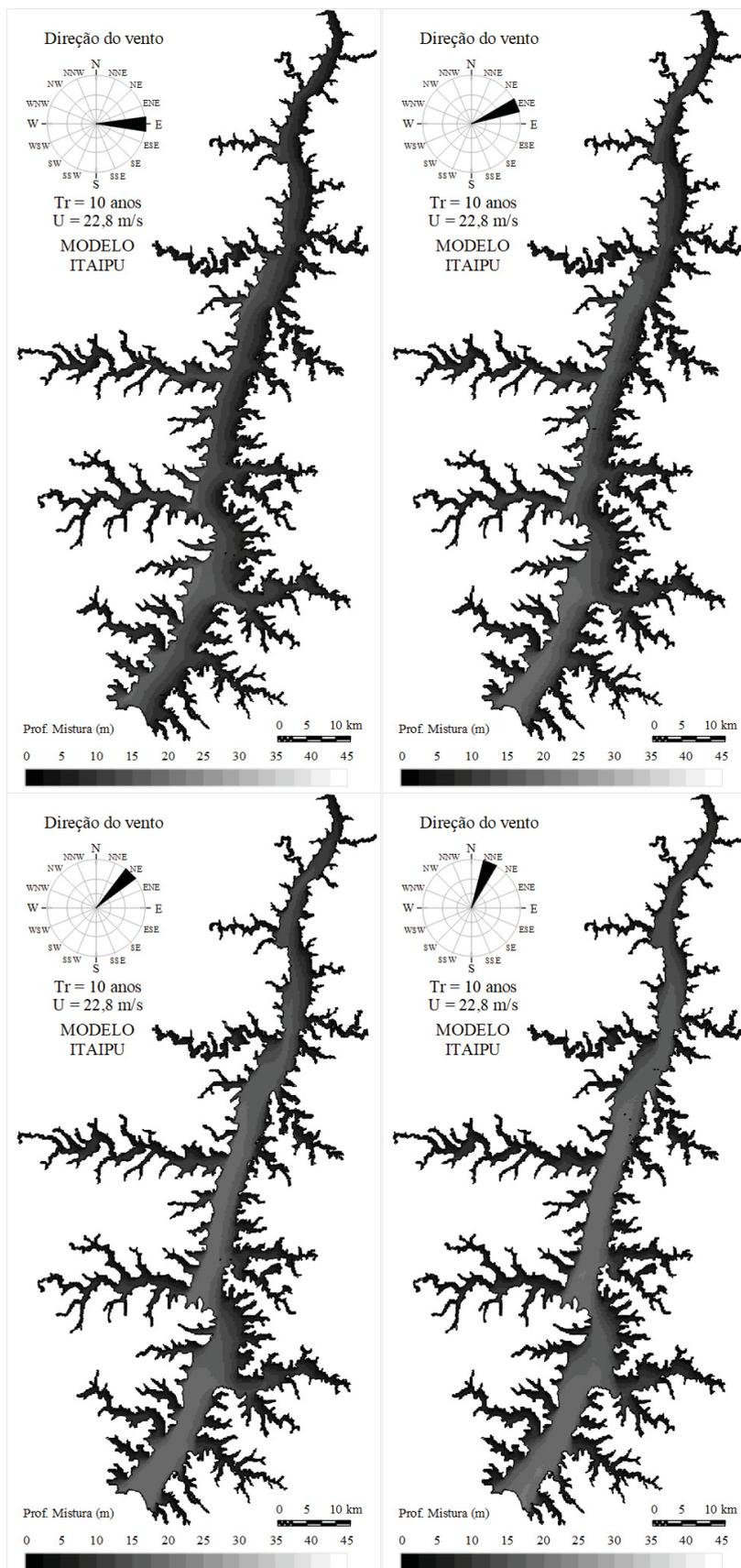
Substituindo a equação (50) na equação (49) e assumindo que a profundidade de mistura (*pfm*) é a metade do comprimento da onda (L) se obtém a equação a seguir:

$$pfm = \frac{4,52U_{10}^2}{g} \left\{ \tanh \left[0,077 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0,25} \right] \right\}^2 \quad (51)$$

É por meio da equação (51) que o campo de *fetch* é transformado em um campo de profundidade de mistura pelo modelo ONDACAD.

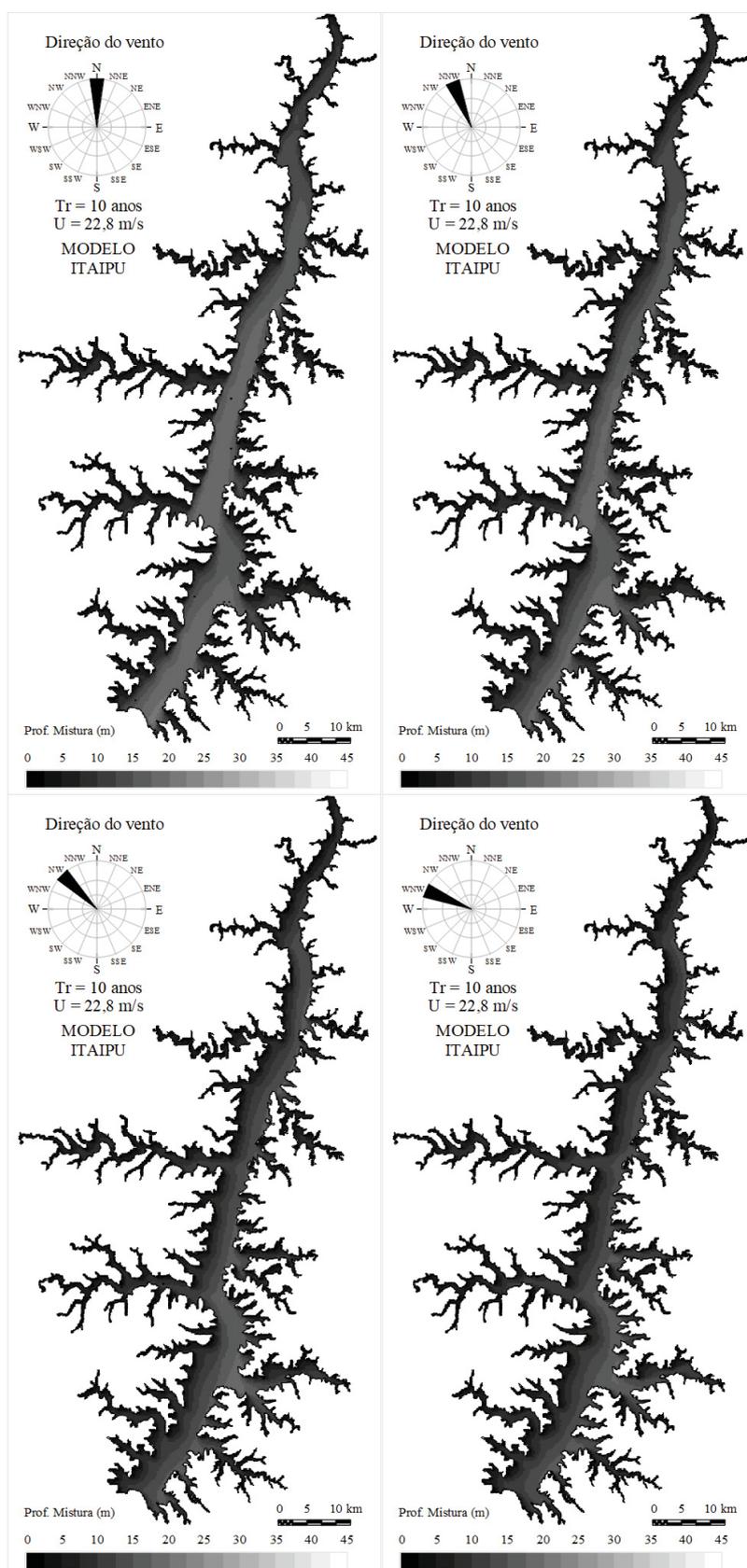
As Figuras 53 a 56 ilustram os mapas de profundidades atingidas pelas ondas para os ventos com período de retorno de 10 anos (TR=10 ANOS) produzidas por ventos de 22,8 MS⁻¹. As Figuras 57 a 60 representam os mapas de profundidades atingidas pelas ondas para os ventos com período de retorno de 20 anos (TR=20 ANOS) com ventos de 26,4 MS⁻¹. Logo, as Figuras 61 até 64 demonstram os mapas de profundidades atingidas pelas ondas para os ventos com período de retorno de 50 anos (TR=50 ANOS) com ventos de 35,3 MS⁻¹ e as Figuras 65 a 68 ilustram os mapas de profundidades atingidas pelas ondas para os ventos com período de retorno de 100 anos (TR=100 ANOS) para ventos de 47,8 MS⁻¹.

FIGURA 53 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 22,8 MS⁻¹ (TR=10 ANOS)



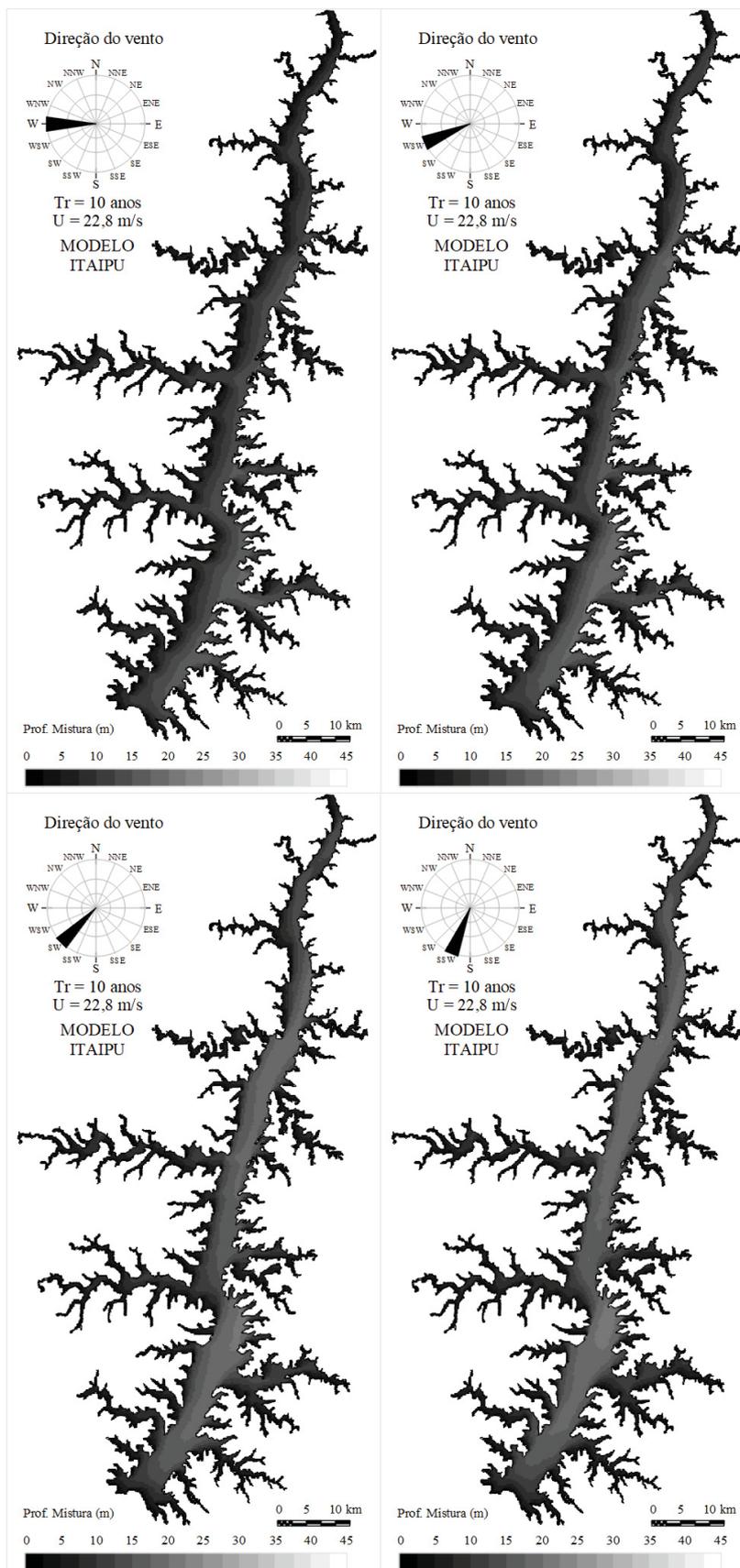
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 54 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW PRODUZIDAS POR VENTOS DE $22,8 \text{ MS}^{-1}$ (TR=10 ANOS)



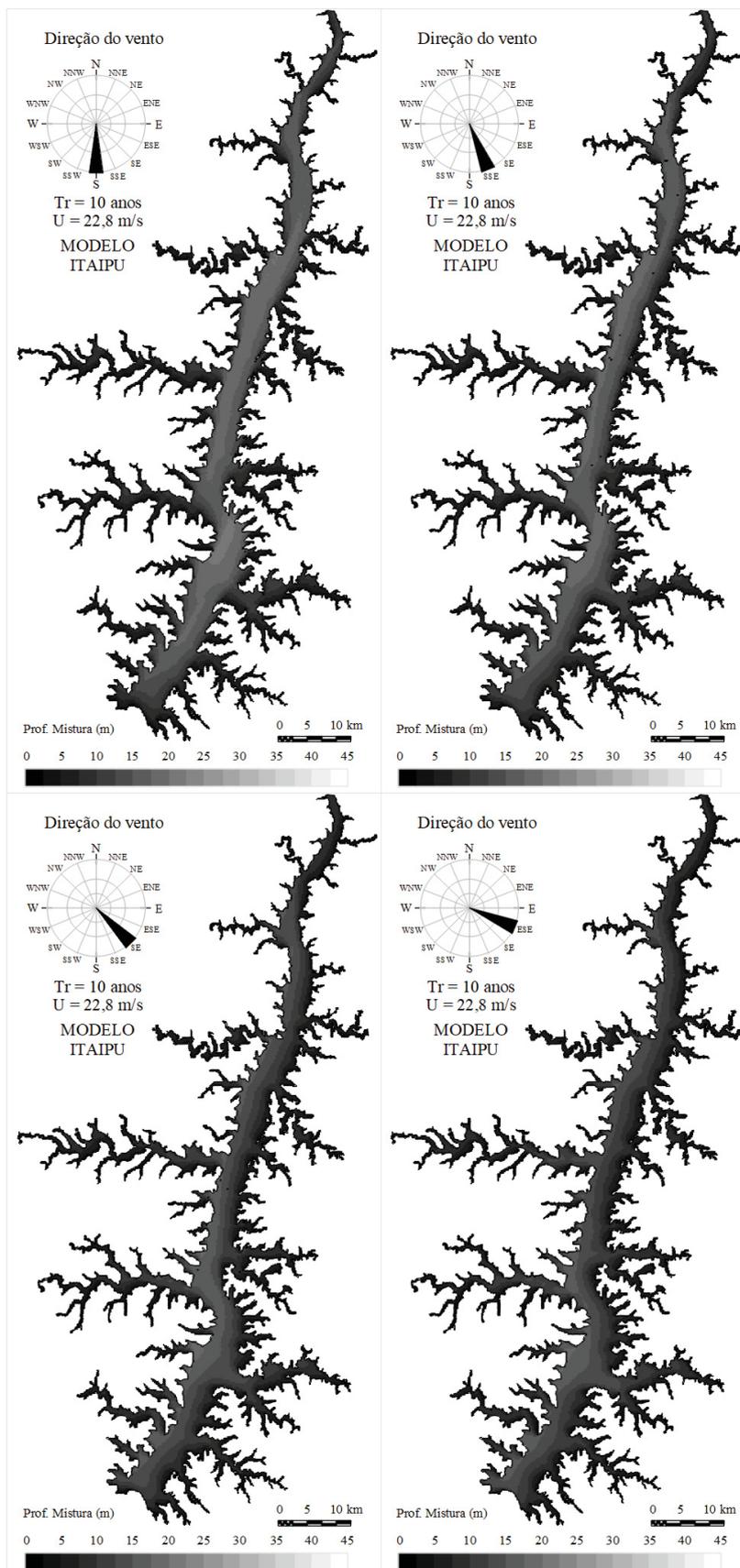
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 55 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW PRODUZIDAS POR VENTOS DE $22,8 \text{ MS}^{-1}$ (TR=10 ANOS)



