

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
Programa de Pós-Graduação em
Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

WLAND OLIVEIRA CAMILO JUNIOR

**Influência do Lago de Sobradinho no Escoamento
Atmosférico e na Camada Limite Interna na Região de Casa
Nova**

Salvador

2023

WLAND OLIVEIRA CAMILO JUNIOR

**Influência do Lago de Sobradinho no escoamento
Atmosférico e na Camada Limite Interna na Região de Casa
Nova**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.
Orientador: Prof. Dr. Davidson Martins Moreira.
Coorientador: Prof. Dr. Allan Rodrigues Silva.

Salvador

2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

C183i Camilo Junior, Wland Oliveira

Influência do lago de Sobradinho no escoamento atmosférico e na camada limite interna na região de Casa Nova / Wland Oliveira Camilo Junior. – Salvador, 2023.

84 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Davidson Martins Moreira.

Coorientador: Prof. Dr. Allan Rodrigues Silva.

Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2023.

Inclui referências.

1. Lago de Sobradinho. 2. Escoamento atmosférico. 3. WRF. 4. WindNinja. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Moreira, Davidson Martins. III. Silva, Allan Rodrigues. IV. Título.

CDD 333.794

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Mestrado Acadêmico em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada “**Influência do Lago de Sobradinho no Escoamento Atmosférico e na Camada Limite Interna na Região de Casa Nova**” apresentada no dia 21 de dezembro de 2023, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

Assinado eletronicamente por:

Davidson Martins Moreira

CPF: ***.832.500-**

Data: 02/01/2024 17:42:45 -03:00

SENAI

Orientador:

Prof. Dr. Davidson Martins Moreira
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:

Allan Rodrigues Silva

CPF: ***.147.354-**

Data: 04/01/2024 18:20:47 -03:00

SENAI

Coorientador:

Prof. Dr. Allan Rodrigues Silva
FIEB

Assinado eletronicamente por:

Alex Álisson Bandeira Santos

CPF: ***.191.765-**

Data: 02/01/2024 18:07:47 -03:00

SENAI

Membro Interno:

Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:

Marcelo Romero de Moraes

CPF: ***.279.180-**

Data: 02/01/2024 18:39:24 -03:00

SENAI

Membro Externo:

Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus causa primeira de todas as coisas e aos mentores espirituais pelas inspirações.

Aos meus pais pelos valores e incentivos aos estudos. A minha esposa Luciana e aos meus filhos Celso e Maria Luiza pelo apoio total, estímulo e encorajamento.

Ao meu irmão Wladimir e sua esposa Letícia, ao sobrinho Henrique e a afilhada Paula toda a família em Campos Altos, a toda a família de Belo Horizonte e Braúnas em especial as afilhadas Maria Clara e Maria Eduarda pelo incentivo e pela compreensão da restrição do convívio face a dedicação nesse desafio

Aos amigos da Bahia pelo incentivo, torcida e pelos momentos que tivemos de abdicar de estarmos juntos.

A todos os colegas desta jornada na Chesf e no CIMATEC. em especial Natasha, Alexandre, Leonardo e Renatos pela colaboração nos desafios enfrentados juntos.

Ao grupo WRF – CHESF em especial, Diogo, Yasmin, Rizzieri e Armando, pelas dicas valiosas.

Ao Professores Dr. Davidson e Dr. Allan pelos ensinamentos, pela confiança e pela paciência.

A Chesf e ANEEL pela oportunidade e pelo financiamento do projeto. Aos colegas dos antigos setores DOSS e DOSST da Chesf em especial ao meu amigo e chefe Antonio Carlos pelo apoio, tolerância e compreensão.

Ao Senai CIMATEC, os colaboradores e os professores do PPGMCTI por todo o suporte.

A minha companheira fiel de estudos a mascote da família Tikinha.

RESUMO

Na tentativa de reduzir o aquecimento global existe um forte crescimento das fontes de energia renováveis em escala mundial e nacional. Geração eólica e solar têm um papel de destaque neste cenário devido ao custo-benefício, sustentabilidade e disponibilidade ao redor do mundo. Em algumas regiões é verificada uma complementaridade das fontes renováveis, o que contribui para minimizar um grande problema, a intermitência. Isso leva a uma nova tendência de integração de plantas de geração de múltiplas fontes primárias. Para melhor explorar o benefício das plantas híbridas é primordial entender o comportamento das fontes primárias. Desta forma, o objetivo deste trabalho é analisar detalhadamente o comportamento da fonte primária eólica na região de uma planta híbrida (eólica e solar) com armazenamento nas margens do lago da Usina Hidrelétrica de Sobradinho. Na análise foram usados dados medidos com torre anemométrica e LIDAR (Light Detection and Ranging) e dados simulados com o modelo numérico WRF (Weather Research and Forecasting), refinados em microescala com o modelo WindNinja, para melhor entender o comportamento do escoamento atmosférico local e a influência do lago de Sobradinho neste processo. Os resultados do modelo WRF apresentaram uma boa correspondência aos medidos com a torre anemométrica e com o LIDAR. O resultado do vento local é um somatório dos efeitos de grande escala, de orografia, de rugosidade da superfície e efeitos térmicos como as brisas lacustres. Os efeitos térmicos e de rugosidade do lago são muito relevantes sobre o próprio lago, mas têm pouco alcance além das bordas. O efeito local mais relevante para influenciar a geração de energia na planta híbrida é a orografia do lago e seu entorno.

Palavras-chave: Lago de Sobradinho; Escoamento Atmosférico; WRF; WindNinja.

ABSTRACT

Influence of Sobradinho Lake on Atmospheric Runoff and Internal Boundary Layer in the Casa Nova Region

In an attempt to reduce global warming, there is strong growth in renewable energy sources on a global and national scale. Wind and solar generation play a prominent role in this scenario due to cost-benefit, sustainability and availability around the world. In some regions there is a complementarity of renewable sources, which helps to minimize a major problem, intermittency. This leads to a new trend of integrating generation plants from multiple primary sources. To better explore the benefits of hybrid plants, it is essential to understand the behavior of primary sources. Therefore, the objective of this work is to analyze in detail the behavior of the wind primary source in the region of a hybrid plant (wind and solar) with storage on the banks of the Sobradinho Hydroelectric Plant lake. In the analysis, data measured with anemometric tower and LIDAR (Light Detection and Ranging) and data simulated with the WRF (Weather Research and Forecasting) numerical model were used, refined on a microscale with the WindNinja model, to better understand the behavior of local atmospheric flow and the influence of Lake Sobradinho. in this process. The results of the WRF model showed a good correspondence to those measured with the anemometric tower and the LIDAR. The result of local wind is a sum of large-scale effects, orography, surface roughness and thermal effects such as lake breezes. The thermal and roughness effects of the lake are very relevant on the lake itself but have little reach beyond the edges. The most relevant local effect to influence energy generation in the hybrid plant is the orography of the lake and its surroundings.

Keywords: Sobradinho Lake; Atmospheric Runoff; WRF; WindNinja.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Temperatura da superfície versus irradiância.	17
Figura 1.2 Crescimento da capacidade global instalada de energias renováveis por tecnologia.....	18
Figura 2.1. Esquema descritivo da atmosfera	21
Figura 2.2. (a) Representação esquemática da CLI (b) Perfis verticais a uma distância (x) a jusante da descontinuidade.....	22
Figura 2.3. Circulação Geral da Atmosfera.	24
Figura 2.4. Escalas de espaço e tempo associado a fenômenos atmosféricos mais comuns.....	25
Figura 2.5. Nordeste Continental e suas sub-regiões.	28
Figura 2.6. Variáveis que controlam as brisas marinhas e lacustres.....	30
Figura 2.7. Ilustração esquemática de um sistema de brisa marítima.....	31
Figura 2.8. Ilustração esquemática de características relacionadas a avaliação da circulação da LB.....	31
Figura 2.9 Fluxograma do modelo WRF	35
Figura 2.10 Malha computacional usada para representar a elevação Big Southern Butte.....	37
Figura 2.11. Visualização do fluxo de vento gerado no WindNinja com o Google Earth.	38
Figura 2.12. Plantas integradas de energia renovável.	43
Figura 3.1. Região do objeto de estudo.	44
Figura 3.2. Batimetria lago de Sobradinho na região de estudo.....	45
Figura 3.3. Variação da cota do lago de Sobradinho entre 2015 e 2022.	47
Figura 3.4. Variação Sazonal do Índice Oceânico Niño (Oceanic Niño Index – ONI).	47
Figura 3.5. LIDAR instalado na usina Fotovoltaica Flutuante de Sobradinho.	49
Figura 3.6. Configuração dos domínios para a modelagem do WRF.....	50
Figura 3.7. Tela de simulação do WindNinja.....	54
Figura 4.1 Comparativos de médias de variáveis obtidas na TA2 em 2018 e em 2022.	55

Figura 4.2. - Comparativo de valores medidos na TA2 a 96m e simulados WRF a 100m das médias diárias de velocidade e direção do vento, a) e c) em 2018, b) e d) em 2022.	57
Figura 4.3. Mapas de calor de velocidade do vento e direção medidos com o LIDAR.	58
Figura 4.4. Comparativo de valores medidos com o LIDAR a 90m e simulados no WRF a 100m das médias diárias de velocidade e direção do vento.	59
Figura 4.5. Comparativo dos valores das médias horarias de velocidade e direção do vento registradas entre os dias 22 e 24/09/2022.....	60
Figura 4.6. Carta de pressão ao nível médio do mar para a América do Sul no dia 23/09/2022 às 12H UTC.....	61
Figura 4.7. Comparativo dos valores das médias horarias de velocidade e direção do vento registradas entre os dias 28 e 30/09/2022.....	62
Figura 4.8. Carta de pressão ao nível médio do mar para a América do Sul no dia 29/09/2022 às 12H UTC.....	62
Figura 4.9. Comparativo dos valores das médias horarias de velocidade e direção do vento registradas entre os dias 01/11 e 03/11/2022.....	63
Figura 4.10. Carta de pressão ao nível médio do mar para a América do Sul no dia 02/11/2022 às 12H UTC.....	64
Figura 4.11. Efeitos do lago na circulação local.	65
Figura 4.12. Efeitos térmicos do lago na circulação local.....	66
Figura 4.13. Representação do corte para análise do vento cruzando o lago.	68
Figura 4.14. Alcance Horizontal e Vertical dos Efeitos.....	69
Figura 4.15. Alcance Horizontal e Vertical dos Efeitos com Vertcross.	71
Figura 4.16. Sobreposição de campos de vento de entrada e saída no WindNinja. .	73
Figura 4.17. Campo gerado no WindNinja nas bordas próximas a TA2.....	73
Figura 4.18. Campos gerados no WindNinja: superior dados entrada WRF e inferior saída do WindNinja	74
Figura 4.19 Comparativo TA2, WRF e WindNinja.....	75
Figura 4.20 Comparativo Diferenças WRF e WindNinja versus TA2	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Escala dos movimentos na atmosfera.....	25
Tabela 2.2. Características dos ventos na sub-região 2 do Nordeste Continental. ...	29
Tabela 3.1. Tabela Resumo Parametrizações WRF.	52
Tabela 4.1. Métricas estatísticas comparativas das médias diárias dos dados medidos na TA2 e LIDAR e simulados com o modelo WRF.....	58
Tabela 4.2. Métricas estatísticas comparativas resultados WindNinja e WRF em relação a TA2.....	76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AFWA	Air Force Weather Agency
AL	Atmosfera Livre
ALEX	ALqueva hydro-meteorological EXperiment
ARW	Advanced Research WRF
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
CGA	Circulação Geral da Atmosfera
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLC	Camada Limite Convectiva
CLE	Camada Limite Estável
CLI	Camada Limite Interna
CLN	Camada Limite Noturna
CLP	Camada Limite Planetária
CRESP	Centro de Referência em Energia Solar de Petrolina
CSA	Camada Superficial Atmosférica
DEM	Digital Elevation Model
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
FAA	Federal Aviation Administration
FEM	Finite Element Method
FSL	Forecast Systems Laboratory
GrADS	Grid Analysis and Display System
GRIB	General Regularly-distributed Information in Binary form
HL	Hora Local
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LB	Lake Breezes
LIDAR	Light Detection and Ranging
LULC	Land Use Land Cover
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NCL	NCAR Command Language
NEB	Nordeste brasileiro

NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ONI	Oceanic Niño Index
PBL	Planetary Boundary Layer
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
QGIS	Quantum Geographic Information System
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
SAR	Synthetic Aperture Radar
SB	Sea Breezes
SBF	Sea Breeze Front
SF	Sistemas Frontais
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SODAR	Sonic Detection and Ranging
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TA2	Torre Anemométrica 2
TKE	Turbulent Kinect Energy
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UCAR	University Corporation for Atmospheric Research
UHE	Usina Hidro Elétrica
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
USGS	United States Geological Survey
UTC	Coordinated Universal Time
VAPOR	Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere and Solar Researchers
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
WPS	WRF Preprocessing System
WRF	Weather Research and Forecasting
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONTEXTO.....	17
1.2	OBJETIVO GERAL	19
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.4	QUESTÃO NORTEADORA	19
1.5	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	ATMOSFERA E O REGIME GERAL DOS VENTOS.....	20
2.1.1	A Camada Limite Atmosférica (CLA).....	20
2.1.2	A Camada Limite Interna (CLI).....	22
2.1.3	Os Ventos e a Circulação Geral da Atmosfera	23
2.2	O REGIME DE VENTOS NO NORDESTE BRASILEIRO.....	26
2.3	VENTOS COSTEIROS E DE BORDAS DE LAGOS	29
2.3.1	Brisas Marítimas e Lacustres	29
2.4	VENTOS NA REGIÃO DO LAGO DE SOBRADINHO.....	32
2.5	SENSORIAMENTO REMOTO LIDAR	32
2.6	DADOS DE MODELAGEM NUMÉRICA	33
2.6.1	Modelos de Simulação e Previsão Numérica do Tempo.....	33
2.6.2	Modelo de Previsão Numérica do Tempo WRF	33
2.7	ACOPLAMENTO DE MODELOS MESOESCALA E MICROESCALA.....	36
2.7.1	O modelo de Microescala WindNinja.....	37
2.8	ESTUDOS RECENTES DE ANÁLISES METEOROLÓGICAS EM REGIÕES COSTEIRAS E DE LAGOS	39
2.8.1	Pesquisas em Lagos ou Reservatórios de Usinas Hidrelétricas.	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO: MARGENS DO LAGO DE SOBRADINHO.....	43
3.2	PERÍODOS ESCOLHIDOS PARA ANÁLISE.....	46
3.3	DADOS OBSERVACIONAIS.....	48
3.4	DADOS MENSURADOS COM O LIDAR.....	48
3.5	DADOS SIMULADOS COM O WRF	49
3.5.1	Parametrizações do Modelo WRF.....	50