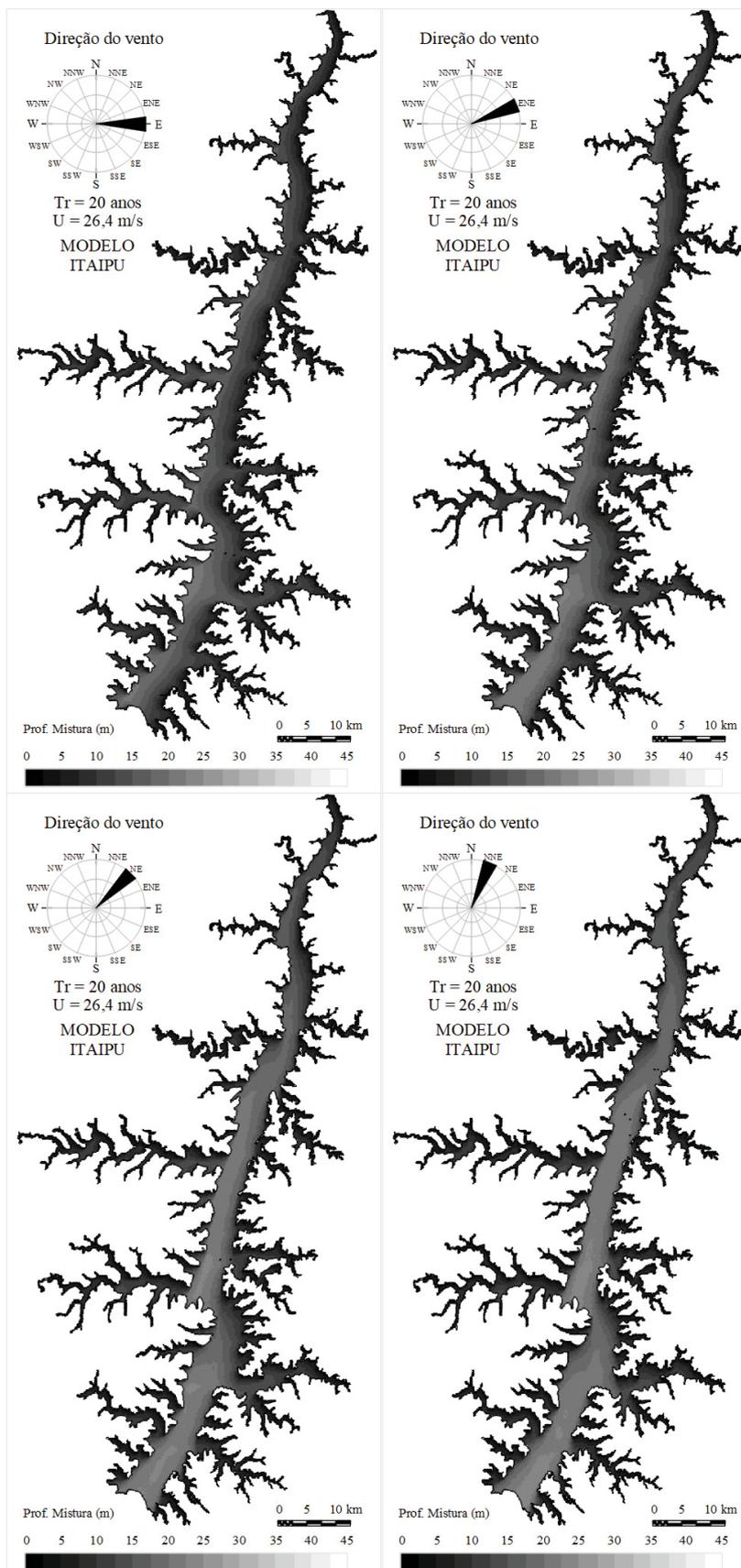
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 56 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE PRODUZIDAS POR VENTOS DE $22,8 \text{ MS}^{-1}$ (TR=10 ANOS)



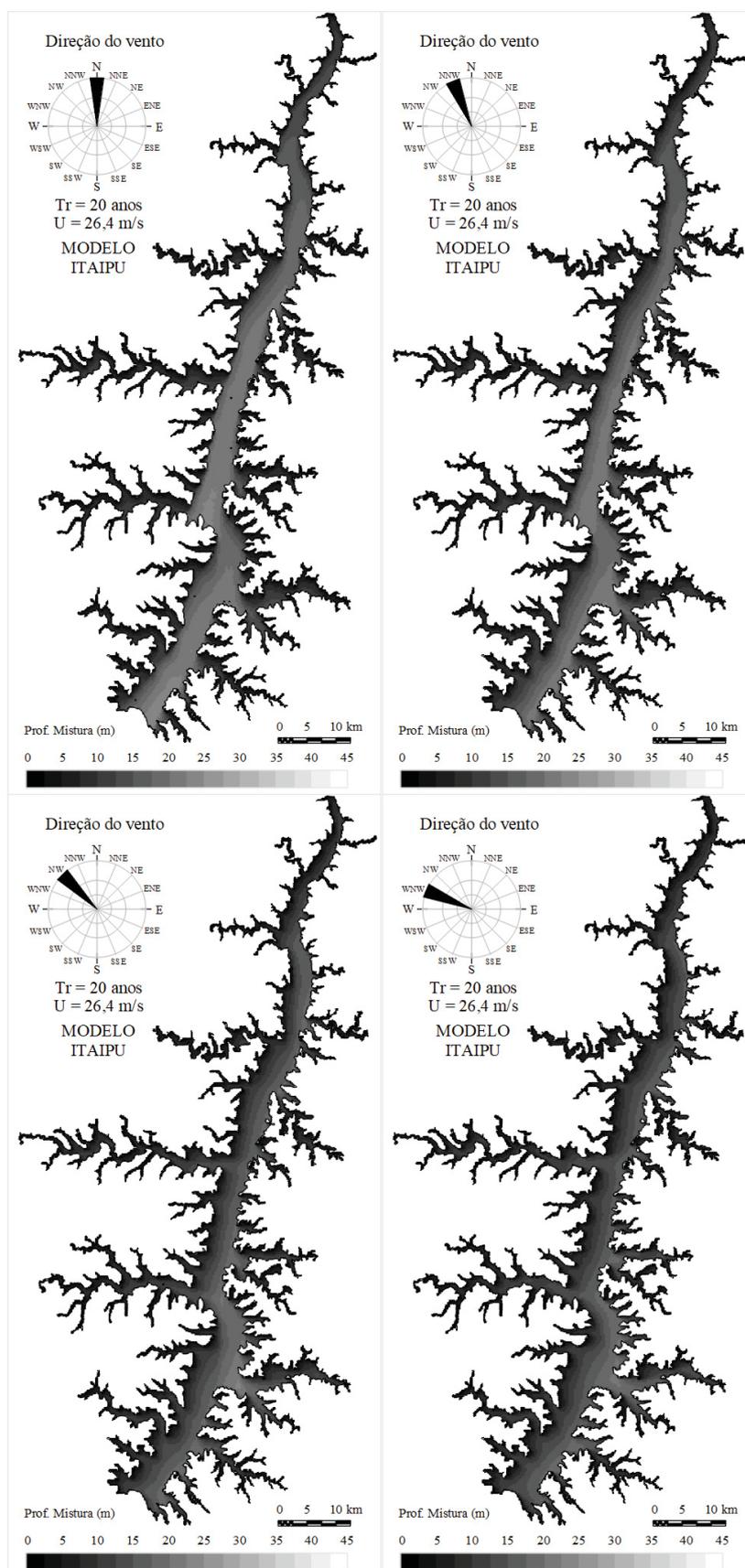
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 57 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 26,4 MS⁻¹ (TR=20 ANOS)



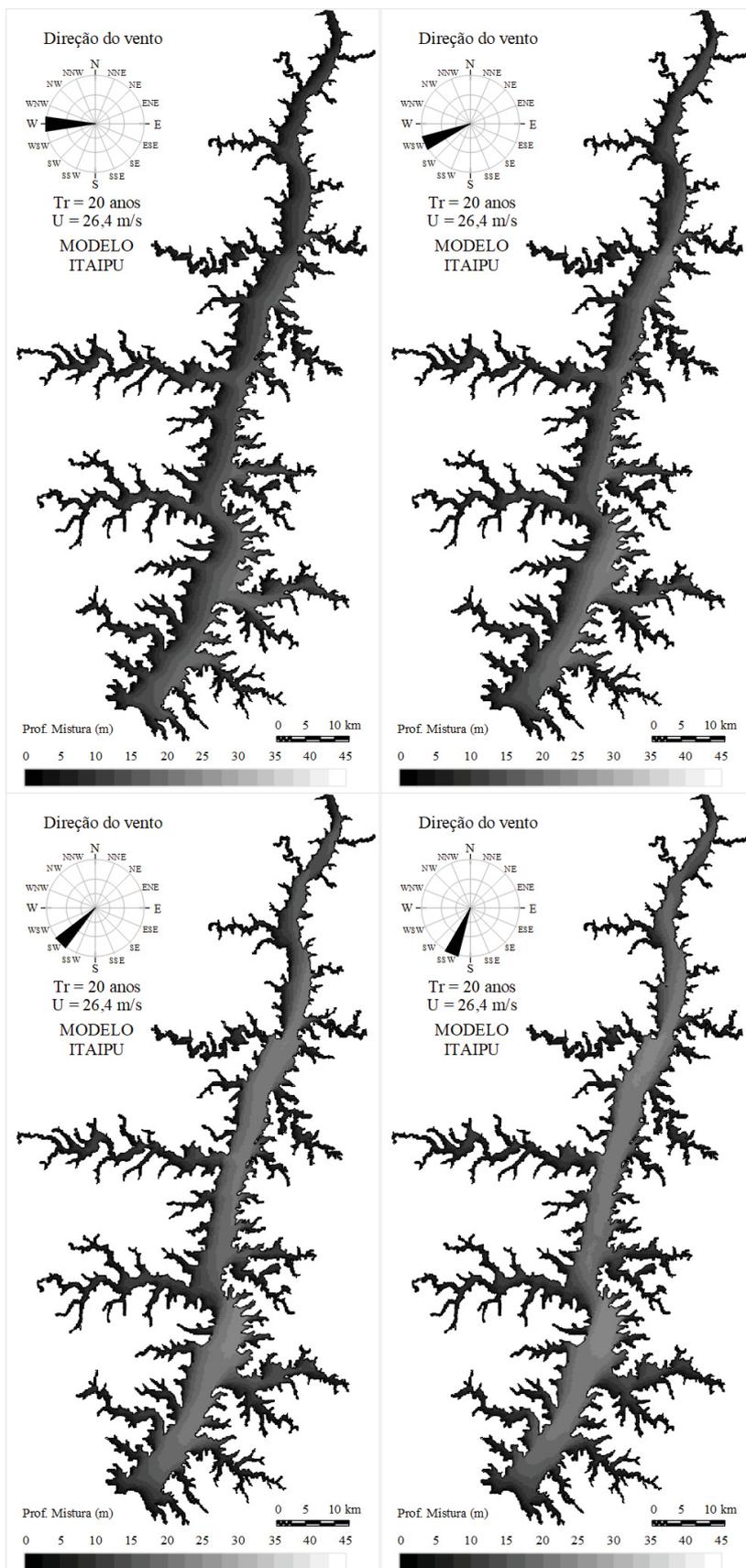
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 58 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW PRODUZIDAS POR VENTOS DE $26,4 \text{ MS}^{-1}$ (TR=20 ANOS)



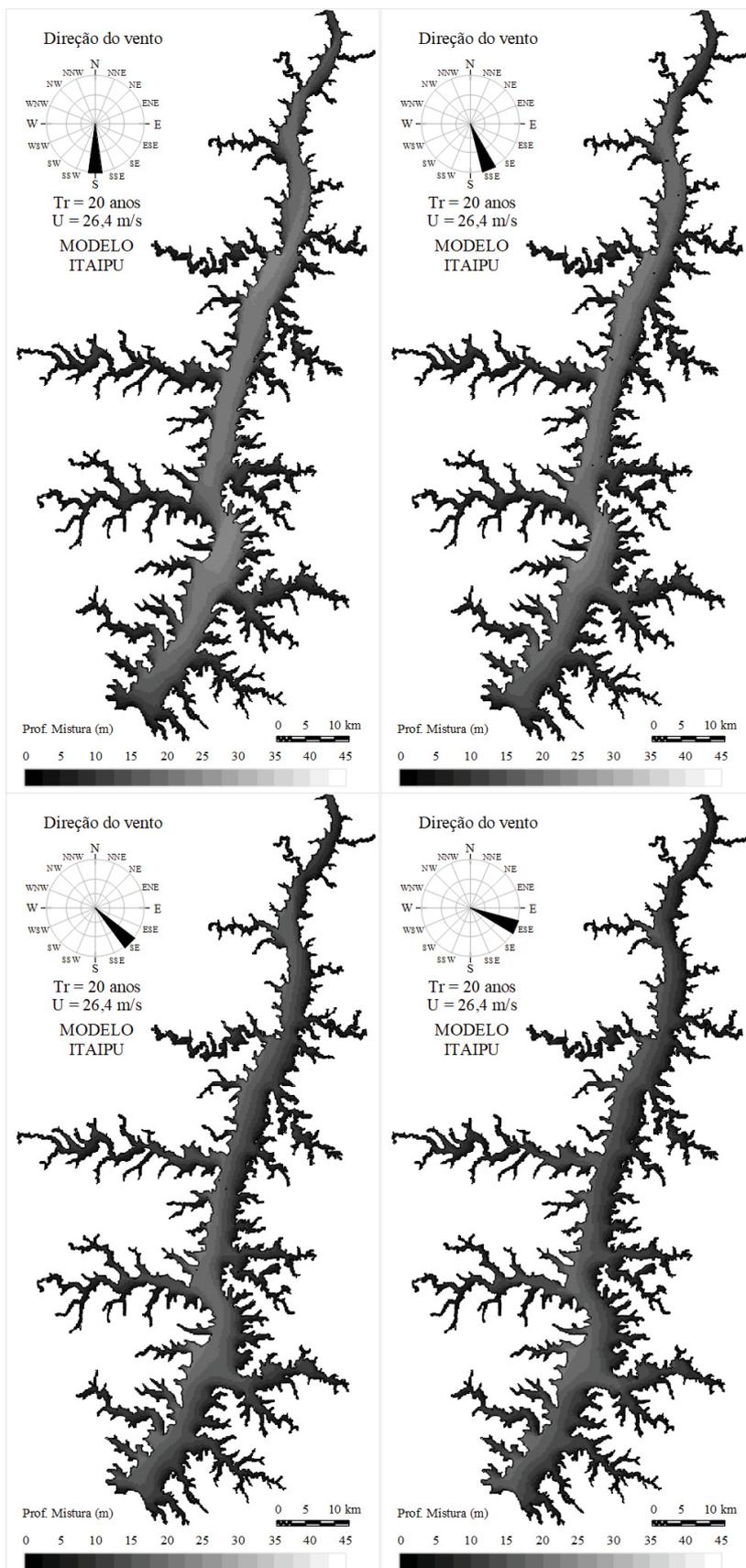
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 59 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW PRODUZIDAS POR VENTOS DE $26,4 \text{ MS}^{-1}$ (TR=20 ANOS)



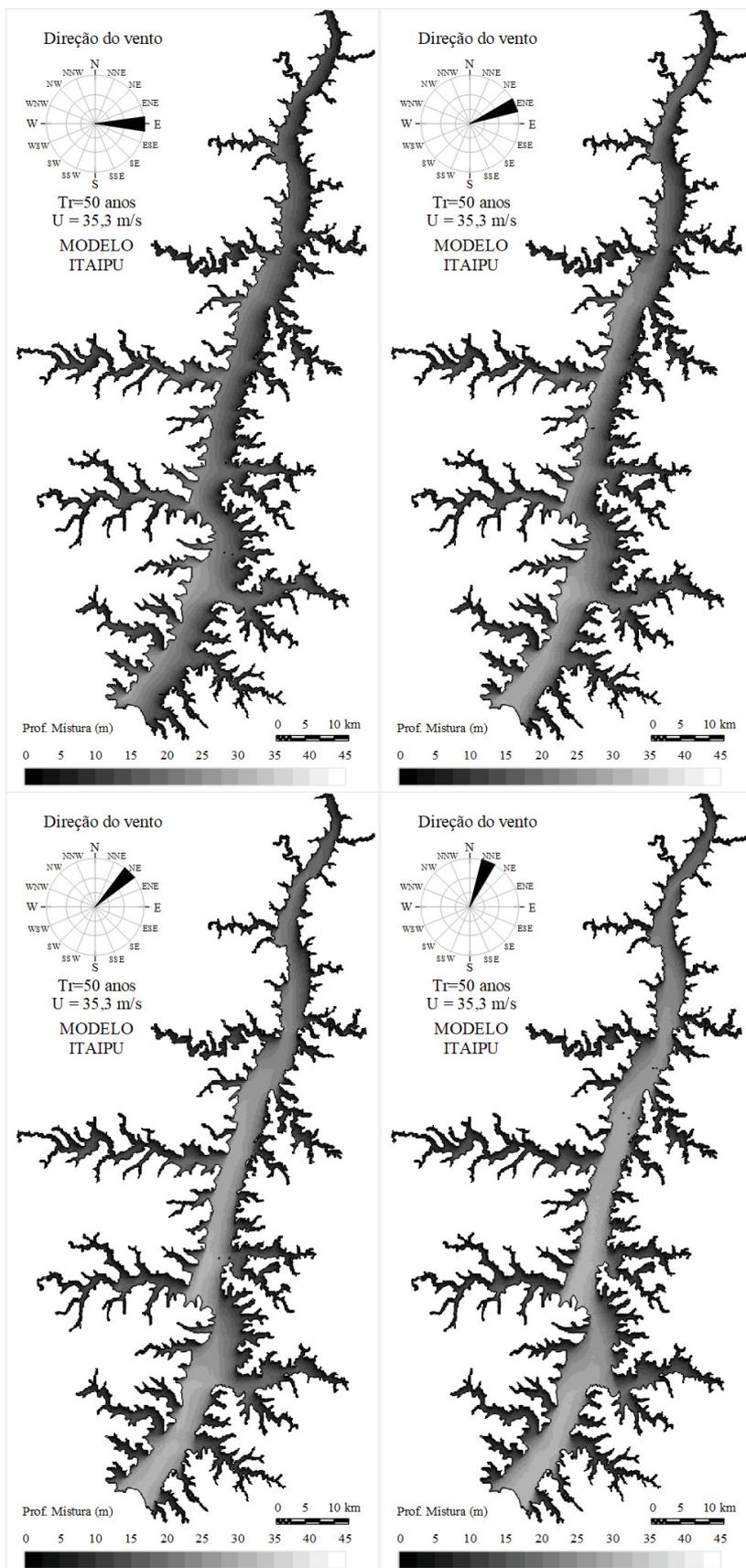
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 60 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 26,4 MS-1 (TR=20 ANOS)