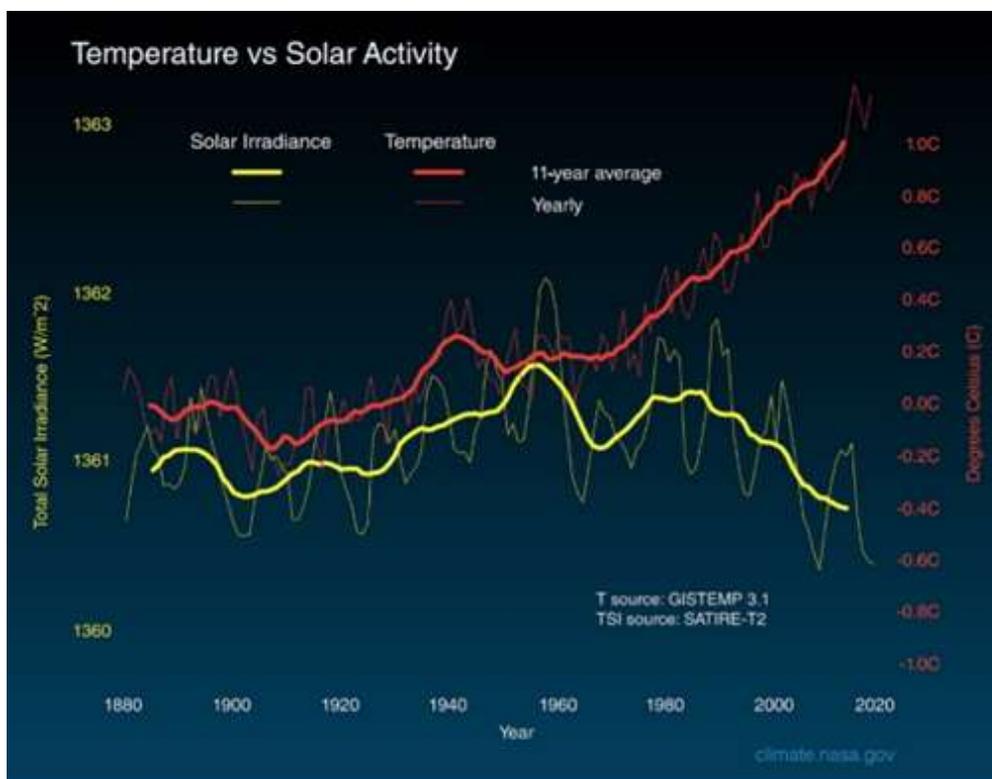
3.6	ASSOCIAÇÃO WRF E WINDNINJA.....	52
4	RESULTADOS E ANÁLISES	54
4.1	COMPARATIVO ENTRE OS DOIS PERÍODOS: ANO 2018 E ANO 2022	54
4.2	COMPARATIVO DOS DADOS MEDIDOS EM TA2 E MODELADOS COM WRF. ...	56
4.3	COMPARATIVOS DADOS MEDIDOS COM O LIDAR E MODELADOS COM WRF. ...	58
4.4	ANÁLISE DE DIAS ESPECÍFICOS.....	59
4.5	EFEITOS DO LAGO NO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO LOCAL.....	64
4.6	ALCANCE HORIZONTAL E VERTICAL DOS EFEITOS.....	67
4.7	AUMENTO DA RESOLUÇÃO DO WRF COM ACOPLAMENTO AO WINDNINJA. ...	72
4.8	COMPARATIVO DADOS WINDNINJA E WRF E MEDIDOS NA TA2	75
5	CONCLUSÕES.....	77
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	78
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

Após a industrialização do planeta, consolidada em meados no século XX, tem sido registrada por diversas organizações uma elevação da temperatura do planeta denominada “aquecimento global”. A Figura 1.1 mostra um comparativo entre os registros das médias da temperatura do planeta e da energia recebida do sol e evidencia que até aproximadamente o ano 1960 os valores médios dessas grandezas tinham uma certa correlação que agora não é mais verificada.

Figura 1.1 Temperatura da superfície versus irradiância.



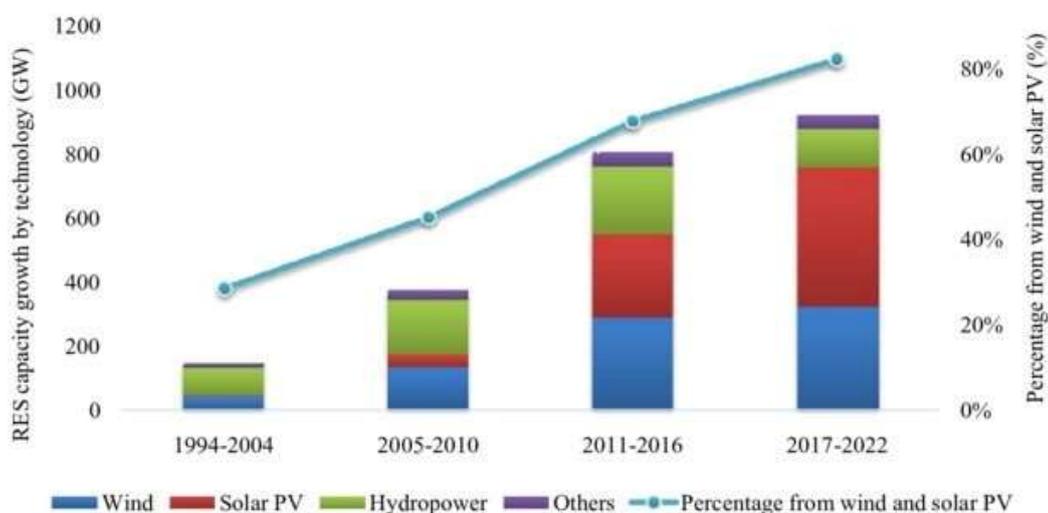
Fonte: (NASA-JPL; Caltech, 2023)

O aquecimento global está diretamente relacionado a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera originados nos meios de transportes de pessoas e cargas, nos processos industriais e de geração de energia. Para reduzir este efeito várias nações têm realizado esforços para buscar formas de geração de energia evitando os combustíveis fósseis (KESSEL, 2000). Em um primeiro momento houve um grande avanço das fontes hidrelétricas e de energia nuclear. Porém a primeira é muito restrita a determinadas condições geográficas e meteorológicas que poucos países têm o privilégio de serem favorecidos. A segunda apresenta um alto risco ambiental em caso

de acidentes e perda do controle dos processos, como os exemplos de Chernobyl na antiga URSS e Fukushima no Japão, o que levou alguns países a abandonarem projetos nucleares (SRINIVASAN; GOPI RETHINARAJ, 2013).

Em um período mais recente, tem se destacado e avançado os investimentos em geração eólica e solar fotovoltaica devido ao custo-benefício, sustentabilidade e disponibilidade mundial destas fontes (LI; YU, 2018). A Figura 1.2 destaca este avanço das energias renováveis no mundo, com particular atenção às fontes eólica e solar.

Figura 1.2 Crescimento da capacidade global instalada de energias renováveis por tecnologia



Fonte: (DRANKA et al., 2020)

Com o crescimento do aproveitamento renovável e a verificação de uma complementariedade entre as fontes primárias surge o conceito de geração híbrida: uma otimização de recursos e infraestrutura para aumentar a confiabilidade e a receita reduzindo os efeitos das intermitências naturais das mesmas (CARVALHO; GUARDIA; LIMA, 2019). Neste contexto, existem diversos estudos sobre a complementariedade de fontes renováveis e aproveitamento híbrido no Brasil, (SILVA, et al., 2016; ROSA et al., 2020; LUZ e MOURA, 2019). Para maximizar o aproveitamento híbrido é importante conhecer com profundidade o comportamento das fontes primárias na região de interesse considerando todas as influências desde a escala sinótica até a microescala.

O presente trabalho faz parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) que tem como objetivo o estudo de um sistema inteligente de geração híbrida na região de Casa Nova – BA. Desta forma, o objetivo é analisar detalhadamente o comportamento da fonte primária eólica na região de uma planta híbrida (eólica e solar) com armazenamento instalado nas margens do lago da Usina Hidrelétrica de

Sobradinho. Na análise foram usados dados medidos com torre anemométrica e Light Detection and Ranging (LIDAR) e dados simulados com o modelo numérico Weather Research and Forecasting (WRF), refinados em microescala com o modelo WindNinja, para melhor compreender o comportamento do escoamento atmosférico local e a influência do lago de Sobradinho neste processo.

1.2 Objetivo Geral

Analisar com dados observacionais e de modelagem numérica o perfil horizontal e vertical de ventos na região de Casa Nova – BA, com o intuito de elucidar como o lago de Sobradinho influencia na camada limite interna e no padrão do escoamento atmosférico local.

1.3 Objetivos Específicos

- Analisar os dados observados e de modelagem da velocidade e direção dos ventos na região;
- Entender o comportamento do escoamento atmosférico e da Camada Limite Interna (CLI) na região;
- Qualificar e quantificar os efeitos do lago Sobradinho no comportamento do vento na região de estudo e sua influência na “hub-height” da planta híbrida;
- Avaliar os benefícios da associação de um modelo em mesoescala com outro em microescala para a representação de fenômenos meteorológicos de escala local.

1.4 Questão Norteadora

Quais os efeitos do lago de Sobradinho no escoamento atmosférico na região de Casa Nova-BA?

1.5 Organização da Dissertação

Este documento está estruturado da seguinte forma:

- **Introdução:** Contextualiza o âmbito onde a pesquisa proposta está inserida. Apresenta, portanto, a definição do problema, objetivos e justificativas da pesquisa e como esta dissertação de mestrado está estruturada;
- **Revisão Bibliográfica:** Apresenta alguns conceitos e trabalhos importantes para a compreensão do tema e que serviram de referência para este estudo;
- **Materiais e métodos:** Apresenta a região estudada os dados e as ferramentas utilizados no trabalho;
- **Resultados e Análises:** Apresenta os resultados obtidos e análises que auxiliaram a responder à questão norteadora;
- **Conclusão:** Apresenta as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Atmosfera e o Regime Geral dos Ventos

2.1.1 A Camada Limite Atmosférica (CLA)

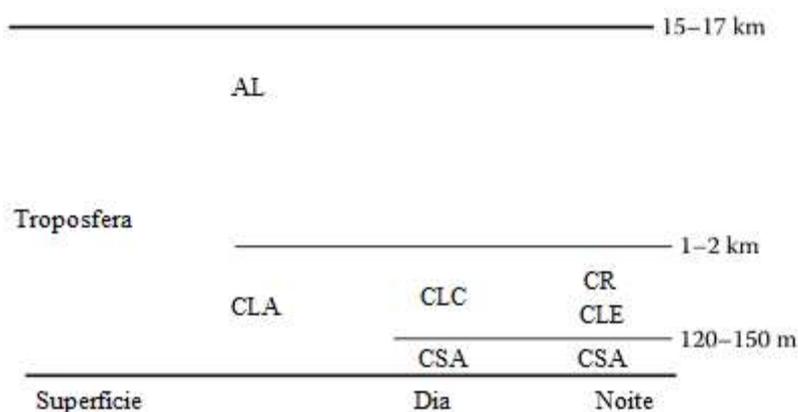
A troposfera é a camada da atmosfera mais próxima ao solo e a que desperta maior interesse, pois é nela que ocorrem os principais fenômenos meteorológicos e a dispersão de poluentes. Sua espessura pode atingir, dependendo da latitude, até aproximadamente 15 km. Os regimes turbulentos são mais restritos à CLA que é uma camada de menor espessura que depende profundamente dos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre (SALVADOR, 2014).

Nessa perspectiva, para analisar o escoamento do ar na atmosfera é importante entender a CLA e os processos que nela ocorrem. STULL (1988) define a CLA como a região da atmosfera que é diretamente influenciada pelos efeitos da presença do solo, devido à troca vertical de quantidade de movimento, calor e umidade. A espessura da CLA é variável no tempo e no espaço em intervalos de uma hora ou menos e centenas de metros a poucos quilômetros, respectivamente. Para GARRATT (1992), a CLA não é fácil de ser definida, entretanto, uma definição prática é que se trata da camada de ar diretamente acima da superfície da Terra em que os efeitos da superfície (atrito, aquecimento e resfriamento) são sentidos diretamente em

escalas de tempo menores que um dia, e onde fluxos significantes de momentum, calor ou massa são realizados por movimentos turbulentos em uma amplitude que varia até o limite da profundidade da CLA.

A Figura 2.1 apresenta um esquema de estratificação de camadas da atmosfera, onde a troposfera é dividida em Atmosfera Livre (AL) e CLA. Por sua vez a CLA se divide em uma Camada Superficial Atmosférica (CSA) e em uma Camada Limite Convectiva (CLC) ou Camada Limite Estável (CLE) (MOREIRA e VILHENA, 2009).

Figura 2.1. Esquema descritivo da atmosfera



Fonte: adaptado de MOREIRA e VILHENA, 2009

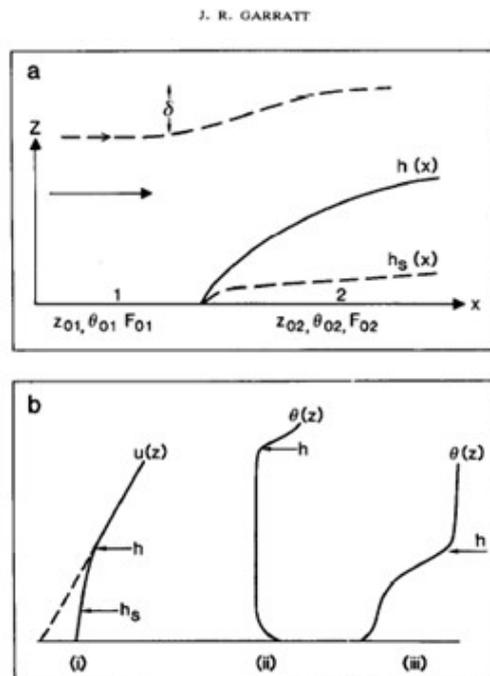
A CLC é produzida pelo forte aquecimento da superfície, que produz instabilidade e, assim, ocorre predominantemente durante o dia. O seu topo é muito bem definido e pode ser facilmente determinado por sensoriamento remoto ou sondagens (STULL, 1988). A CLE ocorre principalmente (mas não exclusivamente) à noite devido ao resfriamento noturno da superfície. Consequentemente, às vezes também é referida como Camada Limite Noturna (CLN). A extensão da CLE é bem menor que a da CLC, variando de 0,1 km até 0,3 km. Esta evolução temporal depende fortemente dos ventos. Para uma noite de vento, a CLE irá se estender mais profundamente devido à turbulência mecânica gerada. Para um vento calmo com baixa turbulência, esta profundidade é mais rasa.