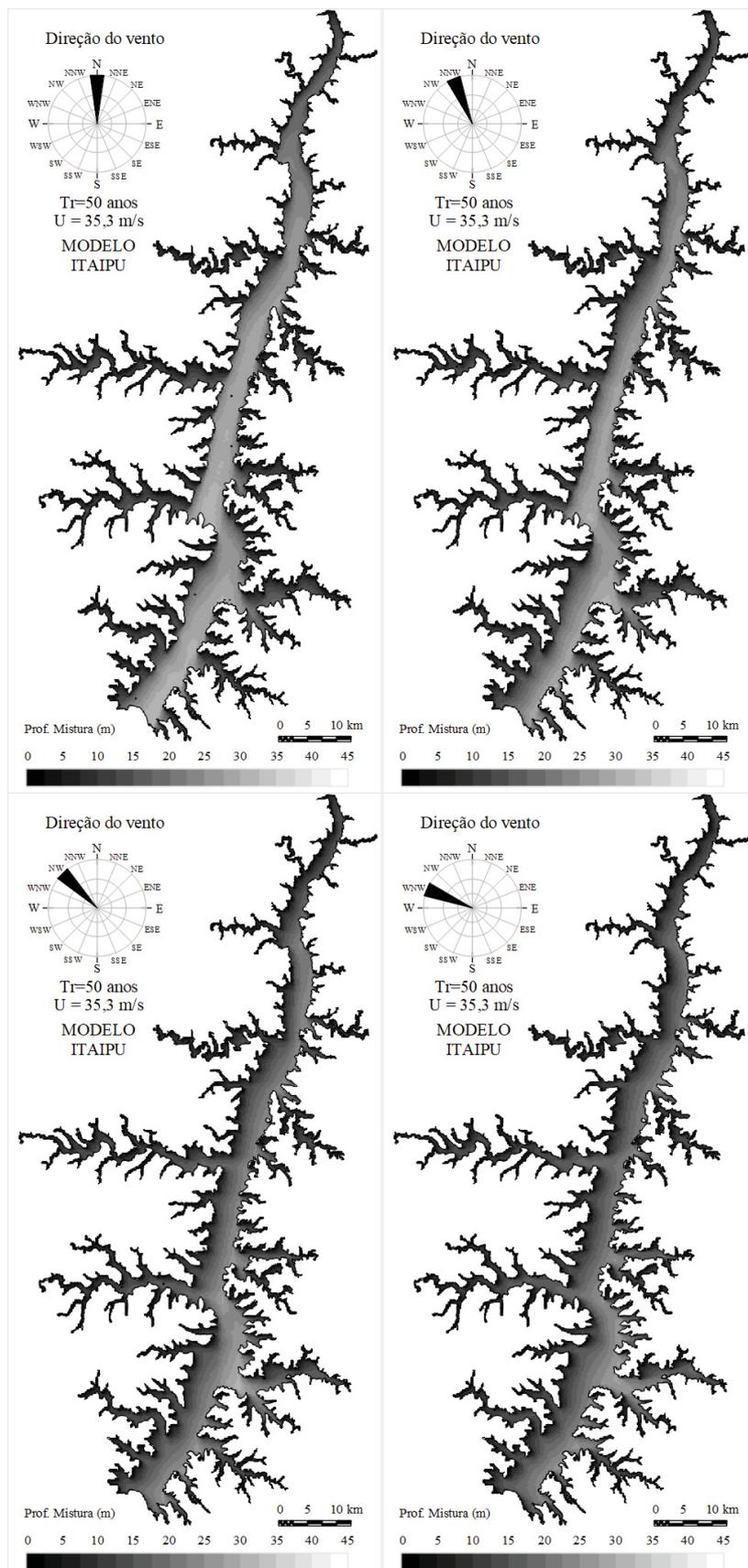
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 61 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 35,3 MS⁻¹ (TR=50 ANOS)



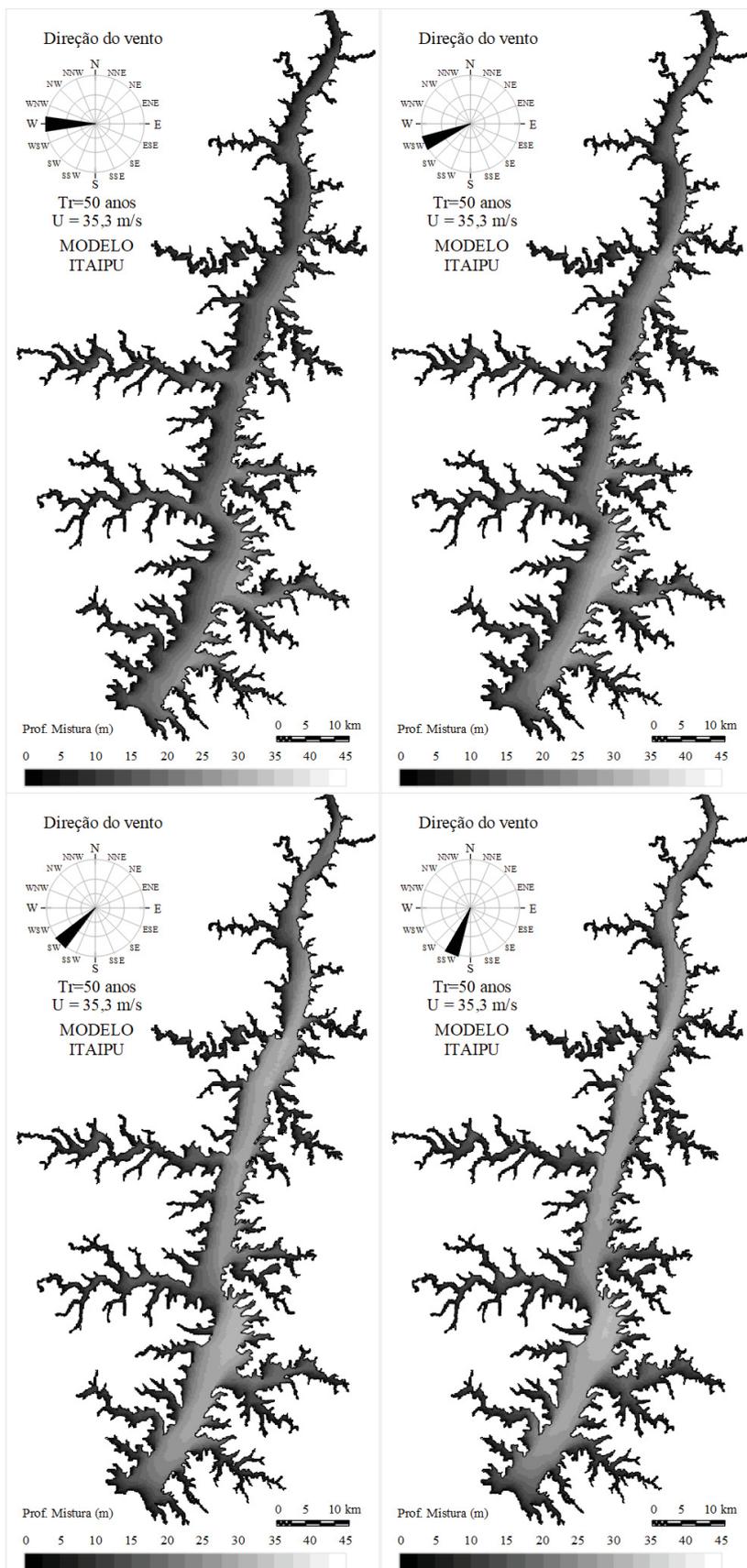
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 62 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW PRODUZIDAS POR VENTOS DE $35,3 \text{ MS}^{-1}$ (TR=50 ANOS)



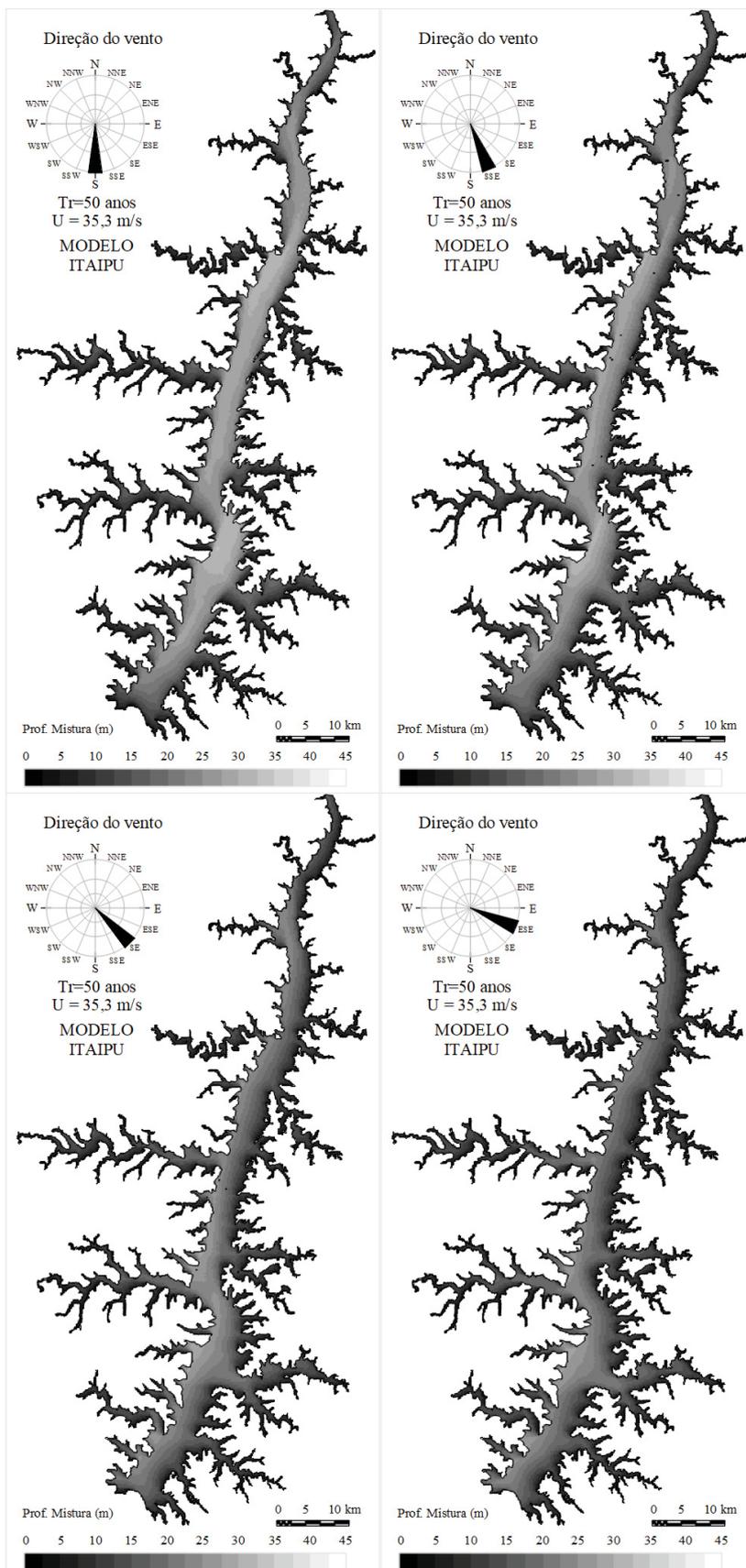
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 63 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW PRODUZIDAS POR VENTOS DE $35,3 \text{ MS}^{-1}$ (TR=50 ANOS)



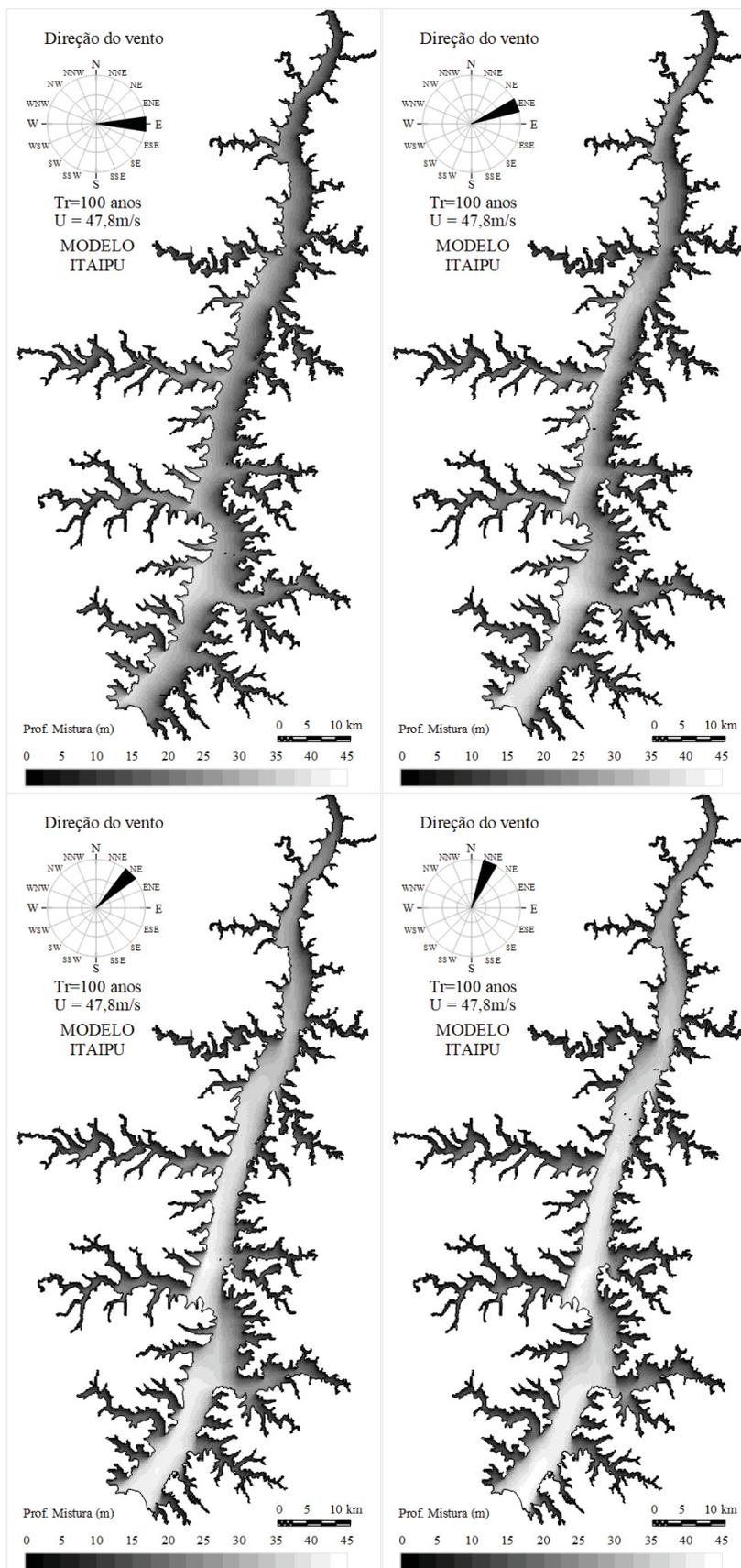
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 64 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE PRODUZIDAS POR VENTOS DE $35,3 \text{ MS}^{-1}$ (TR=50 ANOS)



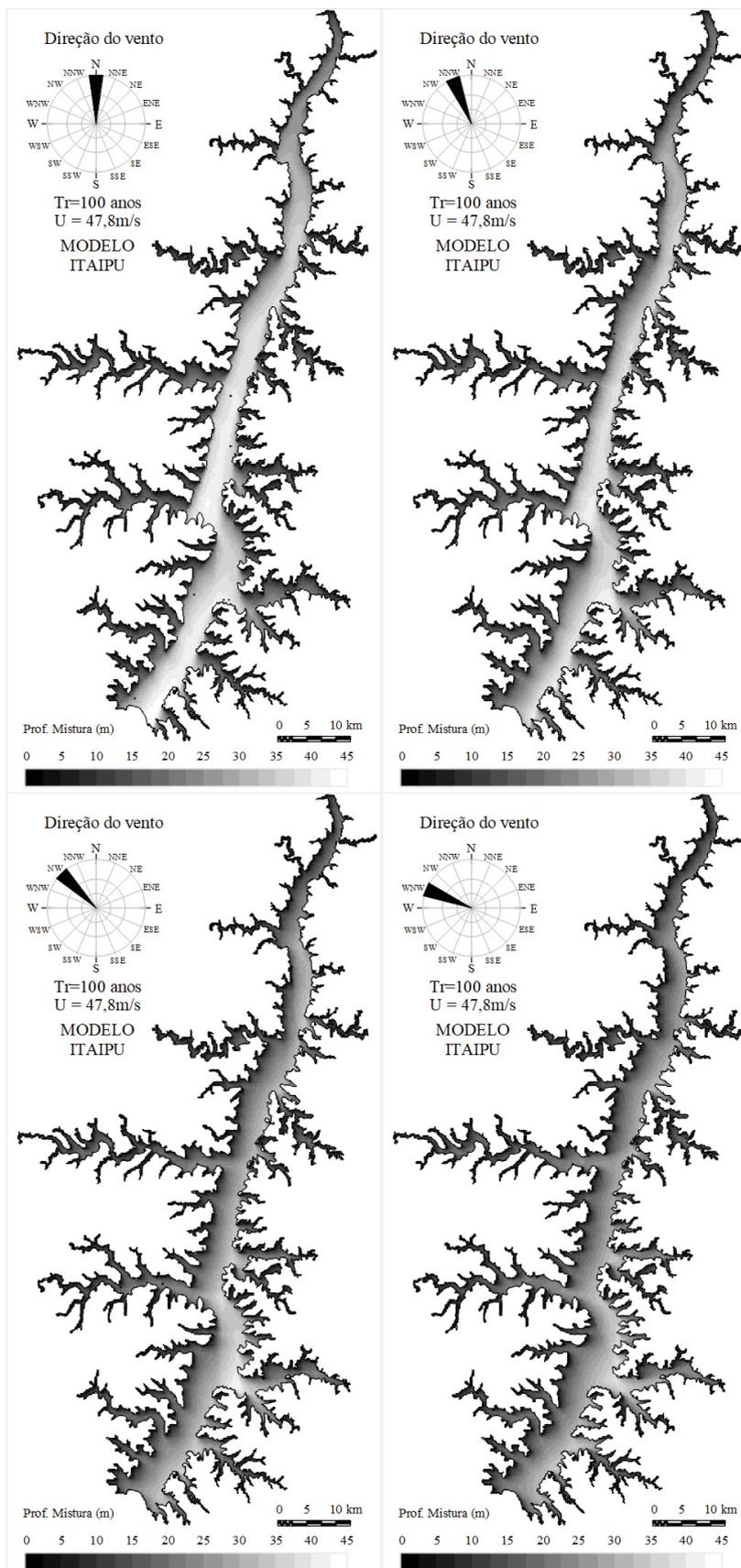
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 65 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES E, ENE, NE, NNE PRODUZIDAS POR VENTOS DE $47,8 \text{ MS}^{-1}$ (TR=100 ANOS)



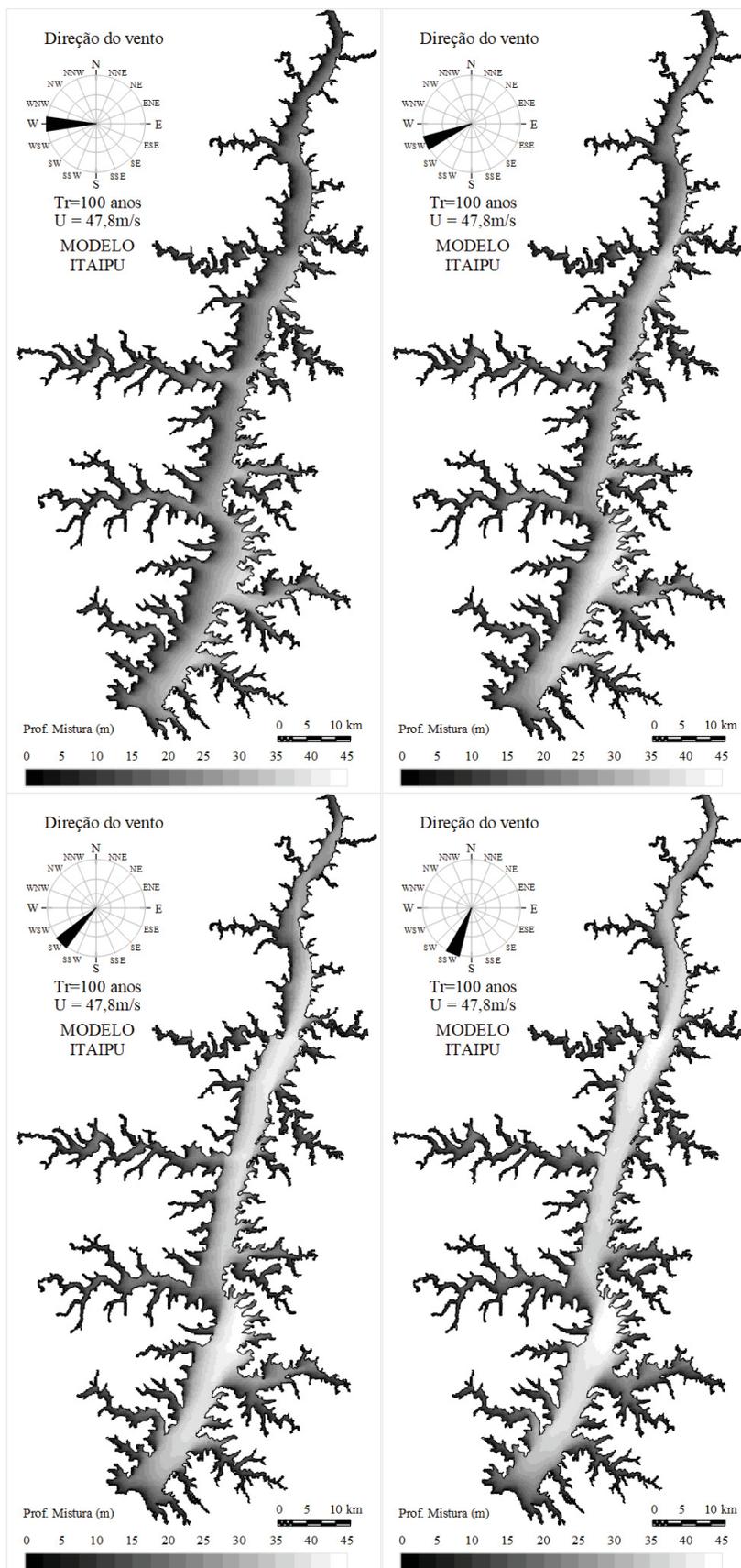
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 66 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES N, NNW, NW, WNW PRODUZIDAS POR VENTOS DE $47,8 \text{ MS}^{-1}$ (TR=100 ANOS)



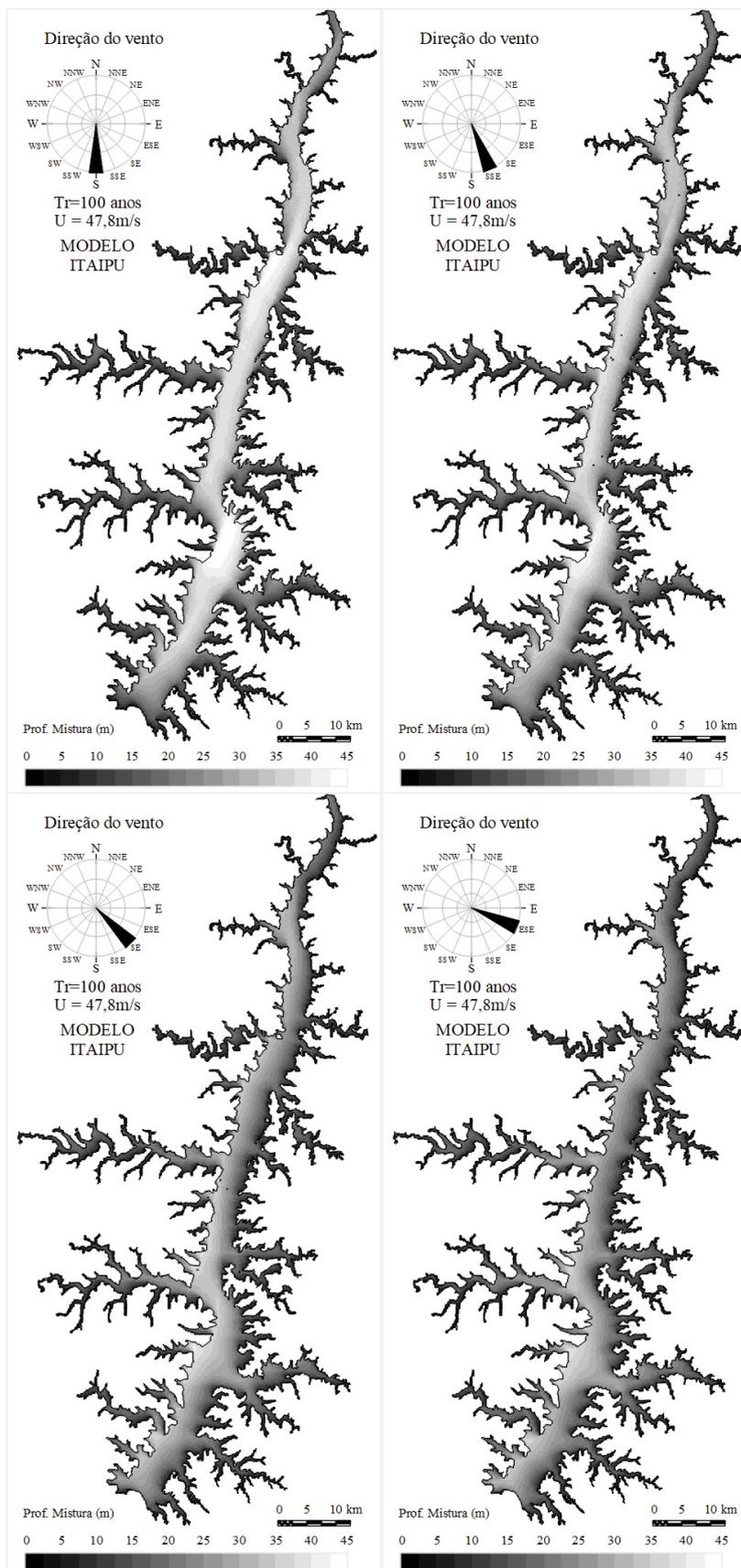
FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 67 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES W, WSW, SW, SSW PRODUZIDAS POR VENTOS DE 47,8 MS⁻¹ (TR=100 ANOS)



FONTE: O Autor (2022).

FIGURA 68 - MAPAS DE PROFUNDIDADES ATINGIDAS PELAS ONDAS PARA AS DIREÇÕES S, SSE, SE, ESE PRODUZIDAS POR VENTOS DE 47,8 MS⁻¹ (TR=100 ANOS)



FONTE: O Autor (2022).

A tabulação das maiores profundidades de mistura para cada condição de vento extremo e cada direção, é mostrada através da Tabela 9:

TABELA 9 - MAIORES PROFUNDIDADES DE MISTURA PARA CADA DIREÇÃO

| Direção | | E | ENE | NE | NNE | N | NNW | NW | WNW |
|-----------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fetch máx (km) | | 7,72 | 11,08 | 10,59 | 12,10 | 10,07 | 10,48 | 9,43 | 6,53 |
| PFM (m) | U=22,8 m/s | 16,35 | 19,42 | 19,00 | 20,24 | 18,56 | 18,91 | 17,99 | 15,10 |
| | U=26,4 m/s | 19,06 | 22,65 | 22,17 | 23,62 | 21,64 | 22,06 | 20,97 | 17,58 |
| | U=35,3 m/s | 25,74 | 30,66 | 29,99 | 31,98 | 29,27 | 29,84 | 28,36 | 23,73 |
| | U=47,8 m/s | 35,13 | 41,90 | 40,99 | 43,74 | 40,00 | 40,78 | 38,74 | 32,37 |

| Direção | | W | WSW | SW | SSW | S | SSE | SE | ESE |
|-----------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fetch máx (km) | | 6,97 | 10,80 | 10,38 | 12,02 | 11,71 | 10,97 | 10,16 | 7,03 |
| PFM (m) | U=22,8 m/s | 15,58 | 19,18 | 18,83 | 20,18 | 19,93 | 19,32 | 18,64 | 15,64 |
| | U=26,4 m/s | 18,14 | 22,38 | 21,96 | 23,55 | 23,25 | 22,54 | 21,73 | 18,22 |
| | U=35,3 m/s | 24,50 | 30,28 | 29,71 | 31,88 | 31,48 | 30,51 | 29,40 | 24,60 |
| | U=47,8 m/s | 33,42 | 41,39 | 40,59 | 43,60 | 43,05 | 41,70 | 40,17 | 33,56 |

FONTE: O Autor (2022).

O reservatório de Itaipu possui um volume aproximado de $29 \times 10^9 \text{ m}^3$ e uma superfície aproximada de $1,35 \times 10^9 \text{ m}^2$. Dividindo-se o volume pela superfície, chega-se a uma profundidade média de 21,48m. A profundidade máxima pode chegar a 170m próximo a barragem (ITAIPU BINACIONAL, 2022).

Considerando a profundidade média da ordem de 20m, pelos resultados obtidos constata-se que se trata de local em que pode ser incomum a ocorrência de ressuspensão de sedimentos do fundo na porção mais central do reservatório para ventos inferiores a 26 ms^{-1} .

Considerando que esta análise é uma contribuição inicial e tendo em vista que é possível realizar uma avaliação mais detalhada, pois a profundidade é determinada espacialmente pela distribuição batimétrica no reservatório, sugere-se uma análise mais cuidadosa do espaço através de pesquisas futuras que incluam uma comparação entre os campos de profundidade de mistura e a representação batimétrica do reservatório.

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do presente trabalho foi confirmada a capacidade de se determinar o campo de ondas gerado por ventos persistentes em águas continentais com base apenas na intensidade do vento atuante e na geometria do corpo d'água. Para alcançar esse objetivo, foi realizada uma investigação rigorosa no reservatório de Itaipu, validando os resultados por meio de análise comparativa promovidos pelo modelo SWAN.

O modelo ONDACAD se mostrou eficiente na implantação de diferentes equações paramétricas disponíveis na literatura e se demonstrou se constituir em ferramenta bastante útil na simulação de campos de *fetch*, ondas e profundidades de mistura.

Os modelos paramétricos disponíveis na literatura, se restringem a coeficientes constantes. Na obtenção do modelo ITAIPU, ao invés de considerar os coeficientes constantes, como adotado pelos modelos paramétricos de águas oceânicas, foi demonstrado que estes são condicionados pela intensidade do vento e, portanto, variáveis. Isto explica a variação entre os resultados de métodos paramétricos apresentados na literatura e colabora para a geração de campos de onda semelhantes aos gerados pelo modelo SWAN.

Quanto à etapa de validação, se conclui que existe uma relação inversa da intensidade do vento com o desvio entre as alturas máximas de onda geradas pelos modelos. De acordo com os mapas de desvio gerados, velocidades menores do vento provocam desvios maiores. Como consequência, esta relação inversa comprova o potencial da técnica MPB. Esta técnica, pelas características de rapidez de processamento e dependência de uma quantidade reduzida de variáveis, revela um potencial de aproveitamento na concepção de sistemas de simulação em tempo real tratando de grande número de corpos de água, como é o caso de Brasil, com mais de 20 mil corpos hídricos com mais de 20 hectares de superfície.

A grande quantidade de mapas gerados constitui dados de entrada para várias aplicações em áreas do conhecimento como Engenharia, Ciências da Terra, Ciências Costeiras e Ecologia. Essas informações são comumente obtidas por métodos simplificados, muito dependentes da subjetividade do analista. É de utilidade a essas áreas do conhecimento o acesso ao modelo paramétrico ITAIPU.

Com relação às alturas de ondas geradas por ventos extremos, cabe salientar que ventos com períodos de retorno tão altos quanto 100 anos podem parecer superdimensionados porque são eventos extremos e raros. A probabilidade de serem observados na prática depende do período de observação disponível e da disponibilidade de dados precisos e consistentes, sem falhas.

A conclusão deste trabalho é que, com base nas informações coletadas e na análise dos resultados, é possível determinar de modo confiável o campo de ondas gerado por ventos persistentes no reservatório de Itaipu com base exclusivamente na intensidade do vento atuante e a geometria do corpo d'água.