2.1.2 A Camada Limite Interna (CLI)

A CLI na atmosfera é uma camada que se forma no interior da CLA e está associada ao escoamento horizontal do ar através de uma descontinuidade da superfície. Os estudos geralmente especificam como o forçamento da superfície em termos de uma mudança abrupta na rugosidade, temperatura ou umidade, ou no fluxo de calor ou fluxo de umidade (GARRATT,1990).

A Figura 2.2 (a) mostra de uma forma esquemática o conceito de uma CLI $h(x)$ e a camada de equilíbrio inferior $h_s(x)$ a jusante de uma mudança abrupta na rugosidade (z_0), temperatura (θ_0), e ou fluxo de calor ou umidade (F_0) baseado em observações em microescala ou mesoescala. A Figura 2.2 (b) mostra os perfis verticais a uma distância (x) a jusante da descontinuidade – (i) perfil de ventos para um fluxo neutro sobre uma mudança (z_0), (ii) perfil θ para uma CLI instável e uma mudança (θ_0), (iii) perfil θ para uma CLI estável em uma mudança (θ_0). Os estudos da CLI são frequentemente relacionados a problemas associados a advecção de escala local e de mesoescala, efeitos de crescimento da camada limite, e a relação alcance-altura de interesse em estudos micro meteorológicos (GARRATT,1990).

Figura 2.2. (a) Representação esquemática da CLI (b) Perfis verticais a uma distância (x) a jusante da descontinuidade.



Fonte: Adaptado de GARRATT,1990

A detecção da formação de CLI e da altura da CLI (h) pode ser feita de diversas maneiras como por exemplo perfis de umidade, temperatura ou medições do mínimo da energia cinética turbulenta (TKE - sigla em inglês) (GARRATT, 1990). No entanto, a grande maioria utiliza os perfis verticais de velocidade do vento tentando identificar pequenas variações, deformações ou descontinuidades em $\partial u \partial z$ (PANOFSKY; TOWNSEND, 1964).

Segundo SILVA (2018), dependendo das características de uma região costeira ou borda de lago, da diferença de temperatura terra-água e da intensidade dos ventos, uma camada limite pode ser formada em função da mudança das características entre a superfície da água e da terra. De acordo com GARRATT (1990), estudos utilizando modelos de mesoescala com parametrizações apropriadas para CLA indicaram a coexistência dos fenômenos de brisas marítima/terrestre e CLI.

2.1.3 Os Ventos e a Circulação Geral da Atmosfera

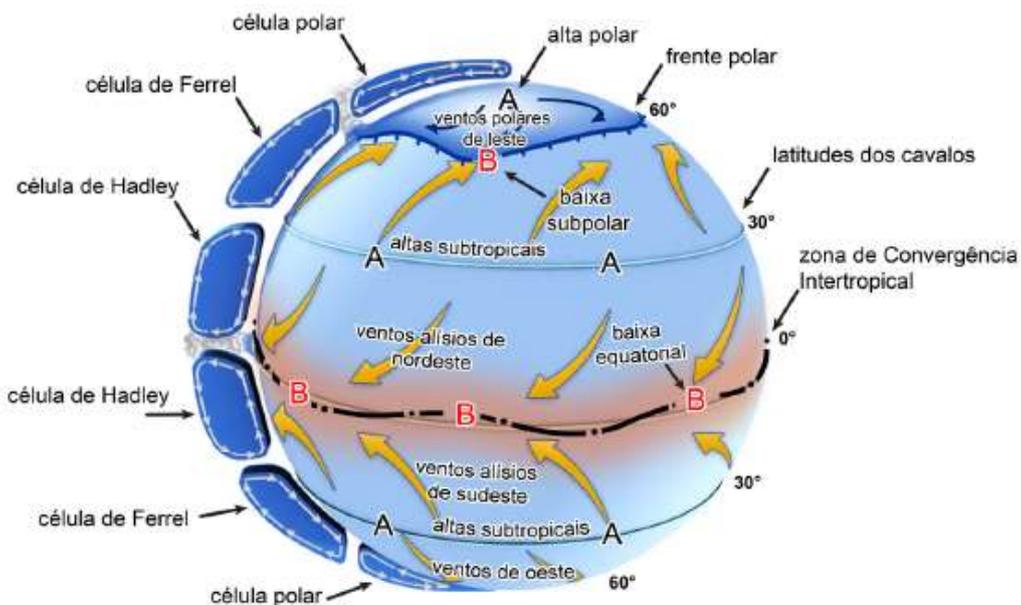
O vento é a velocidade de movimentação do ar na atmosfera. Trata-se de uma variável ambiental vetorial, ou seja, além de intensidade, possui direção e sentido para sua completa descrição. Matematicamente, podemos analisar o vento sob a perspectiva de um vetor tridimensional com componentes zonal (u), meridional (v) e vertical (w). O vento horizontal é formado pelas componentes u e v , sendo medidas a partir de anemômetros de “conchas” (COSTA, 2022).

Os mecanismos primários que modulam a intensidade do vento em grande escala são: o efeito de Coriolis (efeito da curvatura e rotação da terra) e a força devido ao gradiente de pressão gerado pela distribuição desigual do saldo de energia radiativa no planeta. Devido ao maior aquecimento no Equador terrestre, células de circulação de ar surgem, determinando a Circulação Geral da Atmosfera (CGA) composta pelas células de Hadley, Ferrel e Polar, como mostrado na Figura 2.3 (AHRENS, 2009).

Nas primeiras centenas de metros acima do nível do mar, os ventos superficiais originados das células de Hadley são chamados ventos alísios (FERREIRA, 2020). A dinâmica dos ventos alísios é marcada por um forte ciclo sazonal e uma grande assimetria ao longo do equador. No Hemisfério Norte, os ventos alísios emanam, predominantemente, da direção nordeste em direção ao equador, ao passo que, no Hemisfério Sul, os alísios deslocam-se da direção sudeste para equador. A

convergência dos ventos alísios é um dos fatores que marcam a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) na região da baixa Equatorial (CARVALHO e OYAMA, 2013).

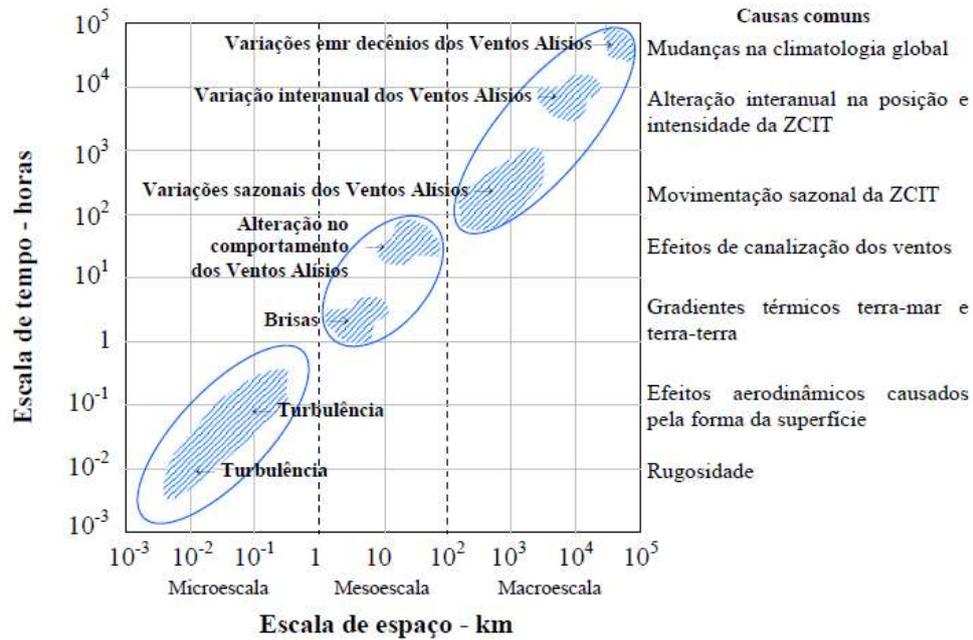
Figura 2.3. Circulação Geral da Atmosfera.



Fonte: Adaptado de Ahrens (2009).

Os fenômenos que afetam o regime de vento de uma determinada região variam desde processos micrometeorológicos com escalas na ordem de centímetros e duração de segundos, até movimentos em escala sinótica com extensões de centenas de quilômetros e duração de tempo acima de 7 dias. A Figura 2.4 ilustra as escalas de espaço e tempo e seus fenômenos atmosféricos que influenciam no regime do vento.

Figura 2.4. Escalas de espaço e tempo associado a fenômenos atmosféricos mais comuns



Fonte: SILVA, 2003. Adaptado de ORLANSKY (1975)

Os sistemas de mesoescala são divididos por ORLANSKI (1975) em três “submesoescalas”: (a) Meso- γ (2-20 km); (b) Meso- β (20-200 km) e (c) Meso- α (200-2000 km), como mostrado na Tabela 2.1. Os modelos de previsão numérica do tempo são normalmente usados para simular fenômenos presentes nessa escala, tais como as brisas marítimas e terrestres, processos convectivos e o comportamento dos ventos alísios (RAMOS; LYRA; JUNIOR, 2013); (JIMÉNEZ-ESTEVE et al., 2018); (KUNIN; ALPERT; ROSTKIER-EDELSTEIN, 2019).

Tabela 2.1. Escala dos movimentos na atmosfera.

Maior que	Escala	Nome
20.000 km		Escala Planetária
2.000 km		Escala Sinótica
200 km	Meso- α	Mesoescala
20 km	Meso- β	
2 km	Meso- γ	
200 m	Micro- α	Turbulência na Camada Limite
20 m	Micro- β	Turbulência na Superfície
2 m	Micro- γ	Turbulência Inercial (“Small eddies”)
2 mm	Micro- δ	Turbulência em escala fina
Moléculas do ar	Molecular	Dissipação viscosa

Fonte: Adaptado de Wallace & Hobbs (2006)

Em virtude dos diferentes mecanismos dinâmicos em várias partes do globo, os ventos locais ou de microescala são fortemente influenciados pelas condições de superfície, principalmente vegetação, relevo e obstáculos. Pode-se ter como exemplos os sistemas de brisas marítimas e de lagos e terrestres de vale e montanha (FERREIRA, 2020).

2.2 O Regime de Ventos no Nordeste Brasileiro

O Nordeste brasileiro é impactado por alguns fenômenos meteorológicos em grande escala que influenciam no regime de ventos e chuvas. A ZCIT tem um deslocamento sazonal que provoca uma variação de intensidade dos ventos, especialmente na porção norte e leste do Nordeste brasileiro (NEB). Nos meses de fevereiro a maio, ela direciona-se para posições mais ao sul, causando chuvas nessa faixa e diminuindo a intensidade dos ventos (CARVALHO; OYAMA, 2013). Nos meses de junho até novembro, segundo GILLILAND e KEIM (2018), ocorre a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), um sistema de alta pressão associada à circulação média meridional na atmosfera. Quando a ASAS está próximo ao continente sul-americano, os ventos de sudeste/leste que chegam no litoral nordestino se intensificam (MOSCATI; GAN, 2007). Entre abril e julho, a influência dos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) provocam chuvas e reduzem a intensidade dos ventos (GOMES et al., 2019). Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) também tem um papel fundamental na distribuição de chuvas sobre o NEB, que conseqüentemente interfere na variabilidade sazonal do vento (FEDOROVA et al., 2016).

Em alguns anos, as anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico Tropical e no Pacífico Equatorial podem alterar o regime padrão dos sistemas atmosféricos no NEB. A variabilidade dos oceanos Pacífico e Atlântico tropicais estão associadas a circulação de Walker, de modo que alteram o padrão de precipitação sobre a América do Sul (FIGLIUOLO, 2017). Esta variabilidade caracterizada pelo aquecimento ou resfriamento das águas superficiais do oceano Pacífico Tropical Central e do Leste, pode ser classificada como El Niño e La Niña, respectivamente. Oliveira e Costa (2011) mostram que para eventos de ENOS (El Niño-Oscilação Sul) mais intensos, o El Niño pode intensificar e a La Niña enfraquecer os ventos sobre essa região.

Estudos sobre ventos no NEB mostram que durante a estação seca a velocidade do vento é mais forte em virtude da intensidade dos ventos alísios e dos fenômenos de brisas associados nesse período (ROBALLO; FISCH, 2008; SANTOS; SILVA, 2013). A turbulência na estação seca é menor que na estação chuvosa que possui ventos com menor intensidade e maior variação.

SILVA (2003) apresentou um estudo com um levantamento das particularidades do vento na região nordeste. Em seu trabalho foram levantadas características para identificar e definir as regiões eólicas do NEB sendo essas as principais:

- Intensidade do vento: Relacionado às ocorrências de velocidades médias do vento. Os ventos mais intensos possuem altos valores de velocidade média;
- Dispersão das ocorrências: Relacionado ao comportamento das ocorrências de velocidade de vento. Ventos com baixa dispersão apresentam maior número de ocorrências próximo ao valor médio;
- Constância direcional: Relacionado a mudança na direção do vento. Quanto mais alta a constância, menor será o número de setores de direção que ocorre fluxo de vento;
- Valores extremos: Relacionado aos maiores valores instantâneos de velocidade do vento para o período de 1 ano e 50 anos.
- Níveis de turbulência: Relacionado à variância dos valores instantâneos da velocidade do vento. Ventos com altos níveis de turbulência, podem causar efeitos negativos às máquinas eólicas;
- Gradiente vertical: Relacionado ao perfil vertical da velocidade do vento. Ventos com alto gradiente vertical, apresentam maiores diferenças de velocidades em alturas;
- Variação sazonal: Relacionado ao comportamento da velocidade média ao longo do ano. Quanto menor a variação sazonal, menor a diferença de velocidade média entre os meses do ano;
- Regularidade interanual: Relacionado ao comportamento da velocidade média anual. Alta regularidade representa uma menor variação da média anual ao longo dos anos.

O trabalho de SILVA (2003) divide o Nordeste em três grandes regiões eólicas, a região que abrange o interior do Nordeste pode ser dividida em duas sub-regiões. A Figura 2.5 mostra esta área do Nordeste Continental com as suas sub-regiões. Na primeira sub-região, a intensidade do vento diminui à medida que se afasta do litoral em virtude das barreiras naturais, orografia regional, rugosidade da superfície e diminuição gradual das brisas marítimas.

Figura 2.5. Nordeste Continental e suas sub-regiões.



Fonte: Adaptado de SILVA,2003

A Sub-região 2 apresenta áreas de relevos elevados, serras e chapadas que se estendem desde o Rio Grande do Norte até a Bahia, as ocorrências de altas velocidades de vento se encontram de forma localizada, em áreas que apresentam fortes brisas de montanhas/vales ou onde a canalização e a compressão vertical dos ventos são mais acentuadas. Nessa região, observam-se também ocorrências de brisas de lago, como no entorno da Barragem de Sobradinho na Bahia e da barragem de Itaparica, na divisa de Pernambuco com a Bahia (CORREIA; DIAS; ARAGÃO, 2006b). As características dos ventos desta Sub-região favorecem a instalação de usinas eólicas, principalmente no Estado da Bahia, que atingiu o número de 272 parques ao final de 2022 (CCEE,2023). O Estado ocupa a liderança no ranking da matriz elétrica brasileira em geração eólica. A Tabela 2.2 sumariza de forma concisa os principais mecanismos e características dos ventos da sub-região 2 do Nordeste Continental:

Tabela 2.2. Características dos ventos na sub-região 2 do Nordeste Continental.

Principais Mecanismos dos Ventos			
1. Ventos Alísios (Positivamente influenciados pela orografia) 2. Brisas de montanha e vales			
Características dos Recursos Eólicos			
Intensidade do vento	Alta	Níveis de Turbulência	Altos
Dispersão das ocorrências	Moderada	Gradiente Vertical	Alto
Constância direcional	Moderada	Variação Sazonal	Alta
Valores Extremos	Altos	Regularidade internaual	Alta

Fonte: adaptado de SILVA, 2003

2.3 Ventos Costeiros e de Bordas de Lagos

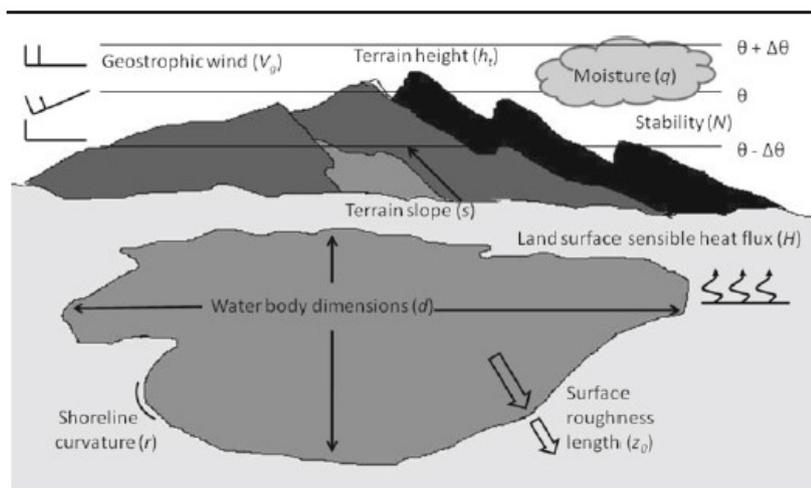
2.3.1 Brisas Marítimas e Lacustres

A brisa é uma circulação atmosférica gerada por diferenças de temperatura entre duas regiões, mais comumente associada a interfaces entre terra e mar. A água tem uma capacidade térmica muito elevada, por isso aquece mais lentamente que a terra em seu redor. A massa de ar por cima da terra irá se expandir mais rápido do que a que está por cima da água, criando assim uma diferença de pressão entre ambos, originando um deslocamento do ar sobre o mar ou lago para a terra, denominada de brisa de mar (SB - sigla em inglês) ou lacustre (LB – sigla em inglês). O ar vindo do mar ou lago é aquecido e sobe e essa subida causa um aumento de pressão a altitudes mais elevadas, onde o efeito da descontinuidade da temperatura já não existe, criando assim um deslocamento no sentido oposto, dando origem a uma célula de circulação de retorno de terra para o mar ou lago. De noite, sem o aquecimento do Sol, o corpo d'água arrefece mais lentamente que a terra criando assim uma circulação mais fraca no sentido oposto, denominada de brisa de terra (SIMPSON, 1994).

As brisas marítimas, de golfos, de lagos e de rios são circulações locais impulsionadas pelo aquecimento diferencial entre a terra e a água (CROSMAN; HOREL, 2010). A dinâmica e as propriedades básicas desses sistemas acionados termicamente, referidos coletivamente como brisas marítimas (SB) e brisas lacustres (LB) têm sido estudados extensivamente desde 1950 (SIMPSON 1994; MILLER et al. 2003). CROSMAN e HOREL (2010) realizaram uma pesquisa com foco na modelagem das SB em 10 variáveis conforme Figura 2.6 : Fluxo de calor sensível da

superfície terrestre (H), que estabelece a diferença de temperatura terra-mar, vento geostrófico ambiente (V_g), estabilidade atmosférica (N), umidade atmosférica (q), dimensões do corpo d'água (d), altura do terreno (h_t), inclinação do terreno (s), parâmetro de Coriolis (f), comprimento da rugosidade aerodinâmica da superfície (z_0) e curvatura da linha de costa (r). Quatro dessas variáveis variam significativamente ao longo do tempo em um determinado local em função da estação, teor de umidade do solo e estado atmosférico (H , V_g , N e q), enquanto as seis restantes são de modo geral invariantes temporalmente em qualquer local (d , h_t , s , f , z_0 e r).

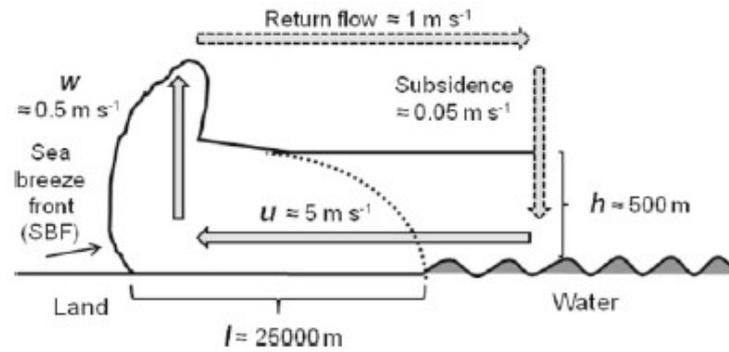
Figura 2.6. Variáveis que controlam as brisas marinhas e lacustres.



Fonte: adaptado (CROSMAN; HOREL, 2010)

Os efeitos das variáveis nas características das brisas marítimas geralmente são analisados em termos de quatro medidas amplamente utilizadas: a distância máxima de penetração em terra da frente de brisa marítima (SBF – sigla em inglês) representado por l em m, h representa a profundidade em m e u e w a velocidade do fluxo terrestre da brisa marinha em $m\ s^{-1}$, em níveis baixos perto da linha da costa, na orientação horizontal e vertical respectivamente. A Figura 2.7 ilustra estes efeitos e indica alguns valores característicos (CROSMAN; HOREL, 2010).

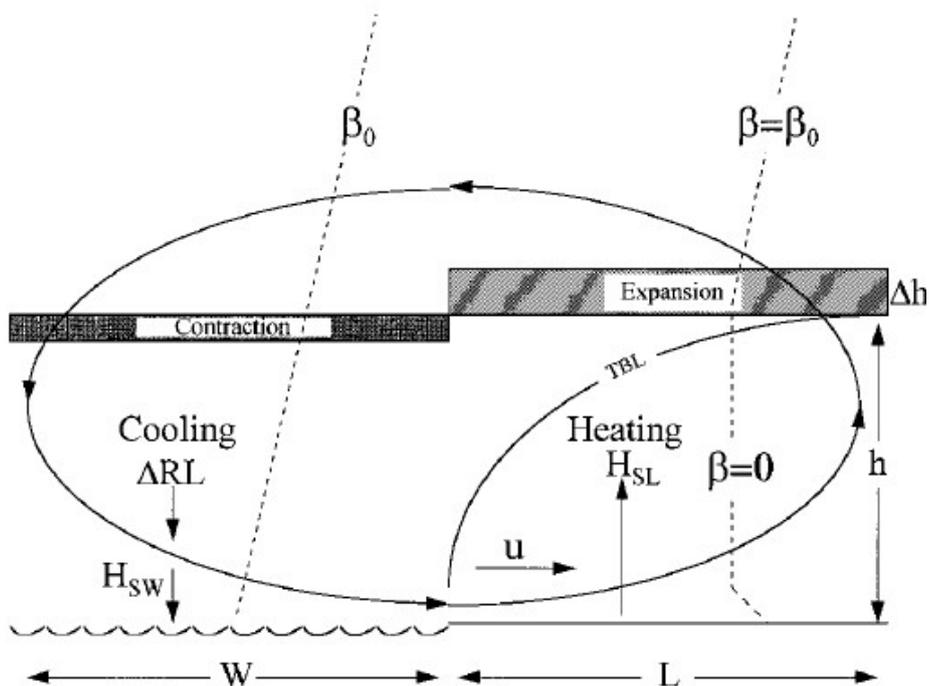
Figura 2.7. Ilustração esquemática de um sistema de brisa marítima.



Fonte: (CROSMAN; HOREL, 2010)

A circulação das LB é forçada pela conversão de energia potencial em energia cinética através da redistribuição de massa. A energia potencial disponível para esta conversão é gerada pela expansão da camada limite em terra devido ao aquecimento diabático e, em menor grau, pela contração da massa de ar na água devido ao resfriamento diabático (PIELKE, 1984). A Figura 2.8 apresenta um modelo de escala simplificado proposto por SEGAL (1997) das características associadas a análise da circulação da brisa lacustre LB para condições de verão em latitudes médias. O modelo apresentado por SEGAL (1997) para LB tem muitas similaridades com o modelo apresentado por CROSMAN e HOREL (2010) para a SB.

Figura 2.8. Ilustração esquemática de características relacionadas a avaliação da circulação da LB.



Fonte: (SEGAL; (1997)

Ao contrário das brisas marítimas, cujas características são amplamente documentadas como em ATKINSON (1981) e PIELKE (1984), por exemplo, não houve uma tentativa de caracterização observacional sistemática das brisas lacustres (LB). Isso ocorre em parte porque há menos estudos sobre brisas lacustres do que sobre brisas marítimas. (SEGAL, 1997).

2.4 Ventos na Região do Lago de Sobradinho.

MELO, ARAGÃO e CORREIA (2014), analisaram os regimes do vento à superfície na área de Petrolina-PE e seus resultados mostram que as velocidades médias horárias aumentam (diminuem) no decorrer do trimestre abril-maio-junho (outubro-novembro-dezembro), devido à intensificação (enfraquecimento) da ASAS. No trimestre julho-agosto-setembro os valores são máximos e muito próximos, com direção no intervalo 120° – 130°.

Por outro lado, SILVA et al. (2016) analisando a influência de circulações locais em áreas de aproveitamento de potencial eólico na região do Lago de Sobradinho observaram que os máximos principais e secundários ocorrem predominantemente no início da manhã e final da tarde. Esse padrão pode sugerir um acoplamento entre a brisa terrestre (lacustre) e os ventos catabáticos (anabáticos) no período da madrugada-início da manhã (final da tarde- início da noite). Resultados de estudos anteriores CORREIA e DIAS (2003); CZARNOBI, PRUDÊNCIO e RODRIGUES (2006) sobre regiões influenciadas por lagos formados devido ao represamento para construção de hidrelétricas, também evidenciam que as máximas intensidades da brisa lacustre (terrestre) ocorrem no final da tarde (início da manhã) e corroboram estas observações.

2.5 Sensoriamento Remoto LIDAR

Instrumentos de sensoriamento remoto como o LIDAR e Sonic Detection and Ranging (SODAR) têm sido muito utilizados no segmento de energia eólica, principalmente em pesquisas offshore, e tem demonstrado alta confiabilidade para medições de vento (SCHULZ-STELLENFLETH et al., 2022; LI; YU, 2017). O instrumento LIDAR possibilita as seguintes vantagens: é uma alternativa mais econômica em comparação com torres anemométricas; pode medir dados de vento até 200 m acima do nível do solo; instrumento pode ser instalado no solo e é fácil de

remover; é muito pouco dependente do ser humano para sua operação já que a maioria dos processos são automatizados. O desenvolvimento da tecnologia LIDAR oferece operação contínua, mais fácil, conveniente e precisa para medir perfis de vento (LI; YU, 2017).

O princípio básico do LIDAR depende da medição do efeito Doppler de radiação espalhada por aerossóis naturais transportados pelo vento, tais como: gotículas de água, pólen ou poeira. Estes aerossóis refletem a luz do laser e essa luz é medida no fotodetector do LIDAR e pode ser convertida em velocidade e direção do vento (SMITH, et al. 2006).

2.6 Dados de Modelagem Numérica

2.6.1 Modelos de Simulação e Previsão Numérica do Tempo.

Uma ferramenta muito útil na análise dos fenômenos meteorológicos são os modelos de previsão numérica do tempo, embora sejam modelos matemáticos complexos e demandem custos operacionais proporcionais à resolução da precisão, estes são muito utilizados, principalmente em pesquisas científicas (JUNIOR, 2020). Esses modelos como fonte de dados oferecem vantagens como: baixos custos operacionais, se comparados com os dispositivos geralmente utilizados para medição de dados meteorológicos, maior resolução de amostragem (horizontal e vertical, permitindo o cálculo de conjuntos de dados de vento virtual para vários locais em diferentes alturas) quando comparado com estações de medição de vento e eles oferecem conjuntos de dados com 100% de disponibilidade. Por outro lado, existem desvantagens devido à incerteza associada aos derivados desses tipos de modelos: os modelos numéricos não representam o estado real da atmosfera porque os modelos de simulação atmosférica são, por definição, uma aproximação da atmosfera real (CARVALHO et al., 2013).

2.6.2 Modelo de Previsão Numérica do Tempo WRF

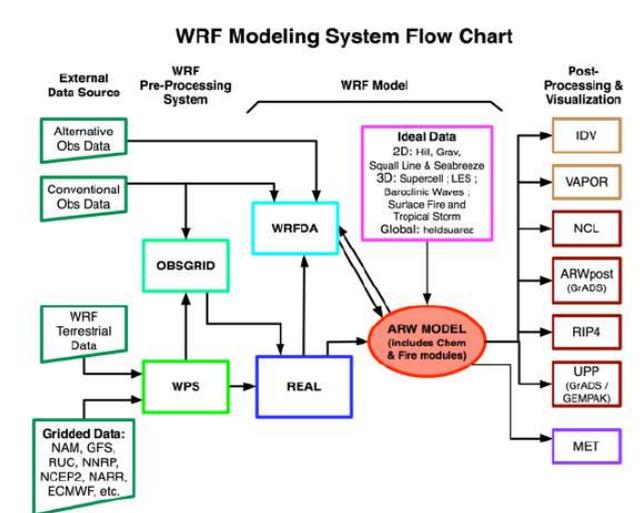
Neste trabalho foi usado o modelo de previsão numérica do tempo Weather Research and Forecasting (WRF). É um modelo que pode ser aplicado para fins de pesquisa, previsão do tempo e modelagens climáticas com aplicações industriais. Foi

desenvolvido em conjunto por instituições e agências governamentais norte americanas como *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), *Forecast Systems Laboratory* (FSL), *Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory*, *Oklahoma University* e *Federal Aviation Administration* (FAA), lideradas pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) (SKAMAROCK et al, 2021).