Em relação às pesquisas sobre as ondas geradas pelo vento em reservatórios, e considerando a importância da continuidade para o processo de pesquisa científica, são propostas sugestões para futuros trabalhos nesta área:

O presente estudo demonstrou que a investigação científica das equações paramétricas específicas para cada corpo de água é promissora e pode ter impacto em várias áreas do conhecimento devido ao seu caráter multidisciplinar.

Outros elementos quantificáveis relacionados às ondas se apresentam e podem ser representados por mapas a partir das informações sobre o vento em reservatórios. Estes incluem o período das ondas, frequência, potência, energia e tensão de fundo. Futuros trabalhos podem explorar as ondas estacionárias conhecidas como seiches, utilizando a técnica MPB.

Quanto à análise da distribuição espacial da profundidade de mistura, se conclui que esta análise é uma contribuição inicial, recomendando-se uma análise mais precisa do espaço através de estudos futuros que incluam uma comparação entre as profundidades de mistura e a representação batimétrica do reservatório, permitindo determinar a repercussão em fenômenos como a ressuspensão de sedimentos e a estratificação térmica.

O modelo ITAIPU pode ser utilizado para analisar o dimensionamento do bordo livre da barragem, tornando a técnica de grande utilidade na verificação da altura da onda relacionada a ventos severos no galgamento da estrutura.

Além disto, o modelo ITAIPU pode basear estudos envolvendo a quantificação da erosão gerada por ondas contra as margens; a locação de tanques-rede em reservatórios visando a piscicultura; a estimativa de emissão de gases de efeito estufa pelo desprendimento de sedimentos de fundo devido à perturbação

pela propagação de ondas, e escolha de locais de baixa ocorrência de ondas, visando a instalação de painéis solares flutuantes em reservatórios.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15906**: Informação e documentação - Sumário- Apresentação. Rio de Janeiro. 2021. 3 p.
- ALVES, J. H. G. M.; MELO, E. Measurement and Modeling of Wind Waves at the Northern Coast of Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v.49, p.13-28, 2001.
- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Review of slope protection methods. Comittee on Earth Dams of the Soil Mechanics and Foundations Division. **Proceedings**. v.74, n. 6, p.845-854, 1948
- ANDRADE F. O., GONÇALVES R. C., GUETTER, A. K. **Efeito do vento sobre o reservatório de Itaipu: cenários de vento e impacto no balanço hídrico**. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. João Pessoa/PB, Brasil, 2005.
- ARANTES, E. P. **Erosão em margem de reservatório: modelagem das ondas no trecho inferior da Usina Hidrelétrica Rosana (SP/PR)**. 2019. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Maringá, 2019.
- AYER, N.; TYEDMERS, P. Assessing alternative aquaculture technologies: life cycle assessment of salmonid culture systems in Canada. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 3, p. 362-373, 2009.
- BAATTRUP-PEDERSEN, A.; RIIS, T. Macrophyte diversity and composition in relation to substratum characteristics in regulated and unregulated Danish streams. **Freshwater Biology** v.42, p.375-385, 1999.
- BAILEY, R. C. Correlations between species richness and exposure: Freshwater molluscs and macrophytes. **Hydrobiologia** v.162, p.183-191, 1988.
- BARTON, J. R.; FLOYSAND, A. The political ecology of Chilean salmon aquaculture, 1982-2010: a trajectory from economic development to global sustainability. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 4, p. 739-752, 2010.
- BEVERIDGE, M. C. M. **Cage aquaculture**. Fishing News Books 3rd ed. Oxford: Blackwell Publishing, 368p. 2004

BOOIJ, N.; HOLTHUIJSEN, L. H.; RIS, E. R. C. **The SWAN wave model for shallow water**. Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, Orlando, p.668-676, 1996

BINI, L. M.; THOMAZ, S. M.; MURPHY, K. J.; CAMARGO, A. F. M. Aquatic macrophyte distribution in relation to water and sediment conditions in the Itaipu Reservoir, Brazil. **Hydrobiologia**, Dordrecht, v. 415, p. 147-154, 1999.

BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions, part I: model description and validation. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 104, n. C4, p. 7649-7666, 1999.

BRASIL. **Decreto-Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 21 set. 2010.

BRASIL. **Decreto-Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 01 out. 2010.

BRETSCHNEIDER, C. L. **Wave generation by wind, deep and shallow water**. In: A.T. Ippen (Editor), Estuary and Coastline Hydrodynamics. McGraw-Hill, New York, 744 pp. 1966.

BUBA, H.; ARAÚJO, A. N. **Impactos da qualidade da medição de níveis d'água na operação hidráulica de reservatórios**. In: XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Maceió/AL, Brasil, 2011.

BUGGELN, B.; JUDGE, D. **Determining necessary reservoir freeboard two methods of estimating wave runup and wind setup**. CDA Annual Conference – 2007. Canadian Dam Association. Canada.

CANDELLA, R. N. **Estudo de casos de ondas no Atlântico Sul através de modelagem numérica**. 1997. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

CARDONE, V. J.; ROSS, D. B. **Wave Prediction Methods and Data Requirements, Ocean Wave Climate**. Ed. M. D. Earle and A. Malahoff, Plenum Publishing Corp. 1979

CASTELÃO, R. M.; MOLLER J. O. O. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos. **Atlântica**, v. 25, n. 2, p. 91-106, 2003.

CHEN, S., TIAN, Y., JIN, L.; XIANG, L. Estimating the frequency of exposure to uncertain hazards: impact of wind conditions on concrete dam construction. **Journal of construction engineering and management**, v. 147, n. 2, p. 04020167, 2021.

COELHO, R. M. P.; GRECO, M.; ÁVILA, M.; RESCK, R. P. **Relatório de identificação de áreas tecnicamente adequadas para a instalação de parques aquícolas**. Reservatório de Furnas. Relatório de pesquisa. 2007a.

COELHO, R. M. P.; GRECO, M.; ÁVILA, M.; RESCK, R. P. **Relatório de identificação de áreas tecnicamente adequadas para a instalação de parques aquícolas**. Reservatório de Três Marias. Relatório de pesquisa. 2007b.

CUCHIARA, D. F.; E. H. STRAUCH, J. C.; CALLIARI, L. J. **Modelagem numérica do comportamento das ondas na Costa Do Rio Grande Do Sul**. In: Seminário E Workshop Em Engenharia Oceânica, II. Rio Grande, 2006.

DELFT3D-FLOW. **Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, Delft3D-FLOW user Manual, versão 4.5**. 2022. Disponível em: https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf. Acesso em: 11 ago. 2022

DELGADO-FERNANDEZ, I. A review of the application of the fetch effect to modelling sand supply to coastal foredunes. **Aeolian Research**, v. 2, n. 2, p. 61-70, 2010.

DONELAN, M. A.; W. H. HUI. Directional spectra of wind generated waves. **Phil. Trans. Royal Soc.**, A315, p.509–562. 1985.

DOYLE, R. D. Effects of waves on the early growth of *Vallisneria americana*. **Freshwater Biology**, Oxford, v. 46, n. 3, p. 389-397, 2001.

EARLE, M. D. **Practical determinations of design wave conditions**. Ocean Wave Climate, M. D. Earle and A. Malahoff, Eds., Plenum Press, p.39–60, 1979

EKEBOM, J.; LAIHONEN, P.; SUOMINEN, T. A GIS-based step-wise procedure for assessing physical exposure in fragmented archipelagoes. **Estuarine, coastal and shelf science**, v.57, n.5, p.887-898, 2003

EPE. **Empresa de Pesquisa Energética**. Nota Técnica EPE/DEA/SMA 012/2022. Emissão de gases de efeito estufa em reservatórios hidrelétricos. Brasília-DF. 2022.

FALVEY, H. T. Prediction of wind wave heights, Proc. ASCE J. Waterways, **Harbors and Coastal Eng. Div.**, v.100, p.1-12, 1974.

FELISBERTO S. A.; RODRIGUES L. Periphytic community of reservoirs cascade in the Paranapanema river, Brazil. **Acta Scientiarum Biological Sciences**, v.27, p.215-223, 2005.

FENDRICH, R. Formação de Ondas e Identificação de Pontos Erodíveis na Margem Esquerda do reservatório de Itaipu. Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia – Caderno de Recursos Hídricos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v.6, n.2, p.7-21, 1988.

FENDRICH, R. **Ondas em Reservatórios**. 1993. Dissertação (Professor Titular). Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba. 1993.

FERNANDEZ, O. V. **Mudanças no canal fluvial do rio Paraná e processos de erosão nas margens: região de Porto Rico, PR**. 1990. Dissertação (Mestrado em Geociência). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1990.

FERNANDEZ, I. D. **A review of the application of the Fetch effect to modelling sand supply to coastal foredunes**. Department of Geography. University of Guelph. Guelph, Ont. Canada, 2010.

FERREIRA, A. N. **Estudo do efeito de acidentes na Hidrovia Tietê-Paraná: aspectos preventivos**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000

FORMAN, S. **The raft fishermen: tradition & change in the Brazilian peasant economy**. Indiana:Indiana University Press. 1970

FRANKIC, A.; HERSHNER, C. Sustainable aquaculture: developing the promise of aquaculture. **Aquaculture International**, v.11, n.6, p.517-530, 2003.

GONÇALVES, R. C. **Análise de frequência regional de ventos extremos no Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR, 2007.

GORHAM, E.; BOYCE, F. M. Influence of Lake Surface Area and Depth Upon Thermal Stratification and the Depth of the Summer Thermocline. **Journal of Great Lakes Research**, v.15, n.2, p.233-245, 1989.

GUETTER, A. K.; ANDRADE, F. O.; GONÇALVES, R. C. **Efeito do vento sobre o reservatório de Itaipu: cenários de vento e impacto no balanço hídrico**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa – PB, 2005.

HALES, J.; PETRY, P. **Freshwater ecoregions of the world [online]**. TNC & WWF. 2019. Disponível em: <https://www.feow.org/ecoregions/details/344>. Acesso em: 01 jun. 2022.

HASSELMANN, D. E.; DUNCKEL, M.; EWING, J. A. Directional wave spectra observed during JONSWAP (1973). *J. Phys. Oceanography*, v.10, p.1264-1280, 1980.

HASSELMANN, K.; ROSS, D. B.; MÜLLER, P.; SELL, W. A parametric wave prediction model. *J. Phys. Oceanography*, v.6, n.2, p.200–228, 1976.

HASSELMANN, K.; BARNETT, T. P.; BOUWS, E.; CARLSON, H.; CARTWRIGHT, D. E.; ENKE, K.; EWING, J. A.; GIENAPP, H.; HASSELMANN, D. E.; KRUSEMAN, P.; MEERBURG, A.; MULLER, P.; OLBERS, D. J.; RICHTER, K.; SELL, W.; WALDEN, H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deut. Hydrography. Z.*, v.A8, n.12, 1973.

HOLTHUIJSEN, L. H. **SWAN - User manual**. Department of Civil Engineering. Delft University of Technology, Delft, USA. 124pp. 2007

HUANG, C.; LEE, T. Hydrological impact of typhoon on rivers. **Water**, v. 13, n. 8, p. 1009, 2021.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). **Previsão Oceânica**. Disponível em: <http://ondas.cptec.inpe.br>. Acesso em: 11 ago. 2022.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Avançada. **Desafios do desenvolvimento**. Disponível em: http://desafios.ipea.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2328:catid=28&Itemid=. Acesso em: 11 ago. 2022.

ITAIPU BINACIONAL. **Dados técnicos**. Energia/geração. 2022. Disponível em: <http://https://www.itaipu.gov.br/energia/geracao>. Acesso em: 08 jul. 2022.

ITAIPU BINACIONAL. **Dados técnicos**. Hidrologia/bacia do rio Paraná. 2022. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/energia/rio-parana>. Acesso em: 08 jul. 2022.

ITAIPU BINACIONAL. **Usina Hidrelétrica de Itaipu**. Turismo. Principais dados técnicos. 2022. Disponível em: <https://www.turismoitaipu.com.br/pt/dados-tecnicos>. Acesso em: 08 jul. 2022.

KAMPHUIS, J. W. **Introduction to Coastal Engineering and Management**. World Scientific Press, 437p. 2000.

KINSMAN, B. **Wind Waves: Their Generation and Propagation on the Ocean Surface**. Prentice Hall, Inc., 676p. 1965.

KOMEN, G. J., HASSELMANN S., HASSELMANN K. On the existence of a fully developed wind sea spectrum, J. Phys. **Oceanography**, v.14, p.1271-1285, 1984.

LIMA, S. F.; NASCIMENTO, M. F.; UAISSONE, A. J. R.; NEVES, C. F. **Estimativa das maiores ondas geradas pelo vento no reservatório de Ilha Solteira**. X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1, pp. 1-19. 2003.

LUCHETTI, M. R.; DIETER, J. **O conceito de campo de Fetch aplicado ao reservatório da UHE de Itaipu**. Brazilian Journal of Development, v.9, n.3, p.12087-12099, 2023.

MANNICH, M. **Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios e Lagos** - Contribuições para o Monitoramento e Modelagem 1D-Vertical. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2013.

MARQUES, M. **Sistema automatizado para estimativa de ondas geradas por ventos em reservatórios de barragens**. 2005. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2005.

MARQUES, M. GUETTER, A. K. **Determinação da distribuição do Fetch no reservatório de Itaipu**. In: XIX Simpósio de Recursos Hídricos. Maceió/AL, Brasil, 2011.

MARQUES, M.; MACIEL, G. F.; DALLAGLIO SOBRINHO, M. Estimativa das máximas pistas de vento no reservatório da barragem de Ilha Solteira, Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Technology**, v.29, n.1, p.79-84, 2007.

MARQUES, M.; SOARES, M. S.; SANTOS, I.; ARANTES; E. P.; OKAWA, C. M. P. Análise entre métodos de determinação de fetch aplicados ao reservatório de Capivari-Cachoeira. **Revista Geonorte**, 4 Ed. v.10, n.1, p.136-140, 2014.

MARQUES, M. **Modelagem paramétrica bidimensional para simulação do campo de ondas em águas continentais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MARQUES, M. **Fetch em lagos e reservatórios** [livro eletrônico]. Bookerfield. São Paulo-SP. 2021.

MASSEL, S. R. **Ocean surface waves: their physics and prediction**. Singapore: World Scientific, 1996.

MATTOSINHO, G. O. **Dissipação de energia de ondas geradas por ventos em reservatórios de barragens, devido à presença de vegetação**. Dissertação (Mestrado em Ciências Térmicas). UNESP, Ilha Solteira, 2016.

MEIRELLES, S. **Avaliação da modelagem de ondas superficiais de gravidade quanto ao fenômeno de difração**. 2007. Monografia (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Geociências da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007.

MITSUYASU, H.; HONDA, M. T. Wind induced-growth of water waves. **J. Fluid Mech.**, v.123, p.425-442, 1982.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**. 2. ed. [rev. e ampl.] São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2006. 538 p.

NICOLODI, J. L. **O padrão de ondas no Lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação**. 2007. 179 f. Tese (Doutorado em Geociências). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

NOGUEIRA, I. C. M. **Caracterização sazonal de ondas na região adjacente ao porto de Ubu, Anchieta-ES, para o ano de 2008**. 2010. Tese (Doutorado em Oceanografia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

NOGUEIRA M. G.; JORCIN A. **Contaminação dos sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Paranapanema (SE, Brasil) por pesticidas sintéticos e metais e sua relação com os processos de eutrofização**. In: Eutrofização na América do Sul: Causas, Consequências e Tecnologias Para Gerenciamento e Controle (ed. by J.G. Tundisi, T. Matsumura-Tundisi; C.S. Galli), pp. 103– 118. IIE/DMD Propaganda e Marketing, São Carlos, Brazil. 2006

NORDSTROM, K. F.; JACKSON, N. L. Physical processes and landforms on beaches in short fetch environments in estuaries, small lakes and reservoirs: A review. **Earth-Science Reviews**, v.111, n.1, p.232-247, 2012.

NOVAK, P.; MOFFAT, A. I. B.; NALLURI, C.; NARAYANAN, R. **Hydraulics Structures**. New York: Taylor and Francis, 696p. 2007.

OCHI, M. K. **Ocean waves: the stochastic approach**. Cambridge, UK: New York: 1998. xii, 319 p. 1998.

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). **Guía para el análisis y pronóstico de las olas**. n. 702, Ginebra, Suiza, 1998. 170 p.

PADOVEZI, C. D. **Conceito de Embarcações Adaptadas à Via Aplicado à Navegação Fluvial no Brasil**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PAVANELLI, G. C.; EIRAS, J. C.; TAKEMOTO, R. M. **Doenças de peixes profilaxia, diagnóstico e tratamento**. Maringá: Eduem. 311 p. 2008.

PBMC. **Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas**. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação

Nacional sobre Mudanças Climáticas. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 414 pp. 2014.

PELLEGATTI, D. M. F. **Um modelo de previsão de ondas de superfície do mar geradas pelo vento**. 1993. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), INPE, São José dos Campos, 1993.

PIERINI, S. A. **Fatores determinantes da distribuição de plantas submersas e da estrutura das assembleias de macrófitas aquáticas no Reservatório de Rosana**. Tese (Doutorado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) - Programa de Pós-Graduação em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais. Maringá: Universidade Estadual de Maringá. 2005.