Considerando uma atmosfera não hidrostática e utilizando um sistema de coordenada vertical que se adapta as variações topográficas, o modelo WRF resolve numericamente as equações de Navier-Stokes em três dimensões, a equação termodinâmica e a equação de transferência radiativa (SILVA, 2018). O modelo é totalmente compressível, euleriano e pode ser integrado em modo não-hidrostático. Possui um conjunto de soluções dinâmicas que operam com projeções geográficas, aninhamento de grades e sistema de coordenadas verticais particulares, dispõe das mais variadas parametrizações para os principais processos físicos da atmosfera (RICHARDSON, TOIGO, NEWMAN, 2007). Segundo OLIVEIRA; SILVA; GOMES (2010) estes processos são representações dos parâmetros físicos, que não podem ser resolvidos diretamente por modelos numéricos. As parametrizações físicas, que são utilizadas na simulação com o WRF, incluem: parametrização de microfísica de nuvens (MP), parametrização da Camada Limite Atmosférica (CLA), parametrização de superfície, parametrização de cumulus (CP) e parametrização de radiação.

Segundo SKAMAROCK et al. (2021) e WRF USERS PAGE (2023) o modelo é dividido em três diferentes etapas conforme Figura 2.9: o pré-processamento do sistema (WPS), o processamento dos dados por integração numérica (ARW) e o pós-processamento.

Figura 2.9 Fluxograma do modelo WRF



Fonte: WRF Users Page, (2023)

O pré-processamento é composto por três programas e consiste em preparar os dados de entrada do sistema para execução no programa real.exe, que se encontra no núcleo de processamento do WRF, sendo constituído por:

1. Geogrid: define os domínios da área que será simulada e prepara os dados do terreno.
2. Ungrib: transforma os arquivos GRIB (general regularly-distributed information in binary form) em pacotes intermediários de informações que servirão como condições iniciais e de fronteira lateral.
3. Metgrid: interpola os dados de saída do ungrib para o domínio do modelo, definido no geogrid.

A etapa ARW é dividida em dois programas: real.exe e wrf.exe. O primeiro requer o pré-processamento via WPS e realiza a interpolação vertical, apresentando padrões condizentes às grades do modelo. Já o wrf.exe realiza o processo numérico de integração, fornecendo os dados simulados. Esta segunda etapa resolve equações de Euler não-hidrostáticas em planos η , utilizando o método Runge-Kutta de 3ª ordem para integrar modos de baixa frequência, ao passo que os modos de maior frequência são integrados com um Δt menor para manter a estabilidade numérica do método.

Após o processamento de todos os dados, são gerados arquivos de saída que devem ser visualizados e analisados em uma etapa de pós-processamento, em plataformas como o GrADS (*Grid Analysis and Display System*), o VAPOR (*Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere and Solar Researchers*)

e o *NCAR Command Language* (NCL), uma linguagem de script que fornece recursos especializados de visualização e análise adaptados para dados climáticos e meteorológicos, desenvolvida por grupos científicos do NCAR e UCAR. (SKAMAROCK, 2021; HALEY et al., 2019).

2.7 Acoplamento de Modelos Mesoescala e Microescala.

O interesse em simular o comportamento do vento através de modelos numéricos movimentou o setor de energia em busca do melhor detalhamento de regiões com elevado potencial eólico (RAMOS; LYRA; JUNIOR, 2013; WANG; SHEN; LIU, 2018; SOUZA et al., 2022; TAVARES et al., 2022). Os modelos de mesoescala e microescala incluem os efeitos de características topográficas, como obstáculos e rugosidade do terreno. Segundo POUDEL, TINNESAND e BARING-GOULD (2020), de maneira geral os modelos têm dificuldade em capturar a física atmosférica perto da superfície da terra.

Os modelos de microescala apresentam uma maior resolução, levando em consideração dados coletados na área de estudo, o que os tornam mais adequados para fins de estimar o aproveitamento eólico (YEMER, 2010; VIEIRA, 2020; BUHR et al., 2021). As técnicas de microescala simulam tridimensionalmente o vento no interior da CLA e sua interação com a topografia e efeitos rugosos da superfície.

Uma das principais limitações dos modelos de mesoescala é a sua representação simplificada do terreno real (topografia, rugosidade etc.), devido aos dados insuficientes de detalhes fornecidos e pela resolução normalmente utilizada nos domínios de simulação (normalmente entre 3 e 5 km) que não é suficiente para representar realisticamente as características do terreno. Conseqüentemente, o vento simulado pelo modelo de mesoescala terá desvios em relação ao vento real devido, em parte, a esta simplificação da representação do terreno (CARVALHO et al., 2013).

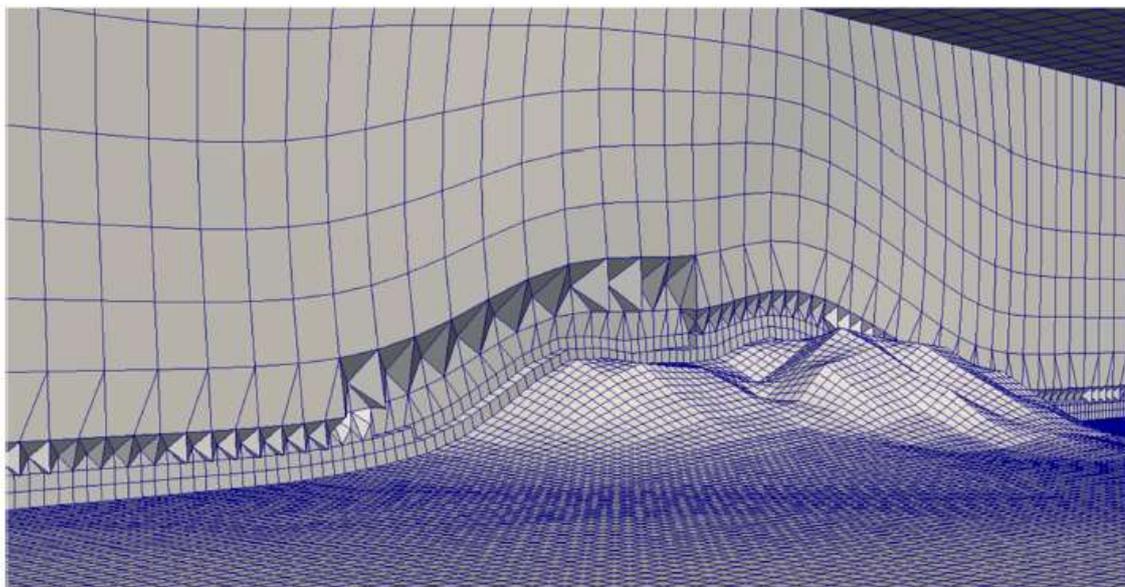
Segundo CARVALHO et al. (2013) geralmente os modelos de microescala utilizam como entrada a saída de um modelo de numérico padrão para reduzir a escala das características do vento local. Os modelos de maior resolução (microescala) utilizam a conservação de massa e em alguns casos também da quantidade de movimento, e fluxos de calor em uma grade de alta resolução que consegue representar melhor as características individuais do terreno. A redução de escala dinâmica pode ser feita em regime permanente (estacionário) para cada tempo da

saída do modelo de mesoescala. Uma vantagem de usar essa redução de escala de estado estacionário é que a resolução espacial pode ser aumentada com baixo custo computacional (WAGENBRENNER et al., 2016).

2.7.1 O modelo de Microescala WindNinja.

WindNinja é um programa de computador que calcula campos de vento variando espacialmente para aplicações de incêndio florestal. Ele é projetado especificamente para simular o efeito do terreno no fluxo do vento (FIRELAB, 2018). De acordo com WAGENBRENNER et al. (2016), o WindNinja usa uma técnica de cálculo variacional para minimizar a mudança em um campo de vento inicial enquanto conserva a massa localmente (dentro de cada célula) e globalmente sobre o domínio computacional. A solução numérica é obtida usando técnicas de método dos elementos finitos (FEM – sigla em inglês) em uma malha que segue o terreno consistindo em camadas de células predominantemente hexaédricas que crescem verticalmente com a altura conforme Figura 2.10.

Figura 2.10 Malha computacional usada para representar a elevação Big Southern Butte.

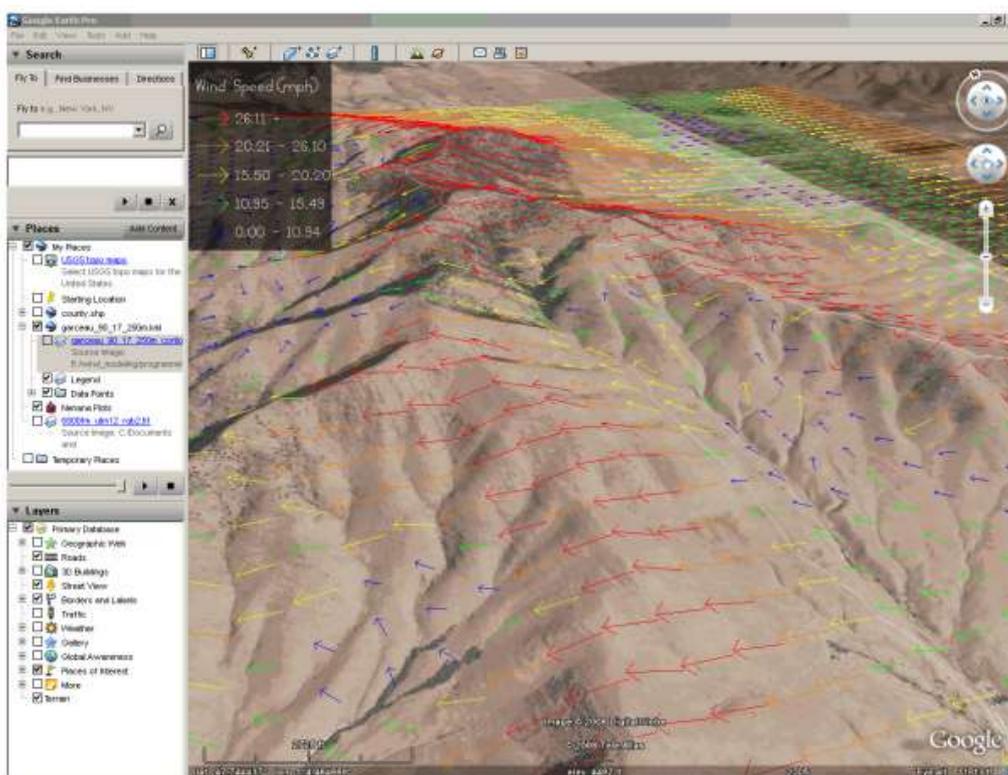


Fonte WAGENBRENNER, 2019

O WindNinja tem a capacidade de obter automaticamente as informações necessárias de modelos de mesoescala, como o WRF, para fazer as simulações. Usando este método, o WindNinja pode indiretamente fornecer uma previsão no tempo, uma vez que faz uma simulação em alta resolução para cada passo de tempo oriundo modelo de previsão de mesoescala (FIRELAB, 2018).

As variáveis de entrada, *inputs*, para execução do modelo são: um arquivo de dados de elevação para a área de modelagem, médias de velocidade e direção do vento e especificação da vegetação dominante na área. As saídas do WindNinja podem ser usadas para visualizar o fluxo do vento em mapas e para incorporação em modelos de simulação de incêndio. Para visualizar o fluxo de vento, várias opções estão disponíveis para o usuário. Provavelmente, o mais conveniente é usar a versão gratuita do Google Earth, usando o arquivo de saída do vento no formato *.kmz, conforme Figura 2.11 (FIRELAB, 2018).

Figura 2.11. Visualização do fluxo de vento gerado no WindNinja com o Google Earth.



Fonte. FIRELAB, 2018

A redução de escala com o WindNinja melhora a previsão de ventos de superfície sob condições de vento forte (próximo da estabilidade atmosférica neutra). Os resultados não foram tão bons em outras condições de estabilidade atmosférica, ainda assim as previsões de direção do vento geralmente melhoram com esta redução de escala (WAGENBRENNER et al., 2016). Segundo JÚNIOR (2020), o WindNinja obtém bons resultados de previsão tanto em terrenos complexos como em terrenos relativamente planos, o software consegue melhorar os dados modelados no WRF e fornecer informações mais ricas e detalhadas. Outras vantagens do uso do WindNinja: tempo de simulação curto, baixa exigência computacional, sendo executado

perfeitamente em computadores de pequeno porte, sistema de fácil compreensão técnica e operacionalização.

2.8 Estudos Recentes de Análises Meteorológicas em Regiões Costeiras e de Lagos

Inúmeros estudos de análise de circulação do ar em diversas regiões costeiras e de bordas de lagos ao redor do mundo têm sido produzidos com objetivos e motivações variados. Em alguns a motivação é a questão ambiental, qualidade do ar e dispersão de poluentes devido a concentração populacional e industrialização como por exemplo HARI PRASAD et al. (2019), na região costeira de Kalpakkam na Índia, e ZHANG et al. (2019) no lago Taihu na China. Outros estudos têm por objetivo análises para viabilização de projetos de geração eólica como PELLEGRINI et al. (2016) nos reservatórios das UHEs Itumbiara – GO e Três Marias – MG no Brasil, LI e YU (2017); LI e YU (2018) no lago Erie em Cleveland e MAGEAU et al.(2016) no Lago Superior em Minnesota nos Estados Unidos, ASSIREU, PIMENTA e SOUZA, (2011) em diversos reservatórios de hidroelétricas no Brasil. Além disso, existem também estudos para avaliação de instalações de geração eólica em operação como SCHULZ-STELLENFLETH et al. (2022) na Baía Germânica e alguns estudos motivados por análise de impacto climático de reservatórios artificiais como por exemplo WANG, LIU e MA (2012), em um reservatório em Hanyuan County na China, e EKHTIARI et al. (2017) no lago de Sobradinho-BA no Brasil. Dentro deste espectro é evidente a contribuição da indústria da energia eólica em pesquisas, no avanço das formas de modelagem e tecnologias para medição física das variáveis utilizadas em estudos meteorológicos na CLA.

Neste contexto, as ferramentas utilizadas para as pesquisas são as mais variadas e dependem muitas vezes da disponibilidade de dados ou recursos para obtenção destes, das características da região de busca e dos objetivos a serem alcançados. A maioria dos trabalhos utilizam uma combinação de dados obtidos por um meio físico e dados obtidos por métodos numéricos tais como, HARI PRASAD et al. (2019) com dados de SODAR e WRF, NASCIMENTO (2015) com Radiossondas e WRF e PELLEGRINI et al. (2016) que utilizou dados de ventos coletados de uma bóia

no reservatório de Itumbiara - GO e os comparou com WRF. Outros utilizam dados obtidos por múltiplos meios físicos confrontados com métodos numéricos, como SILVA (2018) que utilizou dados de SODAR, estações meteorológicas e WRF, PELLEGRINI et al. (2019) que utilizaram dados de LIDAR torre anemométrica e o modelo WRF e SCHULZ-STELLENFLETH et al., (2022) que utilizaram Radar de Abertura Sintética (SAR - sigla em inglês), LIDAR e o modelo WRF.

Os efeitos que ocorrem na camada limite atmosférica na transição terra-água ou água-terra são por vezes demasiadamente complexos de forma que os modelos numéricos não conseguem representar com precisão e os dispositivos de medição físicos não conseguem captar todas as situações, nesse ponto as combinações dos modos de coletas de informações são muito úteis para conseguir ampliar o espectro de informações e ter uma melhor representação dos processos (SCHULZ-STELLENFLETH, 2022). Essa combinação também é válida para utilizar as medições físicas como uma forma de verificação ou validação das simulações numéricas.

Apesar disso, existem trabalhos que utilizaram somente dados físicos pontuais: ASSIREU, PIMENTA e FREITAS (2016) e SILVA et al. (2016) que utilizaram dados de torres anemométricas e os que usaram somente dados físicos de sensoriamento remoto como LIDAR: LI e YU (2017); LI e YU (2018) e SODAR. Outros estudos utilizaram somente dados simulados como WANG (2012) na China e PELLEGRINI et al., (2016) no reservatório de Três Marias – MG no Brasil. As medições físicas por muitas vezes são processos de alto custo financeiro SCHULZ-STELLENFLETH, (2022); LI e YU (2017), assim a utilização de modelos numéricos surge com uma alternativa viável e com a possibilidade de gerar diversas informações de todas as variáveis meteorológicas e em um espectro espacial amplo. A maioria dos que atualmente utilizam de métodos numéricos usam o modelo WRF que é considerado estado da arte em simulações atmosféricas para uma variada gama de aplicações (SKAMAROCK et al., 2021).

As análises dos dados obtidos, a depender do aspecto a ser compreendido, podem ser feitas de formas diversas: perfis horários, diários, mensais, sazonais e históricos. Diversos tipos de ferramentas de visualização podem ser utilizadas: tabelas comparativas, gráficos de séries temporais, distribuição de Weibull, rosas dos ventos, gráficos de pena e hodógrafos, sendo os três últimos mais específicos para intensidade e direção do vento (ASSIREU; PIMENTA; FREITAS, 2016; SILVA et al., 2016; LI; YU, 2017; TORMA; KRÁMER, 2016), mapas de distribuição (PELLEGRINI

et al. , 2016) , campos vetoriais de vento (WANG; LIU e MA, 2012); (ZHANG et al. , 2019), perfis verticais e longitudinais (HARI PRASAD et al., 2019; SILVA , 2018).

O Conhecimento da CLA e da camada limite interna (CLI) é um importante aspecto para projeto, implantação e operação de parques eólicos. A CLI depende de diversos fatores, tais como: intensidade do vento, rugosidade superficial, orografia e fluxos de calor e umidade. Estas características sofrem mudanças particularmente abruptas no entorno de sistemas aquáticos como lagos, reservatórios hidroelétricos e regiões costeiras (ASSIREU; PIMENTA; FREITAS, 2016). Uma das formas de entender a CLI, na fronteira água-terra, é com medições do perfil vertical de variáveis meteorológicas obtidas por torres, radiossondagens, aeronaves tripuladas ou autônomas ou ainda com sensoriamento remoto LIDAR e SODAR. Devido ao alto custo dessas técnicas (SCHULZ-STELLENFLETH, 2022), uma alternativa é lançar mão de extrapolação baseada em modelos matemáticos como, lei de potência, perfil logarítmico e Monin-Obukhov para determinar, por exemplo, a velocidade do vento em diversas alturas (ASSIREU; PIMENTA; SOUZA, 2011; ASSIREU; PIMENTA; FREITAS, 2016).

Nessa perspectiva, alguns estudos têm obtido êxito na identificação e na quantificação da influência das brisas marítimas na CLI, como evidenciado por PRASAD et al. (2019) em sua pesquisa conduzida na costa de Kalpakkam, Índia, e por SILVA (2018) em sua investigação realizada na Baía de Santa Cruz, no estado do Rio de Janeiro. Esses estudos empregaram análises de perfis verticais e espaciais, os quais foram construídos com base em dados obtidos por meio de instrumentação SODAR e por meio de simulações utilizando o modelo WRF.

Por outro lado, IAKUNIN, SALGADO e POTES (2018) e NASCIMENTO (2015) não conseguiram identificar a formação de CLI, mas identificaram, qualificaram e quantificaram a influência da brisa, sobre o reservatório de Alqueva em Portugal, e na vizinhança adjacente. Em seus trabalhos utilizaram gráficos espaciais e perfis verticais de vetores de vento cujos dados foram extraídos de simulações com modelos de mesoescala MESO NH acoplado com o esquema FLake e validados com medições de radiossondas e estações meteorológicas obtidos em uma campanha denominada ALqueva hydro-meteorological EXperiment (ALEX) realizada em 2014. Na região de Sobradinho – BA, EKTHIARI et al. (2017) com gráficos espaciais de vetores de vento obtidos de simulação com o COSMO-CLM, CORREIA, DIAS e ARAGÃO (2006b) com simulações no modelo Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) e SILVA et al.

(2016) com hodógrafos obtidos de dados de torre anemométrica, conseguiram obter evidências das brisas lacustres no lago de Sobradinho e em seu entorno.

2.8.1 Pesquisas em Lagos ou Reservatórios de Usinas Hidrelétricas.

Lagos naturais e grandes reservatórios artificiais podem afetar o regime climático de seu entorno, mas a avaliação de todos os aspectos desse impacto e sua quantificação não é tarefa fácil (IAKUNIN; SALGADO; POTES, 2018). A dificuldade em caracterizar as brisas de lagos pequenos e médios decorre da diversidade de formas dos lagos, da complexidade do terreno circundante e da falta de observações de alta resolução espacial (SEGAL, 1997; WANG et al., 2017). As brisas do lago são determinadas principalmente pela topografia e pelas condições climáticas. A formação e a intensidade da brisa dependem do conjunto de parâmetros, como ventos de grande escala, fluxo de calor sensível, geometria do lago e tipos de terreno da área circundante (SEGAL et al., 1997; CROSMAN e HOREL, 2012).

Trabalhos e pesquisas de potencial eólico em lagos são poucos se comparados aos trabalhos em costas marítimas, apesar do conhecimento de que estes corpos d'água tem características que favorecem a intensidade e persistência dos ventos. Os Estados Unidos se destacam neste quesito pelas pesquisas na região dos grandes lagos (LI; YU, 2017; LI; YU, 2018; MAGEAU et al., 2016; MUSIAL et al., 2023; DECASTRO et al., 2019).

No contexto brasileiro, destacam-se estudos relacionados aos reservatórios de usinas hidroelétricas, onde são ressaltadas vantagens desses locais:

- Os vales dos rios represados geram regiões de convergência para o vento, favorecendo sua intensificação e persistência direcional ASSIREU, PIMENTA e SOUZA (2011), NASCIMENTO (2015), também não podem ser desprezados a influência da diferença de rugosidade e de fluxos de calor nas fronteiras terra-água (LAIRD; WALSH; KRISTOVICH, 2003).
- Já existe infraestrutura de transmissão de energia elétrica instalada para escoamento da produção das hidroelétricas.

Energia eólica, solar e hidráulica possuem uma complementaridade (SILVA, et al., 2016; ROSA et al., 2020; LUZ; MOURA, 2019). Assim, o reservatório pode funcionar como um elemento armazenador de energia (ASSIREU, PIMENTA e SOUZA, 2011; DANSO et al., 2021) tornando possível estabelecer uma gestão

integrada de uma planta de energia renovável de múltiplas fontes primárias, como nesta ilustração da Figura 2.12, nas proximidades dos lagos de usinas hidrelétricas.

Figura 2.12. Plantas integradas de energia renovável.



Fonte: Shutterstock/Alberto Masnovi.

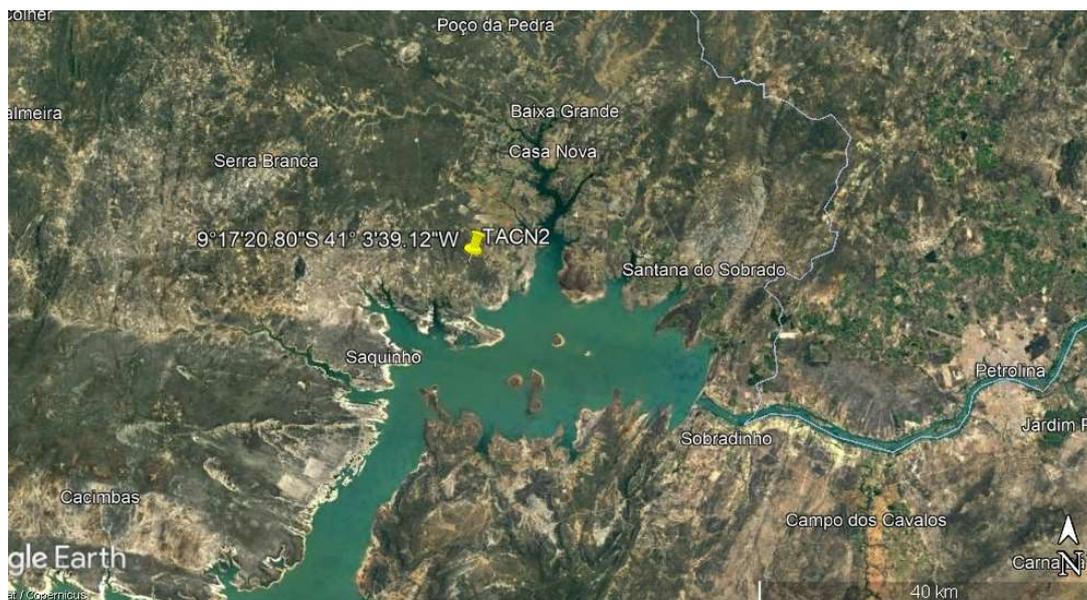
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Características da Região: Margens do Lago de Sobradinho

A região do objeto de estudo, mostrada na Figura 3.1 fica às margens de um grande lago artificial construído na década de 70 para fazer a regularização plurianual do curso do rio São Francisco, elevando a vazão mínima de $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para cerca de $2060 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, garantindo assim o funcionamento contínuo das usinas à jusante de Sobradinho, particularmente as de Paulo Afonso (CORREIA; DIAS, 2003).

O Lago Sobradinho está situado na região denominada Baixo-médio São Francisco uma das regiões mais áridas do Nordeste brasileiro. O enchimento do lago começou em 1976, atingindo sua capacidade máxima em 1978. A capacidade total da barragem, forma um lago de $4.214,31 \text{ km}^2$ com 280 km de extensão e largura variando de 5 a 50 km, pode armazenar 34 bilhões m^3 de água (ELETROBRAS-CHESF, 2023).

Figura 3.1. Região do objeto de estudo.

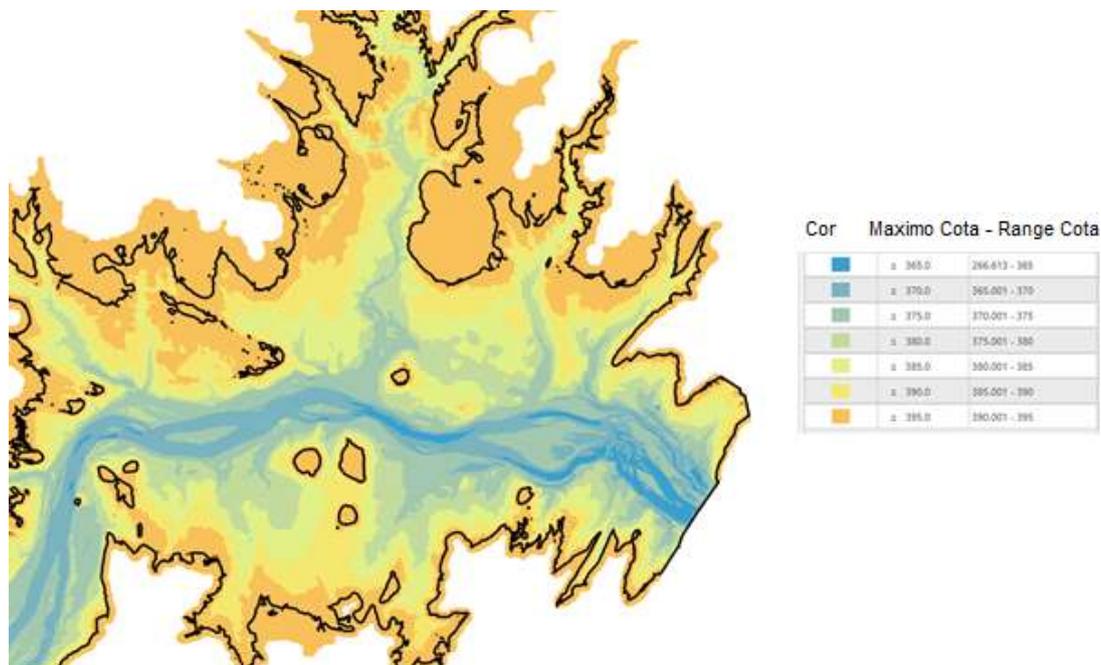


Fonte: Google Earth

Na barragem do lago está instalada a Usina Hidrelétrica de Sobradinho que está localizada no município de mesmo nome no estado da Bahia a uma distância de cerca de 40 km rio acima das cidades de Juazeiro-BA e Petrolina-PE. Construída pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) a usina iniciou suas operações em novembro 1979. A usina está localizada no Rio São Francisco, o principal rio da região Nordeste do Brasil, com uma bacia hidrográfica de 630.000 km², e uma extensão de 3.200 km, desde sua nascente na Serra da Canastra, estado de Minas Gerais, até a foz na costa atlântica em Piaçabuçu (estado de Alagoas) e Brejo Grande (Estado de Sergipe) (ELETROBRAS-CHESF, 2023).