PIERSON, W. J.; MOSKOWITZ, L. A Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of A. Kitaigorodskii. **Journal of Geophysical Research**, v.69, n.2, p.5181-5203, 1964.

REA, T. E.; KARAPATAKIS, D. J.; GUY, K. K.; PINDER III, J. E.; MACKEY J., H. E. The relative effects of water depth, fetch and other physical factors on the development of macrophytes in a small southeastern US pond. **Aquatic Botany** v.61, p.289-299, 1998.

RIIS, T.; HAWES, I. Effect of wave exposure on vegetation abundance, richness and depth distribution of shallow water plants in a new Zealand Lake. **Freshwater Biology** v.48, p.7-87, 2003.

ROQUE, C. G.; OLIVEIRA, I. C.; FIGUEIREDO, P. P.; BRUM, E. V. P.; CAMARGO, M. F. Georreferenciamento. **Revista de Ciências Agro-Ambientais, Alta Floresta**, v. 4, n.1, p. 87-102, 2006.

SAVILLE, T. **Wind Setup and Waves in Shallow Water**. TM-27, U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Washington, D.C., 1952.

SAVILLE, T. **The effect of fetch width on wave generation**. Technical Memorandum No. 70, U.S. Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 1954. 9p.

SAVILLE, T.; MCCLENDON, E. W.; COCHRAN, A. L. Freeboard allowances for waves in inland reservoirs. **ASCE Journal of the Waterways and Harbors Division**, v. 88, n.WW2, p.93-124, 1962

SILVA, A. S.; MARQUES, M.; ANDRADE, F. O.; ARANTES, E. P. **Comparação entre os modelos MARQUES e JONSWAP na simulação de altura de ondas no reservatório de Lajeado, Tocantins**. In: XVI Congresso Brasileiro de Limnologia, 2017, Rio de Janeiro. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Limnologia, 2017.

SILVA, F. A. R. **Modelagem paramétrica para simulação dos campos de fetch e ondas: estudo de caso dos reservatórios de salto Caxias e Itaipu**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná), Curitiba, 2017.

SILVEIRA, F. L.; VARRIALE, M. C. Propagação das ondas marítimas e dos tsunamis. **Caderno brasileiro de ensino de física**. Florianópolis. v.22, n.2, p. 190-208, 2005. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/85066>. Acesso em: 27 out. 2016.

SIMONS, T. J. **Circulation models of lakes and inland seas**. Ottawa: Department of Fisheries and Oceans of the Government of Canada, 1980.

SMITH, J. M. **Wind-wave generation on restricted Fetches**. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Misc. Paper CERC-91-2-1646. 1991.

SOEMARWOTO, O.; ROEM, C. M.; HERAWATI, T.; COSTA-PIERCE, B. A. C. **Water quality suitability of Saguling and Cirata reservoirs for development of floating net cage aquaculture**. In: Reservoir Fisheries and Aquaculture Development for Resettlement in Indonesia (Costa-Pierce, B.A. and O. Soemarwoto, eds.): 18–111. ICLARM Tech. Rep. 23. ICLARM, Manila. 1990.

SOLERA, M. L. **Avaliação de Técnicas da Bioengenharia de solos para proteção de taludes: estudo de caso para aplicação nas encostas do reservatório da barragem da UHE Engo Sergio Motta, Rio Paraná, SP/MS**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Instituto de pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2010.

SORENSEN, R. M. **Basic coastal engineering**. 3rd ed. New York, N.Y.: Springer, 2006. xii, 324 p.

- SOUZA, D. C. **Padrões de diversidade α e β da assembléia de macrófitas aquáticas em diferentes escalas espaciais no reservatório de Itaipu**. 2000. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) – Departamento de Biologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá. 2000.
- SVERDRUP, H.U.; MUNK, W.H. (1947). **Wind, sea and swell: Theory of relations for forecasting**. Publication 601, Hydrographic Office, U.S. Navy, 50p.
- THOMAZ, S. M.; BINI, L. M. **Ecologia e Manejo de Macrófitas Aquáticas**. EDUEM, Maringá, 2003.
- TOLMAN, H. L.; CHALIKOV, D. Source Terms in a Third-Generation Wind Wave Model. **Journal of Physical Oceanography**. Boston, v.26, p.2497-2518, 1996.
- TOLMAN, H. L.; BALASUBRAMANIYAN, B.; BURROUGHS, L. D.; CHALIKOV; D. V.; CHAO, Y. Y.; CHEN, H. S.; GERALD; V. M. **Development and Implementation of Wind-Generated Ocean Surface Wave Models at NCEP***. NCEP notes: Weather and Forecasting. v. 17, 2002.
- U. S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. **Shore Protection Manual**. 3. ed. Washington, DC, 1984. v. 1. 337 p.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR – BUREAU OF RECLAMATION. **Design of small dams**. A water resources technical publication 2. ed. Rev. Washington. 1973.
- VAN DEN BERG, M. S.; JOOSSE, W.; COOPS, H. A statistical model predicting the occurrence and dynamics of submerged macrophytes in shallow lakes in the Netherlands. **Hydrobiologia** v.506-509, p.611-623, 2003.
- VERGARA, S. C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 1998.
- VIEIRA, A. S. **Análises, Aplicações e Validações** – Numérico/Experimentais do Modelo SWAN em Áreas Restritas e ao Largo. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2013.
- WEISNER, S. E. B.; STRAND, J. A.; SANDSTEN, H. Mechanisms regulating abundance of submerged vegetation in shallow eutrophic lakes. **Oecologia** v.109, p.592-599, 1997.

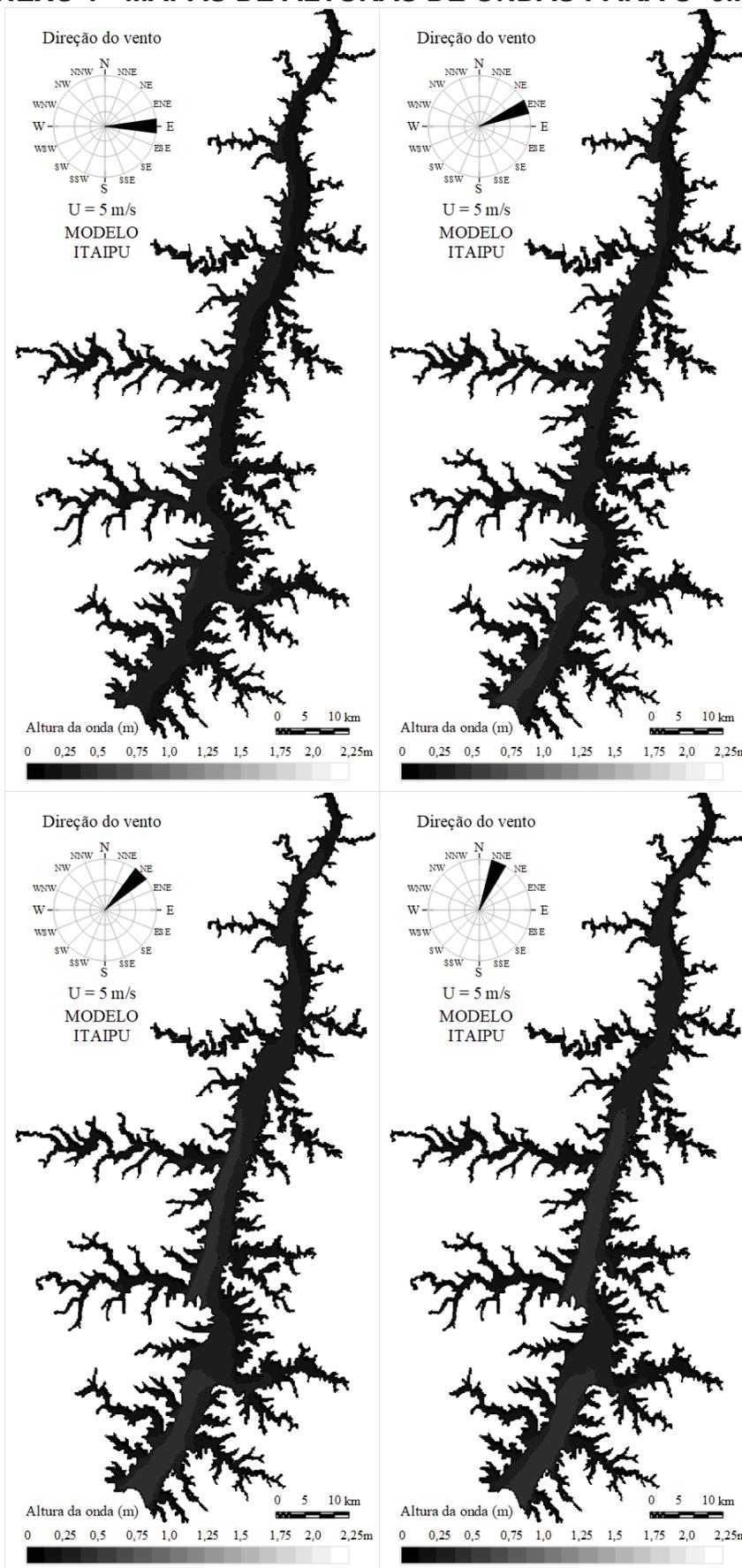
WIEGEL, R. L.; NODA, E. K.; KUBA, E. M.; GEE, D. M.; TORNBERG, G. F. Water waves generated by landslides in reservoir, **J. of the Waterways and Harb. Div., Proc. of the Am. Soc. of Civ. Eng.** v.96, n.WW2, p.307–333, 1970.

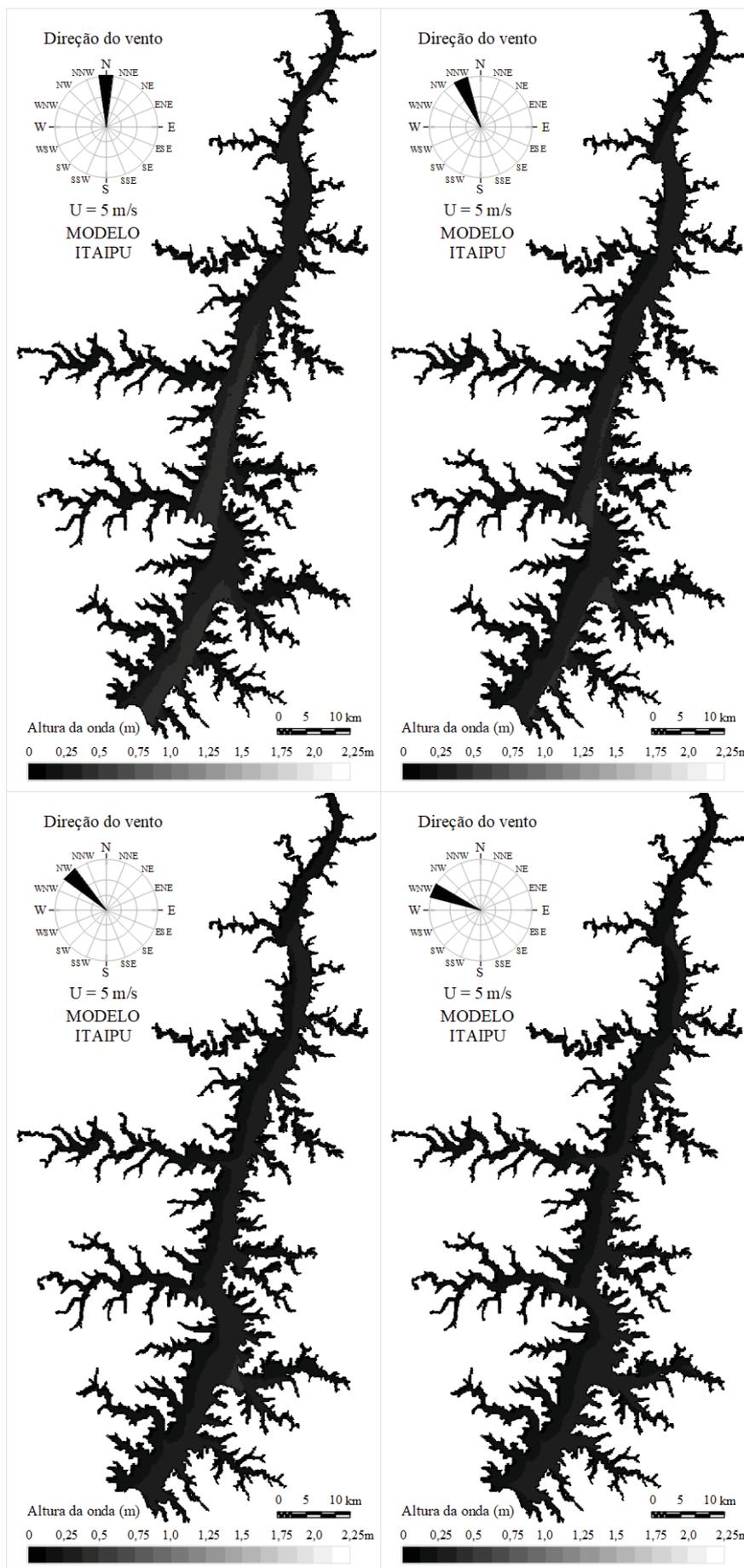
WILSON, B. W. **Deep water wave generations by moving wind systems.** J. Waterways, Harbours and Coastal Engng. Division, ASCE, WW2, p.113-141, 1961.

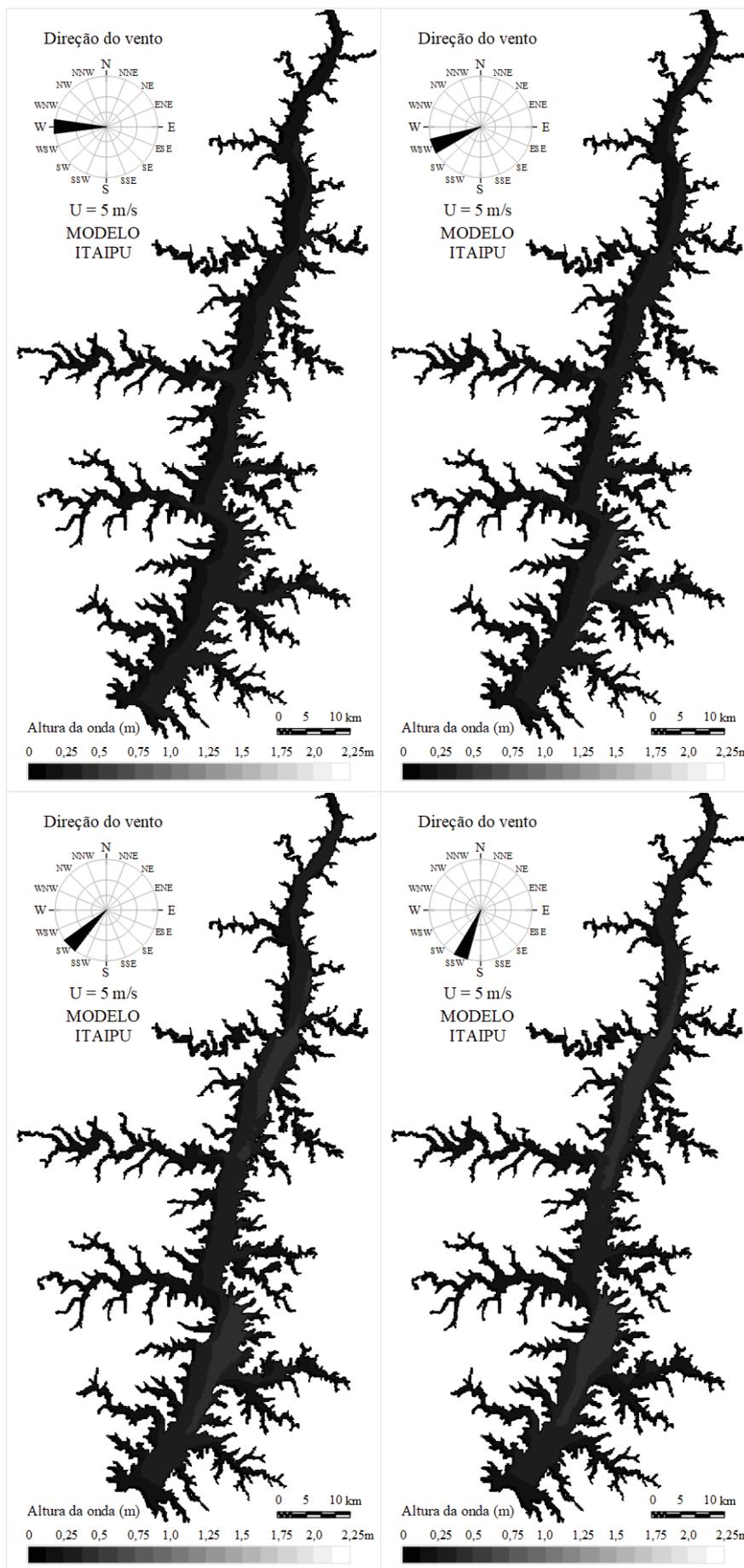
ZANELLA, J. R. D. **Erosão laminar e transporte de sedimentos na bacia do Rio Marrecas, no Sudoeste do Paraná.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental: Análise e Tecnologia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2021.

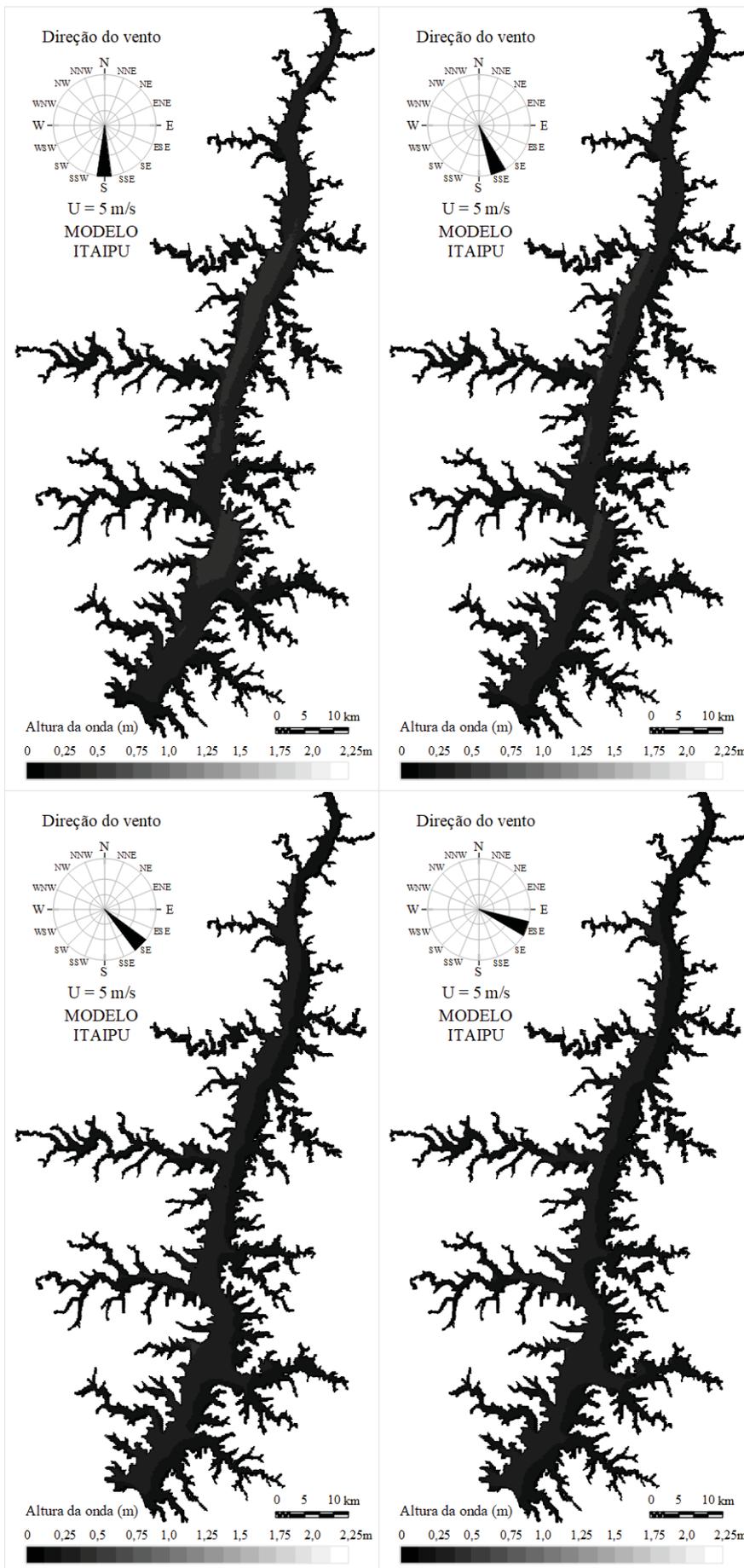
ZORAN, M.; MILSTEIN, A.; KRAMBECK, H. J. Limnological aspects of dual-purpose reservoirs for irrigation and fish culture in the coastal area of the Jordan Valley. **Isr. J. Aquacult.** v.46, p.64–75, 1994.