A profundidade dos reservatórios artificiais diminui rapidamente do centro para a margem, porque o fundo dos reservatórios são os vales originais dos rios represados (IAKUNIN; SALGADO; POTES, 2018), o lago de Sobradinho, conforme Figura 3.2, tem este perfil. Quando em sua cota máxima operacional, de 392,5 m acima do nível do mar, tem uma profundidade média em torno de 8 m e máximas superiores a 40 m próximo a parede da barragem. Isso pode levar a comportamentos peculiares das brisas induzidas por este.

Figura 3.2. Batimetria lago de Sobradinho na região de estudo.



Fonte: Eletrobras Chesf

A vegetação natural da região é descrita como sendo predominantemente caatinga, também denominada de caatinga-agrupada, composta por arbustos, árvores baixas e cactos, comumente encontrados nas margens do rio São Francisco. Podem ser encontrados cactos, bromeliáceas e arbustos galhosos, todos espalhados em matagais, facilmente expostos aos raios solares, com áreas claras entre eles. As plantas têm de 2 a 3 metros de altura, formando um emaranhado espinhoso de vegetação. Outro tipo de vegetação, frequentemente encontrada na região, é a caatinga densa e arbustiva que forma um emaranhado espinhoso bem mais compacto. A caatinga arbustiva é densa, mas não cobre totalmente o solo (CORREIA, DIAS e ARAGÃO, 2006b).

A topografia da região se apresenta como acidentada, com elevações não superiores a 300 metros irregular e é formada por pediplanos, representantes de um estágio maduro do ciclo de erosão. Estes pediplanos passam para campos de areia nos domínios do médio São Francisco, acrescido de patamares periféricos. (CPRM/PRODEM, 2005).

O clima típico é o do semiárido caracterizado por apresentar altas temperaturas com valores acima de 25 °C, e a sua temperatura média anual varia entre 23 °C a 27 °C com baixa umidade relativa, fazendo parte do “Polígono das Secas” (ALMEIDA, 2013). A precipitação pluviométrica média anual na região é de 485 mm, com chuvas

irregulares sendo os meses mais chuvosos de dezembro a março e com o período seco ocorrendo de abril a novembro, apresentando altas taxas de evaporação e alta insolação.

As condições atmosféricas na região de Petrolina são caracterizadas pela presença de ventos do quadrante sudeste e de uma inversão de subsidência na baixa troposfera devido ao domínio da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que é mais intensa no final do outono e no inverno (RAMOS, 1975). Essa inversão parece inibir a formação e desenvolvimento das nuvens mantendo a influência negativa na quantidade de precipitação. Entretanto, convecção profunda e precipitação intensa são comumente registradas no período chuvoso. A ZCIT, os VCAN e os Sistemas Frontais (SF) austrais estão entre os principais sistemas que podem favorecer o desenvolvimento e intensificação de sistemas convectivos precipitantes (CORREIA; DIAS; ARAGÃO, 2006b).

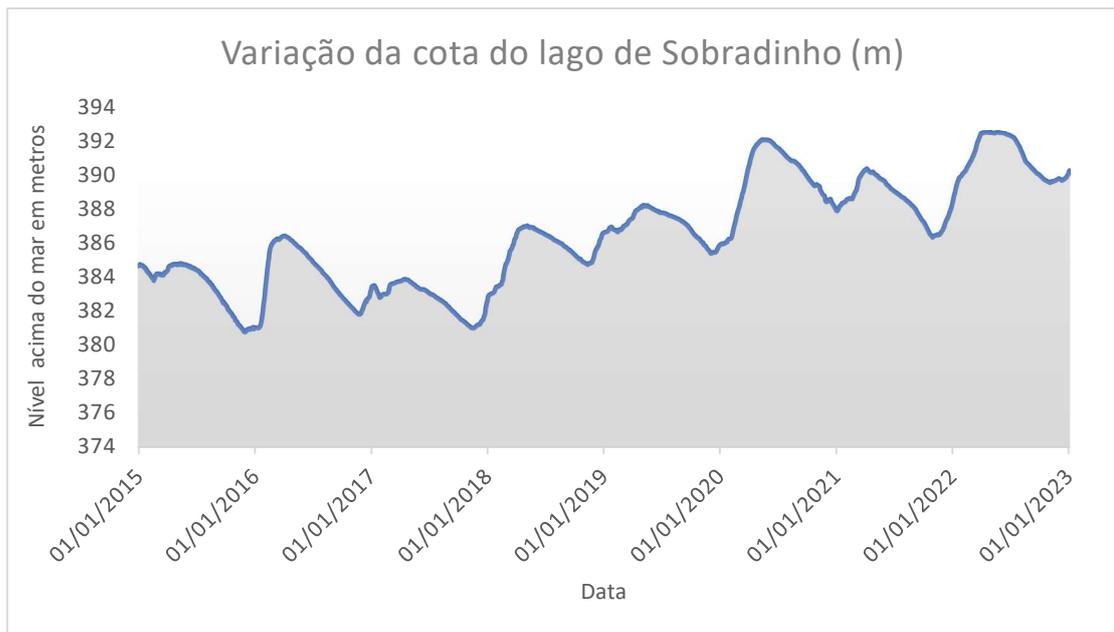
3.2 Períodos Escolhidos para Análise

A análise do presente trabalho se concentra no estudo do escoamento atmosférico no lago de Sobradinho nas proximidades da planta híbrida de Casa Nova II durante os anos de 2018 e 2022. Estes períodos foram escolhidos por representarem: um ano onde o lago atingiu seu volume máximo e operou boa parte desse ano com um nível próximo da cota máxima, o ano de 2022. Já 2018, dentre todo o período para quais havia dados medidos e simulados disponíveis, foi onde o lago operou em uma cota mais baixa, conforme mostrado na Figura 3.3. A comparação entre estes dois períodos foi feita na tentativa de identificar uma diferença na influência do lago nos ventos locais relacionada com o volume de água armazenado.

Nessa perspectiva, a diferença no volume do lago nos dois períodos pode ser analisada pelo impacto do fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) no Brasil, mais especificamente na bacia hidrográfica do Rio São Francisco. De acordo com a Figura 3.4, que exibe uma tabela sazonal do Índice Oceânico Niño (Oceanic Niño Index - ONI), os anos anteriores a 2018 foram caracterizados por uma significativa predominância de eventos El Niño, resultando em contribuições abaixo da média global para a bacia do lago de Sobradinho. Isso culminou no nível mais baixo registrado na história do lago em novembro de 2015. Em 2018, embora não tenha

ocorrido uma predominância de El Niño, tanto a bacia hidrográfica do São Francisco quanto o lago estavam em processo de recuperação de seus níveis. Nos anos de 2021 e 2022, observou-se uma forte influência do fenômeno La Niña, que favoreceu o aumento das chuvas na bacia do rio São Francisco. Conforme descrito no item 2.2 o fenômeno ENOS provoca também alterações nos regimes dos ventos na região.

Figura 3.3. Variação da cota do lago de Sobradinho entre 2015 e 2022.



Fonte: autoria própria com dados de (ANA, 2023)

Figura 3.4. Variação Sazonal do Índice Oceânico Niño (Oceanic Niño Index – ONI).

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2
2021	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1.0	-1.0
2022	-1.0	-0.9	-1.0	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9	-0.8
2023	-0.7	-0.4	-0.1	0.2	0.5	0.8	1.1					

Fonte (NOAA, 2023)

3.3 Dados Observacionais.

Os dados observacionais usados no presente estudo para análise e comparação com o modelo WRF foram coletados nos anos de 2018 e 2022 em uma torre anemométrica instalada em um parque eólico identificada como TA2. A TA2 fica a cerca de 6 km da borda do lago nas coordenadas -41.0609W e -9.2891S. Os dados mensurados são: temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica a 90 metros de altura, dados de vento de velocidade e direção nas alturas de 96, 75 e 50 metros. Os dados de vento são coletados por anemômetros de concha e birutas continuamente e capturados a cada 1 segundo e têm a média calculada a cada 10 minutos.

Os dados medidos foram avaliados a partir de testes de qualidade, considerando os seguintes critérios: 1) Teste de limites físicos - Identifica valores fora do intervalo fisicamente possível para cada variável meteorológica, considerando as normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) como referência; 2) Teste de persistência temporal - Busca observações inalteradas durante um intervalo de tempo e com escala decimal pré-definida. Os limites físicos, empregados para cada variável meteorológica foram: velocidade do vento entre $0,25 \text{ m s}^{-1}$ e 30 m s^{-1} , direção entre 0° e 360° . Sobre os testes de persistência temporal, se o valor se manter inalterado durante um intervalo de 30 minutos com precisão numérica de 2 casas decimais, o valor será marcado como inconsistente, sendo, portanto, reprovado (CAMILO JUNIOR et al., 2022).

3.4 Dados Mensurados com o LIDAR

No presente trabalho foram utilizados, para análise e validação dados simulados com o WRF, dados de sensoriamento remoto medidos por um LIDAR instalado sobre o lago de Sobradinho, na Usina Fotovoltaica Flutuante conforme mostrado na Figura 3.5. O dispositivo do tipo Windcube v2, da marca Leosphere e estima a velocidade e direção do vento, através da técnica *Doppler Beam Swinging*. O local de instalação foi escolhido pelo fato da usina flutuante ser localizada na linha de predominância de direção do vento em frente do parque eólico CASA NOVA, possibilitando entender o comportamento do vento na parte anterior ao local de interesse. Os dados do LIDAR utilizados foram da campanha de medição do período de setembro a dezembro de 2022.

Os dados do LIDAR coletados a cada 10 minutos foram concatenados em intervalos com a média a cada 6 horas por um período de 95 dias. Entre 01 e 20 de novembro ocorreu uma falha técnica na medição e não foi possível coletar os dados.

Figura 3.5. LIDAR instalado na usina Fotovoltaica Flutuante de Sobradinho.



Fonte: Adaptado de P&D PD-0048-0217/2020

3.5 Dados Simulados com o WRF

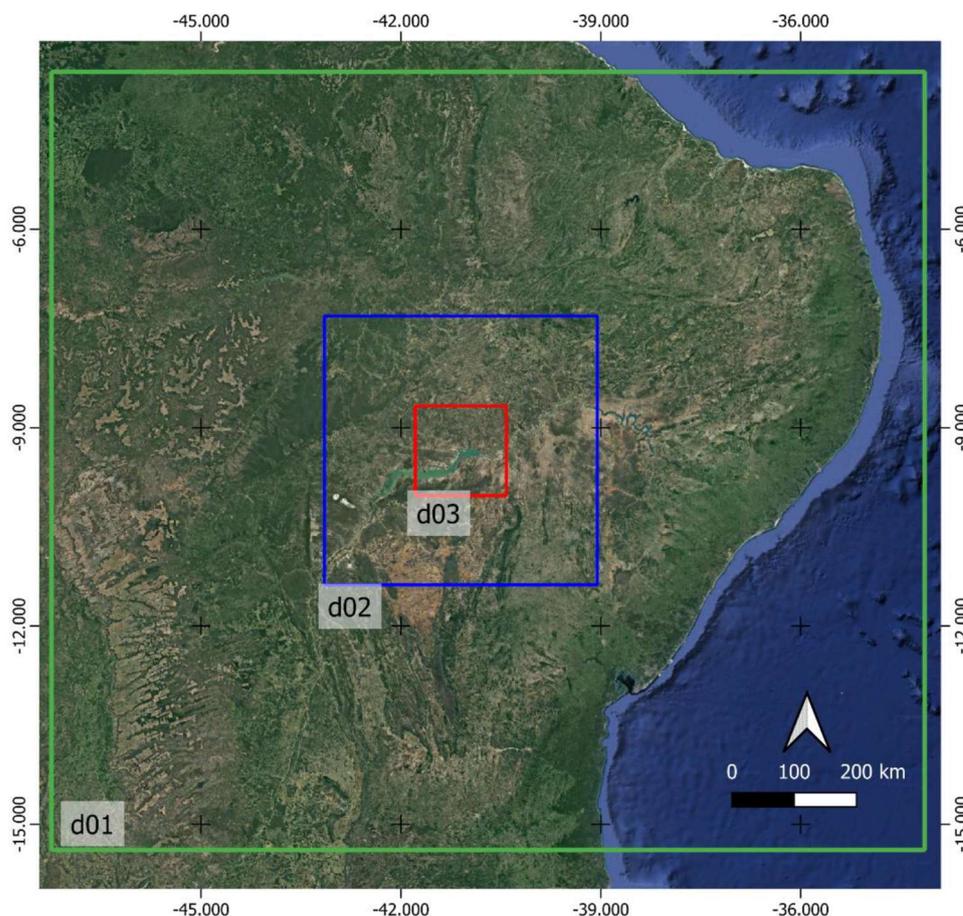
Os dados de saída do WRF são disponibilizados em formato netCDF, um conjunto de interfaces com funções de acesso a dados armazenados na forma de matrizes, denominadas estruturas multidimensionais, para representação de dados científicos. Neste projeto os arquivos netCDF gerados pelo modelo WRF-ARW foram analisados em Python. Em um primeiro momento foram utilizadas as bibliotecas Xarray e Pandas para extração dos arquivos e tratamento de dados (SANTOS et al., 2022) e, posteriormente, o WRF-Python (LADWIG, 2017) que é uma coleção de rotinas de diagnóstico e interpolação desenvolvido pelo NCAR em substituição ao NCL. Essa substituição ocorreu por uma necessidade de otimização de recursos e devido ao Python possuir popularidade e ampla aceitação por universidades e organizações de pesquisa em todo o mundo (HALEY et al., 2019).

Os dados de modelo WRF do presente trabalho foram obtidos pelo projeto P&D PD-0048-0217/2020 “Sistema inteligente com aerogerador integrado às fontes de energia eólica, solar e storage como plataforma de desenvolvimento visando melhorias contínuas no processo de geração de energia elétrica”, mencionado na seção 1.1. Foram simulados dados meteorológicos da região de Casa Nova - BA por um período de seis anos compreendido entre 2017 e 2022 utilizando o modelo WRF versão 4.3.1.