ANEXO 1 - MAPAS DE ALTURAS DE ONDAS PARA U=5MS⁻¹

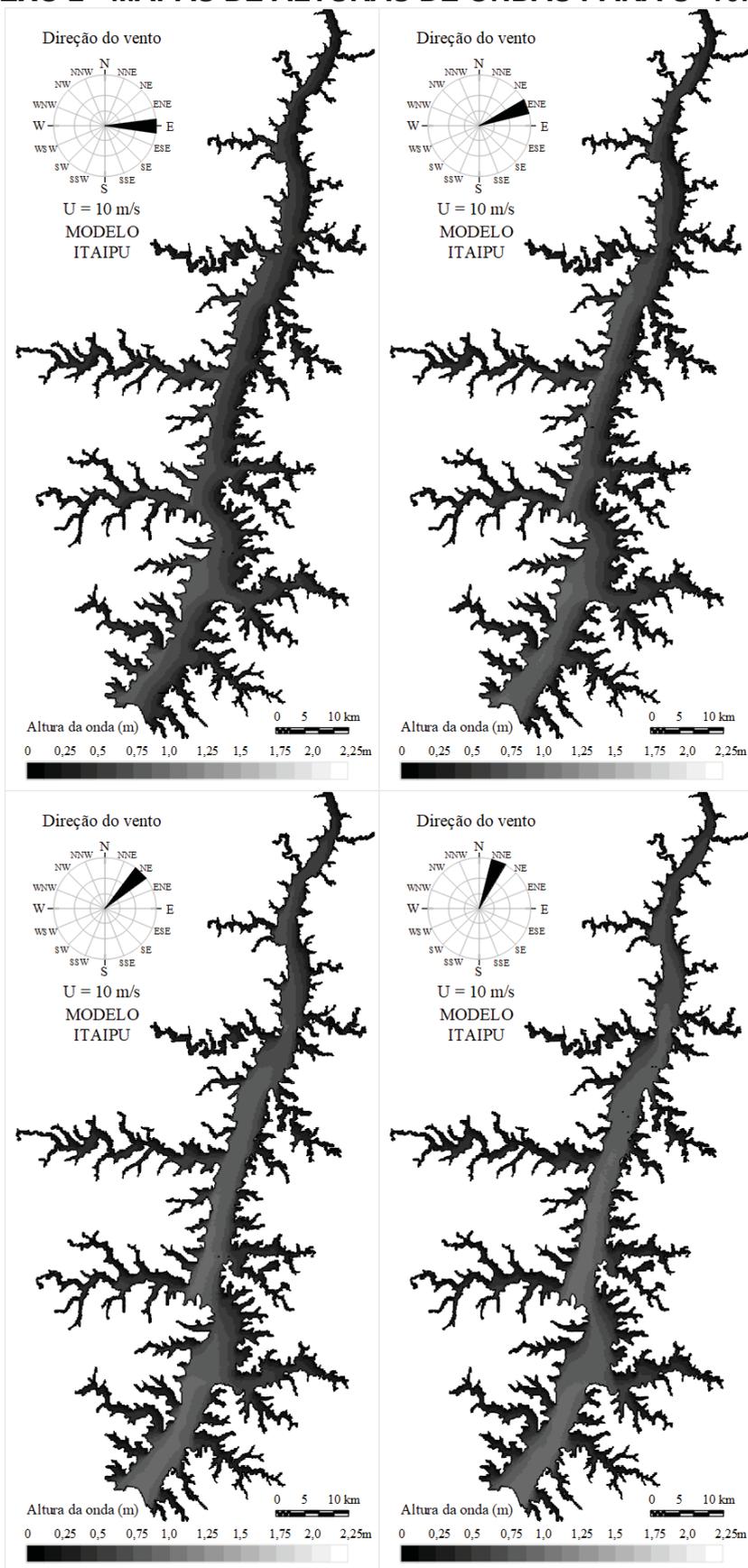


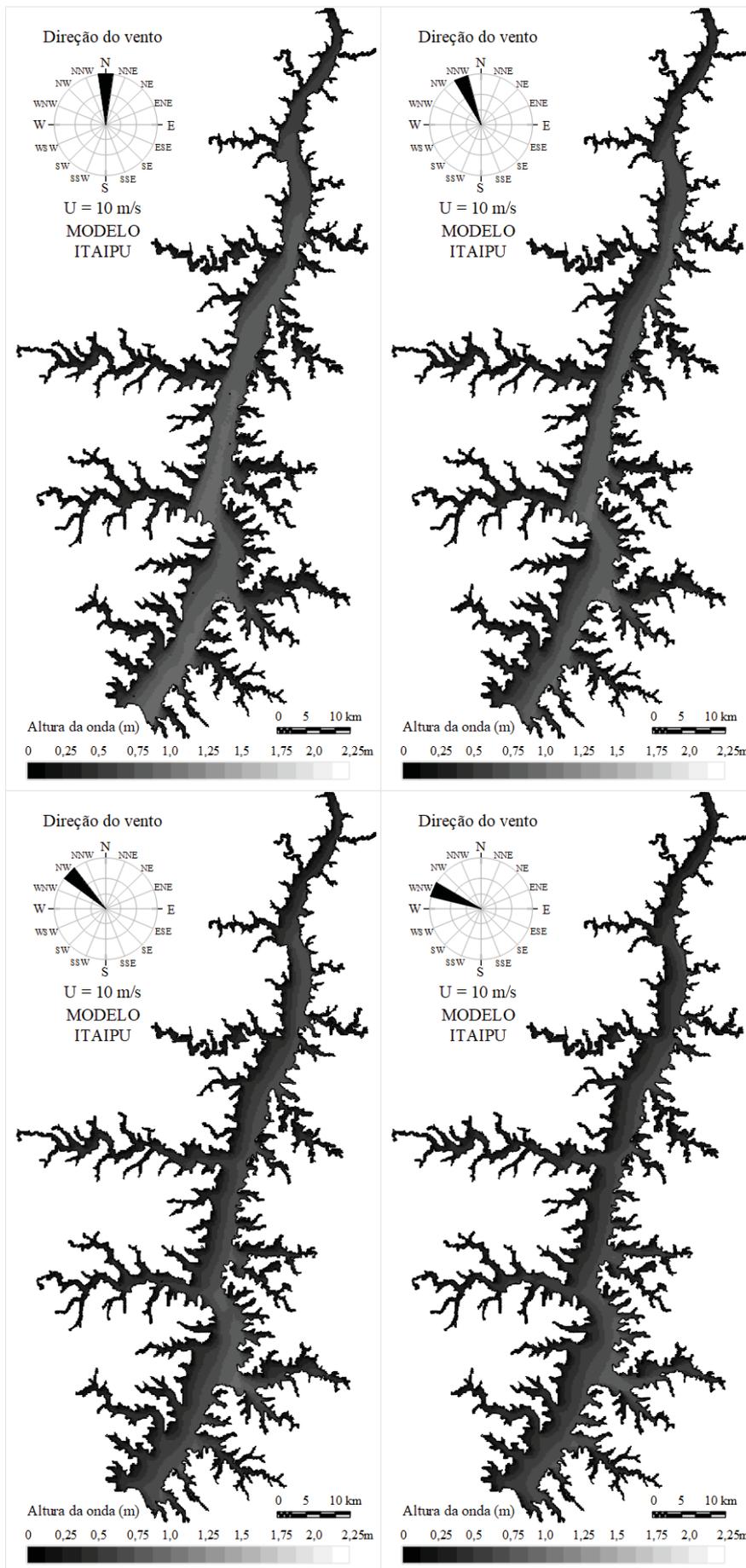


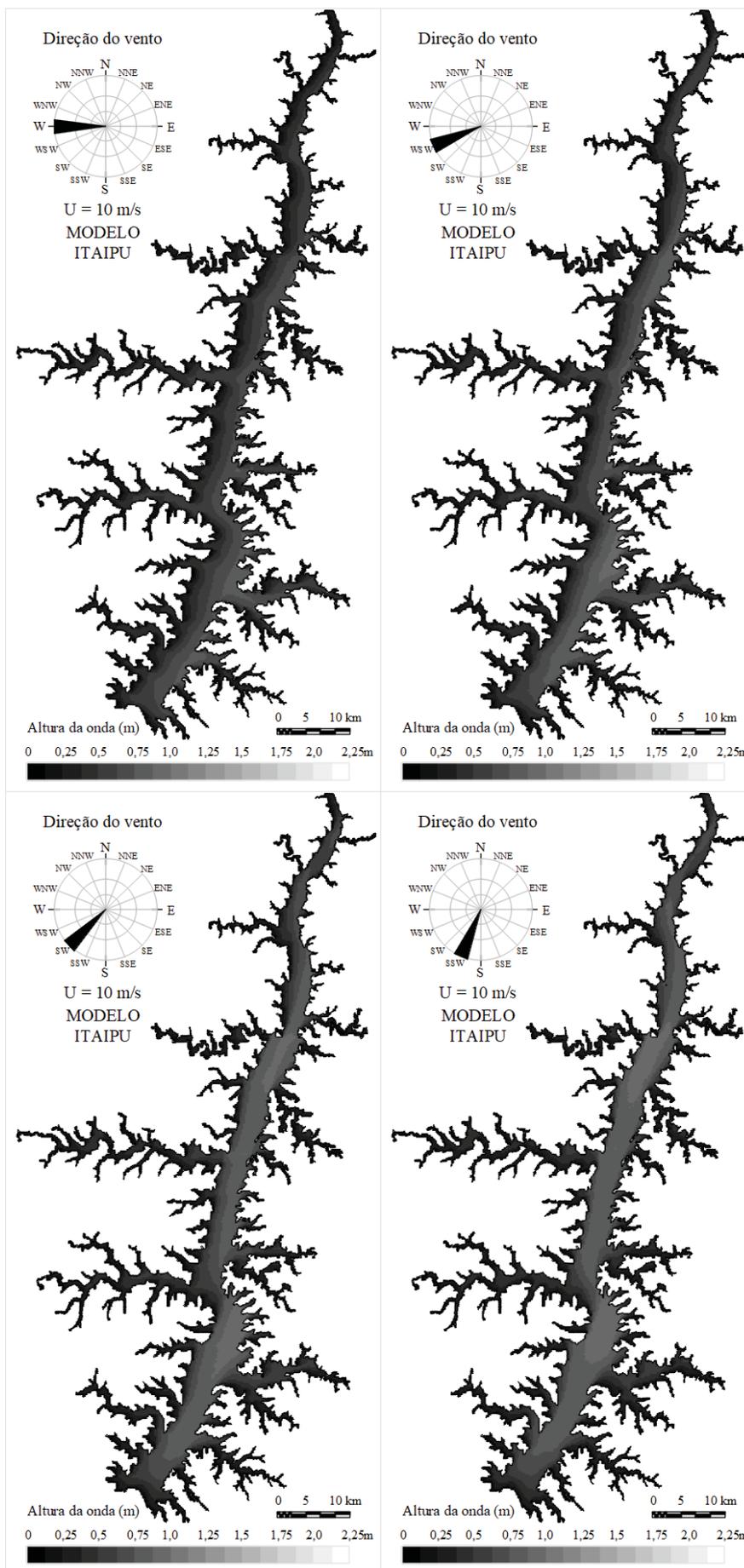


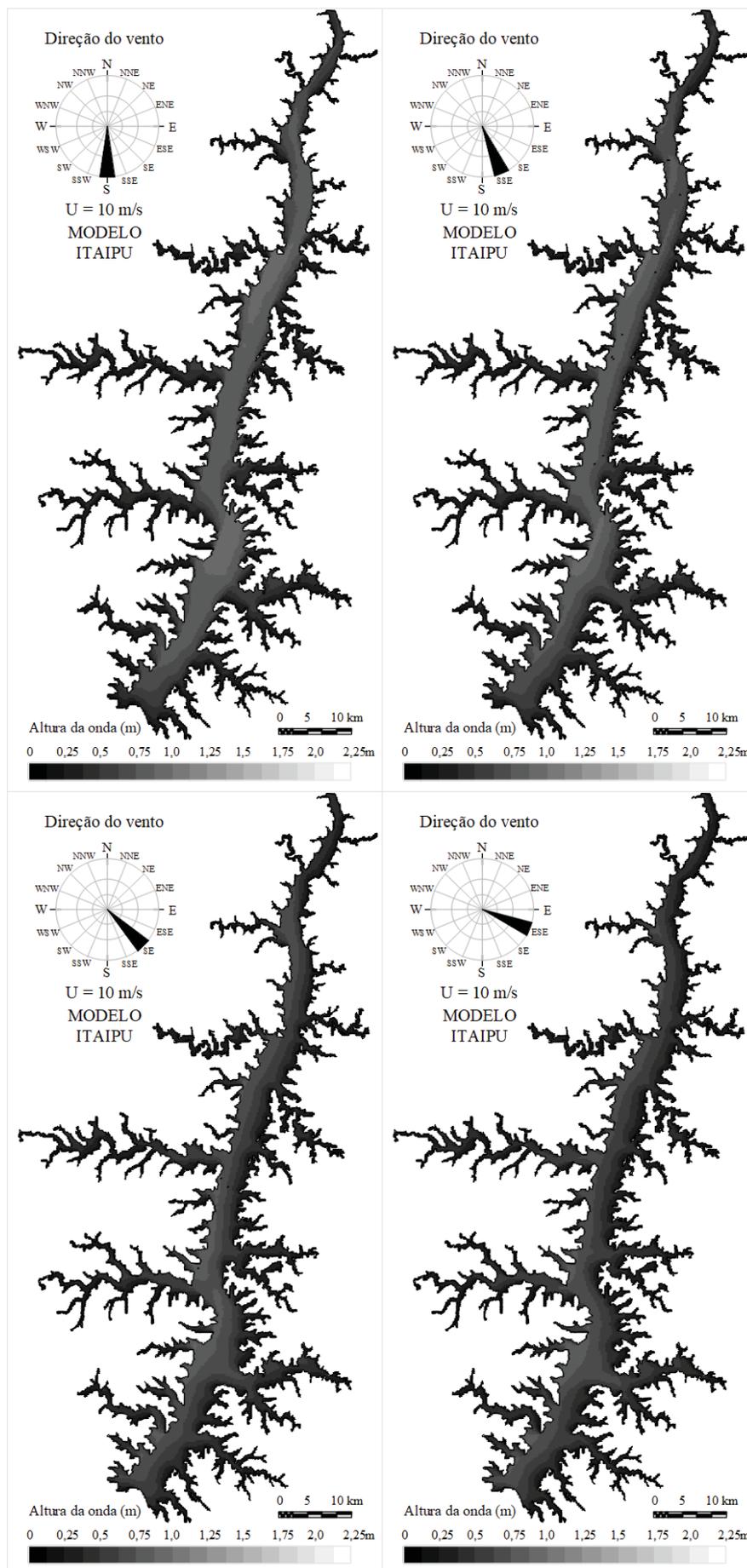


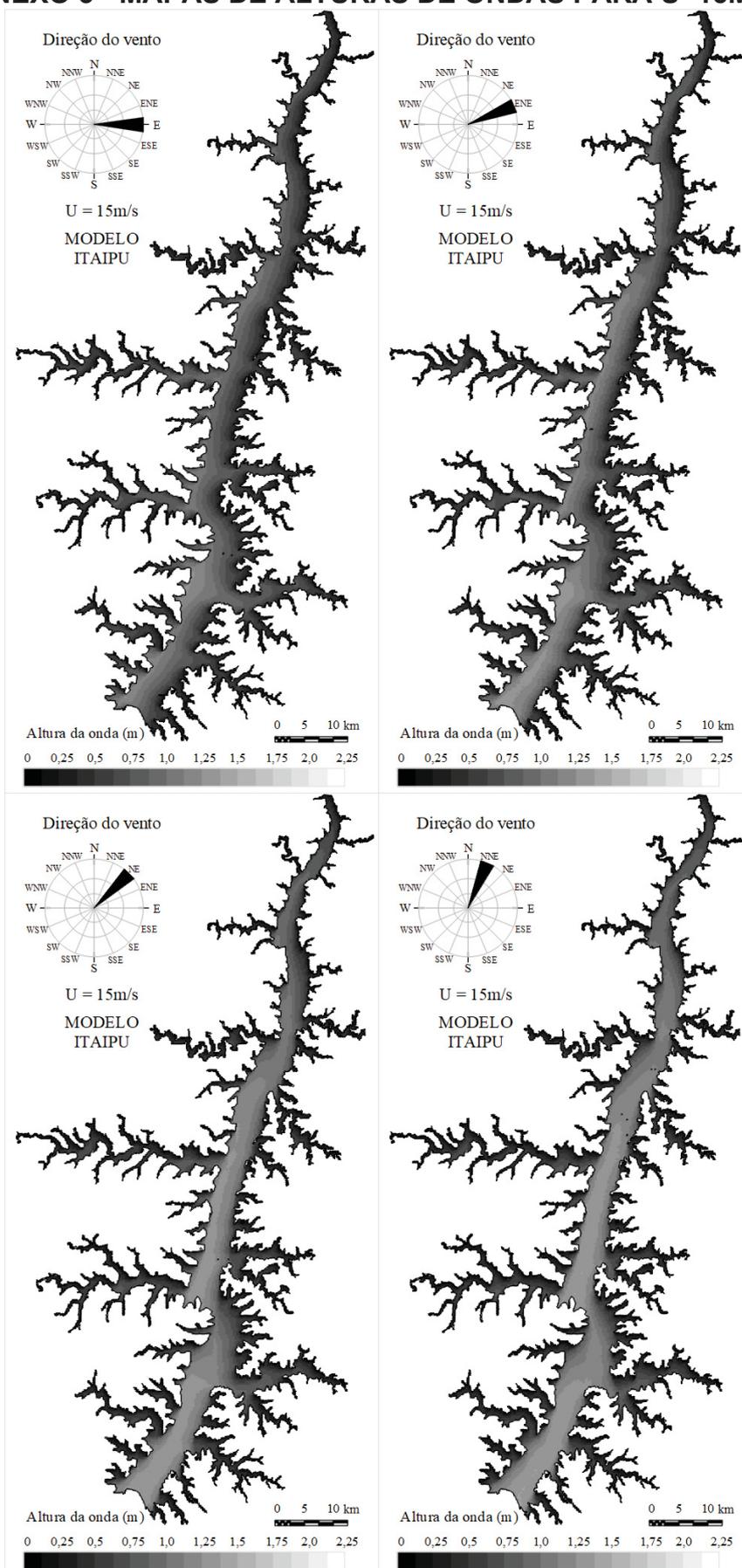
ANEXO 2 - MAPAS DE ALTURAS DE ONDAS PARA U=10MS⁻¹

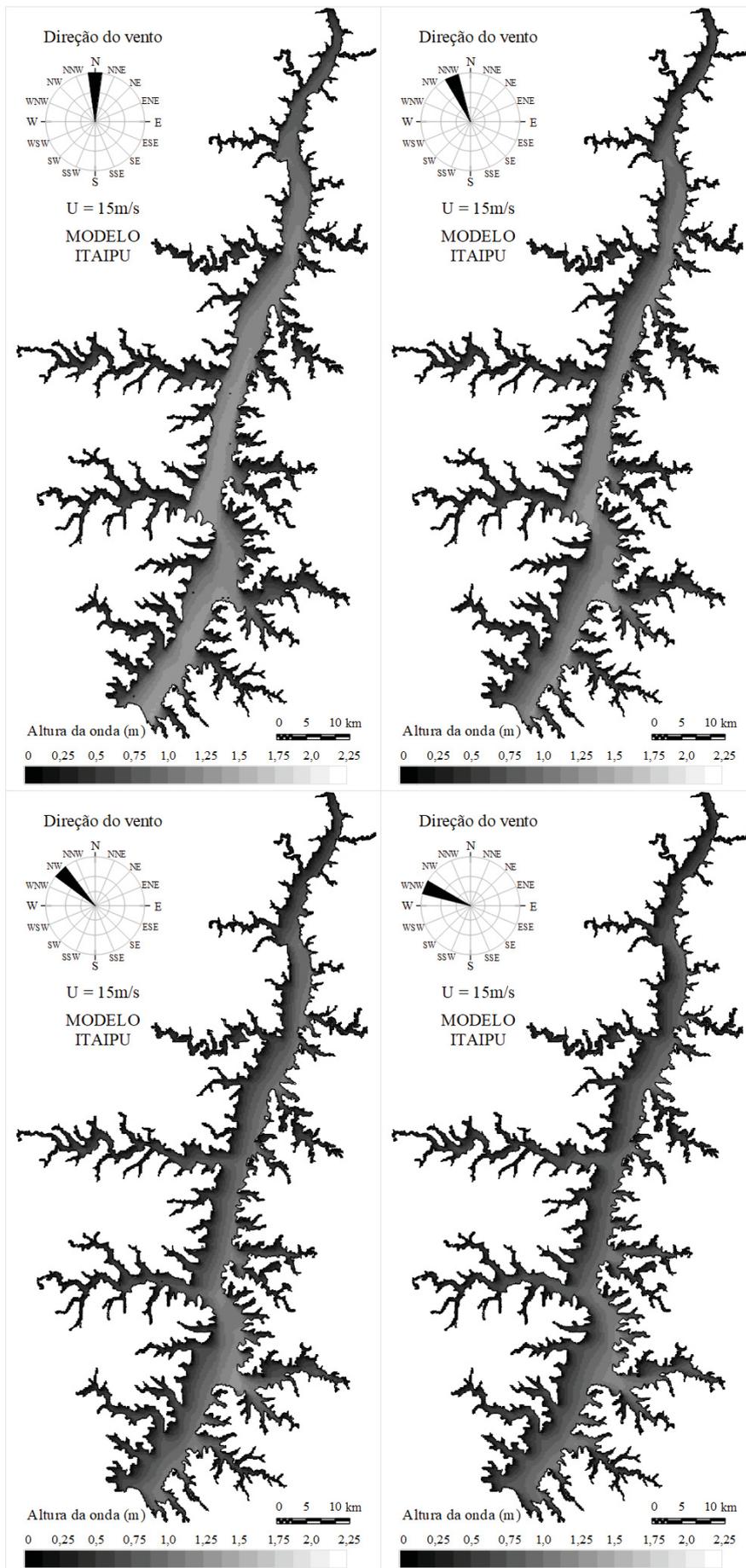


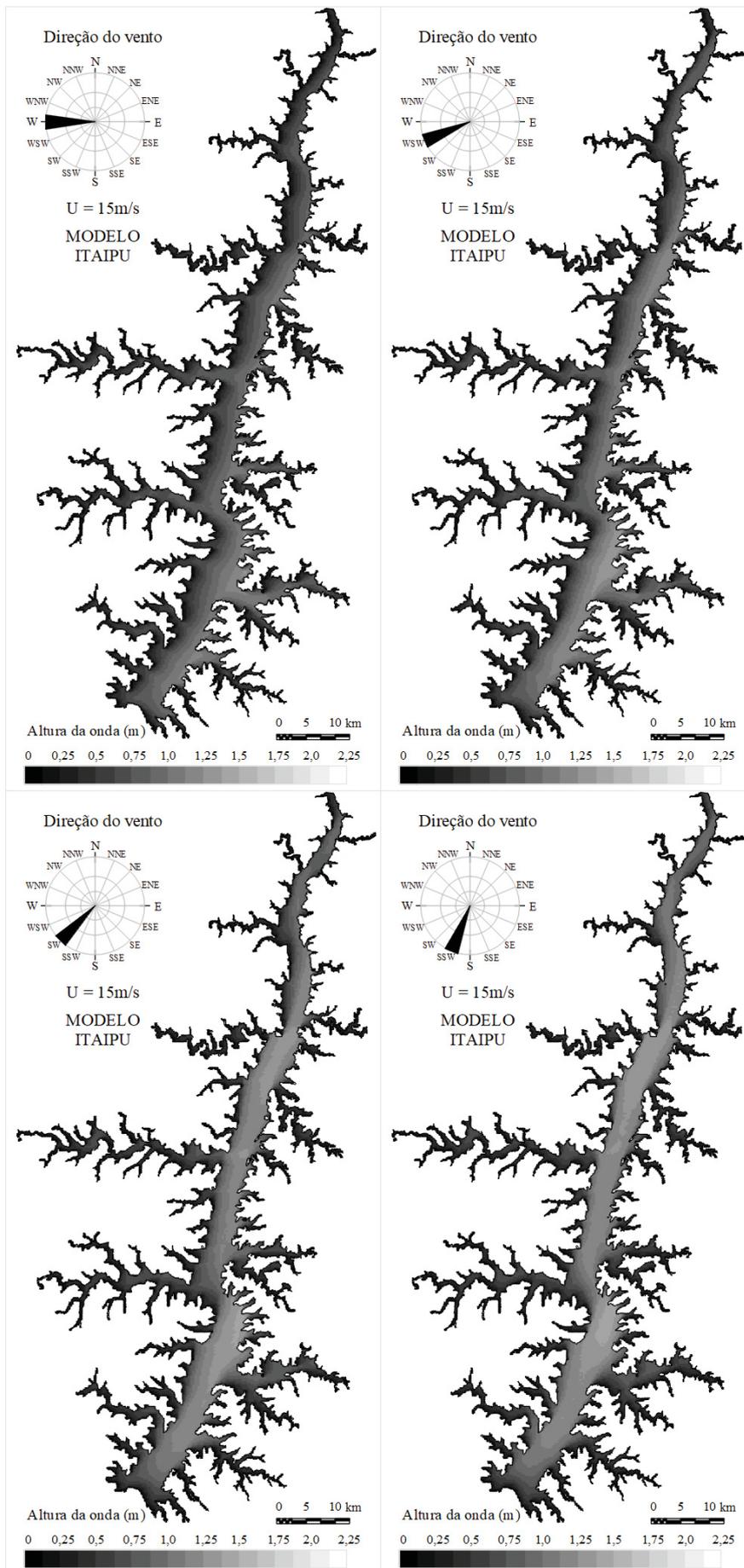


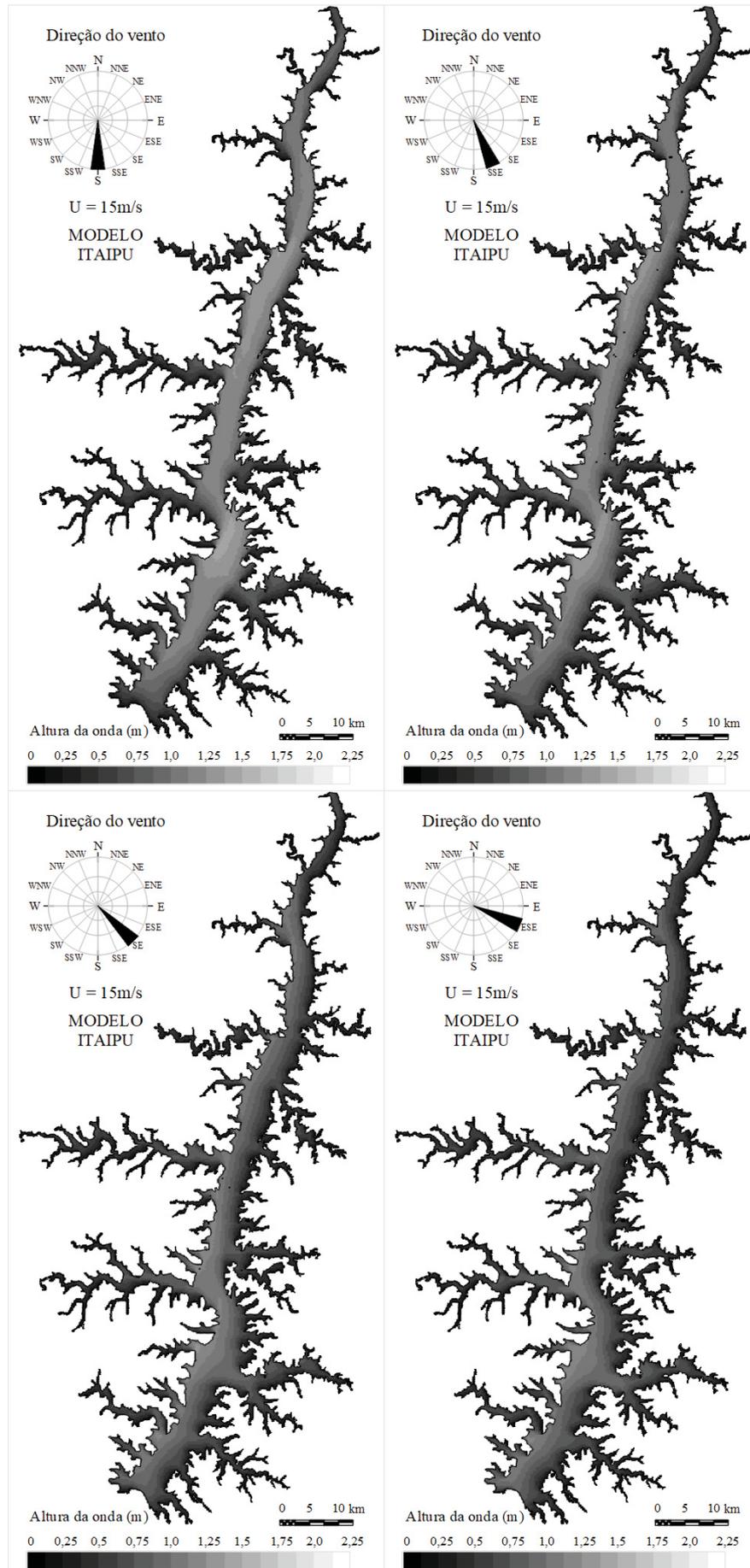




ANEXO 3 - MAPAS DE ALTURAS DE ONDAS PARA $U=15\text{MS}^{-1}$ 







ANEXO 4 - MAPAS DE ALTURAS DE ONDAS PARA $U=20\text{MS}^{-1}$ 