3.5.1 Parametrizações do Modelo WRF

O modelo usou 03 domínios aninhados e centrados nas coordenadas: Long. - 40.8532 e Lat. -9.1933, conforme Figura 3.6. Para determinar os perfis verticais da atmosfera foram determinados 60 níveis verticais com mais camadas próximas ao solo e o primeiro nível a 20 metros.

Figura 3.6. Configuração dos domínios para a modelagem do WRF.



Fonte: P&D PD-0048-0217/2020

- O domínio d01 possui 172 colunas e 172 linhas com espaçamento de grade de 9 km e cobre grande parte do Nordeste e o estado da Bahia.
- O d02 possui 208 x 208 células e resolução de 3 km.
- O domínio d03 de alta resolução (1 km de resolução de grade) tem o foco na região de Casa Nova e contempla as usinas de Casa Nova A, B, 2, 3, a usina solar flutuante e o local de instalação da planta híbrida. O d03 possui 181 colunas e 193 linhas, cobrindo uma área de 34752 km².

Os dados de atualização do uso e ocupação da terra (do acrônimo em inglês *Land Use and Land Cover* - LULC) utilizados são derivados do MapBiomas (Projeto MapBiomas, 2019). Para a topografia, foram utilizados os dados do *Digital Elevation Model* (DEM) gerados pelo satélite *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução de 90 metros.

O teste de parametrização física para o modelo WRF consiste em testar diferentes configurações e comparar os resultados com dados observados. Na sequência é selecionada a configuração que obtiver os melhores índices estatísticos. Os dados observados utilizados para validação e seleção da melhor configuração são oriundos da base de dados do INMET de torres anemométricas da Eletrobras Chesf e da estação solar do Centro de Referência em Energia Solar de Petrolina - CRESF. A validação principal foi realizada no domínio 02 da figura 3.4 pois neste domínio estão localizadas o maior número de estações de observação para comparação.

Os testes foram realizados nos meses de março, junho, agosto e outubro de 2020. Esses meses correspondem, respectivamente, aos períodos de intensidade mínima do vento, mínima solar, intensidade máxima do vento e máxima solar, refletindo as variações sazonais significativas nessas condições ambientais. Os testes se iniciaram com a configuração inicial chamada de controle e a partir desta foram feitas variações nos parâmetros de camada limite planetária (PBL), microfísica de nuvens (MP) e física de nuvens Cumulus (CU). Foi avaliada também a parametrização da física de lagos (LK) que modifica a forma de processar os fluxos de calor em regiões lacustres. As configurações que obtiveram os melhores desempenho em uma determinada etapa foram selecionadas para a etapa seguinte. Sempre com um peso maior para as variáveis velocidade, direção do vento e radiação, pois elas afetam diretamente a análise dos resultados. As demais variáveis foram utilizadas como uma avaliação secundária.

Após diversas variações nas configurações e avaliação de cada tipo de física. Foram selecionadas as seguintes parametrizações:

- Para a PBL foram selecionadas duas parametrizações diferentes, uma que melhor se adequou para o período úmido, compreendido entre dezembro e março, o esquema de fechamento não local MYNN2 e outra, que foi melhor nos demais meses do ano, o esquema de fechamento local YSU.

- A parametrização WSM5 foi a selecionada como esquema de microfísica devido aos melhores resultados para velocidade, direção do vento e radiação e um desempenho satisfatório para precipitação.
- A parametrização de cumulus selecionada foi o Esquema Grell-Freitas (GF) que representou melhor as variáveis velocidade e direção do vento, umidade e temperatura e apareceu com bom desempenho para precipitação.
- Para a física de lagos, no caso em que foi ativado a parametrização de lagos se mostrou similar aos demais com pequenas variações nos indicadores, mas como a literatura indica que há uma melhora na representação dos fluxos de energia com a ativação dessa parametrização foi escolhida a LK1.

A Tabela 3.1 traz um resumo das parametrizações selecionadas e utilizadas no modelo para a simulação dos seis anos consecutivos, 2017 a 2022:

Tabela 3.1. Tabela Resumo Parametrizações WRF.

Domínios	03 Domínios centralizados em: -40.8532 e -9.1933
Resolução	d01 - 9 km - 172 x 172 d02 - 3 km - 208 x 208 d03 - 1km - 181 L x 193 C
Níveis Verticais	60 níveis
Física de Lago	LK1
PBL	MYNN2 / YSU
Microfísica	WSM5
Cumulus	GF
Long Wave Radiation Short Wave Radiation	RRTMG
Land-surface	Noah LSM

Fonte: autoria própria com dados do P&D PD-0048-0217/2020

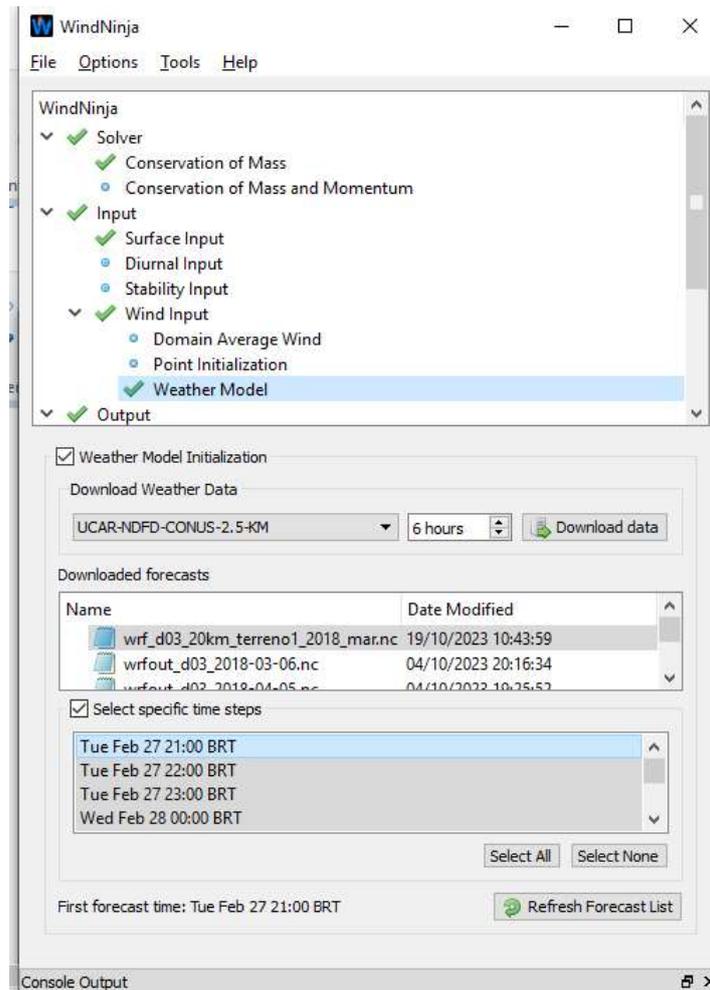
3.6 Associação WRF e WindNinja

Na tentativa de captar detalhes mais ricos dos campos de vento que possam melhor quantificar a influência do lago nos ventos do entorno foram escolhidos alguns momentos específicos para aumentar a resolução dos campos de vento do WRF com a associação com o modelo de microescala WindNinja. Os momentos escolhidos foram previamente avaliados nos campos de vento obtidos com o WRF onde seria possível detectar ou separar a influência térmica do lago das demais componentes sinóticas, de mesoescala e orográficas.

A maior funcionalidade do WindNinja é representar o efeito do terreno nos campos de vento, assim a entrada do modelo de elevação digital, ou Digital Elevation Model (DEM) em inglês, torna-se um aspecto importante. O DEM pode ser obtido diretamente no WindNinja, porém para a região de interesse a máxima resolução que o WindNinja fornece é de 250m (GMTED250) obtida do esforço conjunto da United States Geological Survey (USGS) e da National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) (USGS, 2023). Para melhorar essa questão conseguimos um modelo DEM pela NASA através do projeto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) com resolução de 30m disponível para o Brasil (NASA, 2018). No entanto as coordenadas de projeção deste modelo são WGS84 [EPSG 4326] e não foram acopladas pelo WindNinja aos dados de modelo do WR. Para resolver isso foi necessário fazer uma reprojeção com o uso do QGIS para as coordenadas SIRGAS 2000 Brazil Mercator [EPSG:5641].

Para analisar o desempenho do WindNinja foi realizada a simulação, no modo conservação de massa, tendo como entrada o modelo de superfície DEM descrito anteriormente e utilizada a saída do modelo WRF para o mês de março de 2018 em passos horários Figura 3.7. Foram gerados arquivos de texto tipo asc no modo de saída Fire Behavior. Em seguida foi executado um script python para coletar os dados na coordenada mais próxima a localização da TA2 no sentido frontal, considerando a direção predominante do vento, em cada um dos arquivos de saída gerados. Os dados coletados foram transportados para um arquivo do tipo csv e comparados com dados medidos na TA2 a 96m e simulados com o WRF a 100m.

Figura 3.7. Tela de simulação do WindNinja



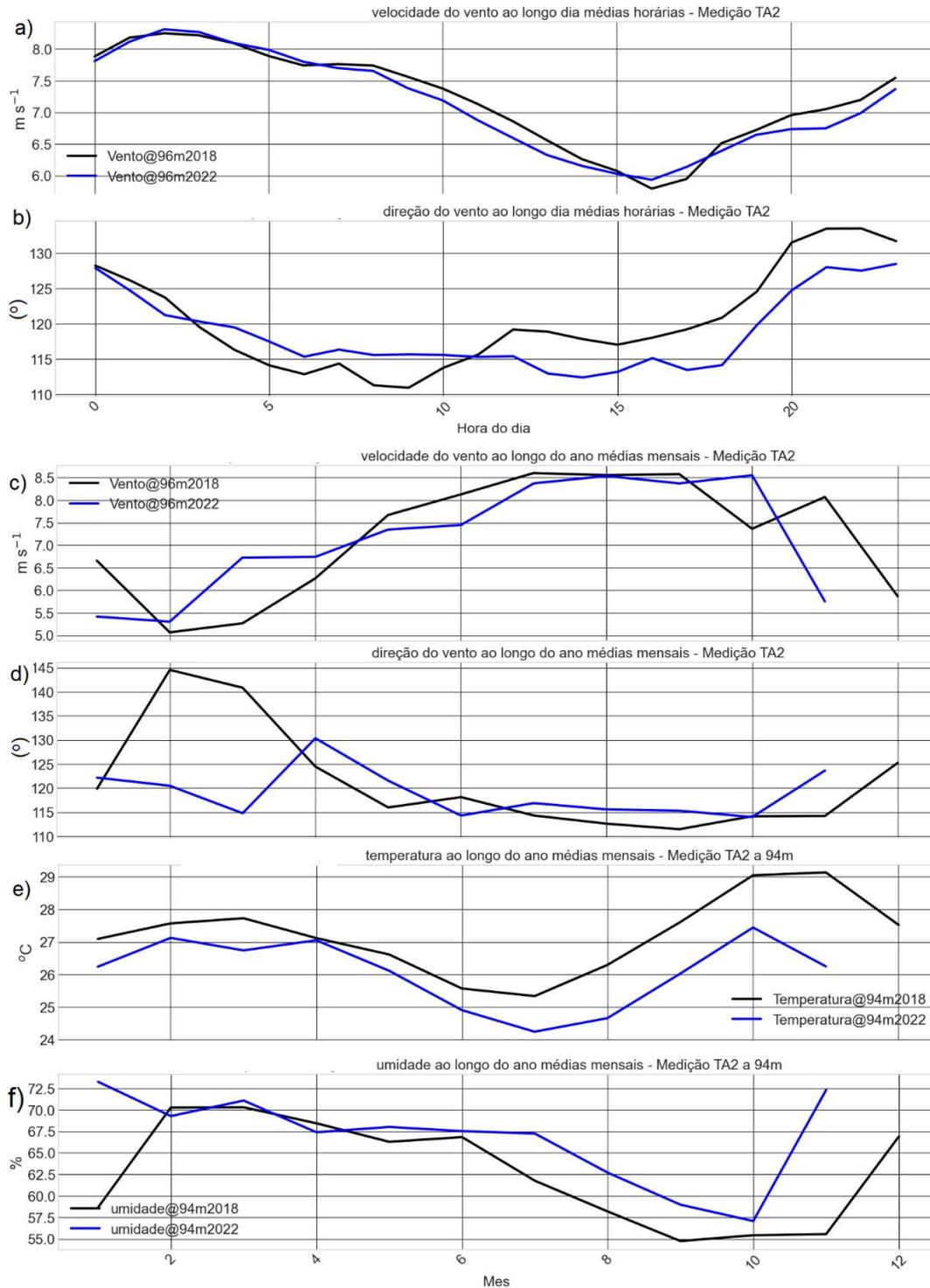
Fonte: autoria própria

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Comparativo entre os Dois Períodos: Ano 2018 e Ano 2022

A Figura 4.1 exibe as médias horárias ao longo do dia e as médias mensais ao longo do ano dos dados medidos a 96 metros na estação TA2 em Casa Nova II, abrangendo ambos os períodos selecionados.

Figura 4.1 Comparativos de médias de variáveis obtidas na TA2 em 2018 e em 2022.



Fonte: autoria própria

O comportamento da variação das médias horárias da velocidade do vento ao longo do dia é muito similar nos dois anos, com queda nos valores entre 10h e 17h atingindo um valor mínimo aproximado de $6,0 m s^{-1}$ as 16h e ventos mais intensos

entre 18h do dia as 08h do dia seguinte com um máximo de $8,5 \text{ m s}^{-1}$ as 02h da madrugada (figura 4.1 a). A variação diária da direção dos ventos na TA2 mostrada na figura 4.1 b) também é muito similar nos dois períodos, o ano de 2022 apresentou uma maior regularidade nas médias horárias.

A variação das médias mensais de velocidade do vento na figura 4.1 c) apresentam o mesmo comportamento sazonal. As médias de velocidade do vento do ano de 2022 superaram as do ano de 2018 em fevereiro, março, abril e outubro e as médias do ano de 2018 superaram as de 2022 em janeiro, maio, junho julho e novembro. A média anual fica em torno de 7 m s^{-1} com máximas superiores a $8,0 \text{ m s}^{-1}$ entre julho e setembro e mínimas em torno de $5,0 \text{ m s}^{-1}$ em fevereiro.

A direção do vento na figura 4.1 d) também tem comportamento similar, nos dois períodos, oscilando em torno da média de 120° exceto nos meses de fevereiro e março de 2018 que apresentou um deslocamento para 140° . Nos meses de maior intensidade de ventos a direção se mantém muito regular, no período de menor intensidade apresenta variações. Pelas médias das variáveis temperatura e umidade observadas nas figuras 4.1 e) e 4.1 f) é notável que o ano de 2018 foi mais seco e quente que o ano de 2022.

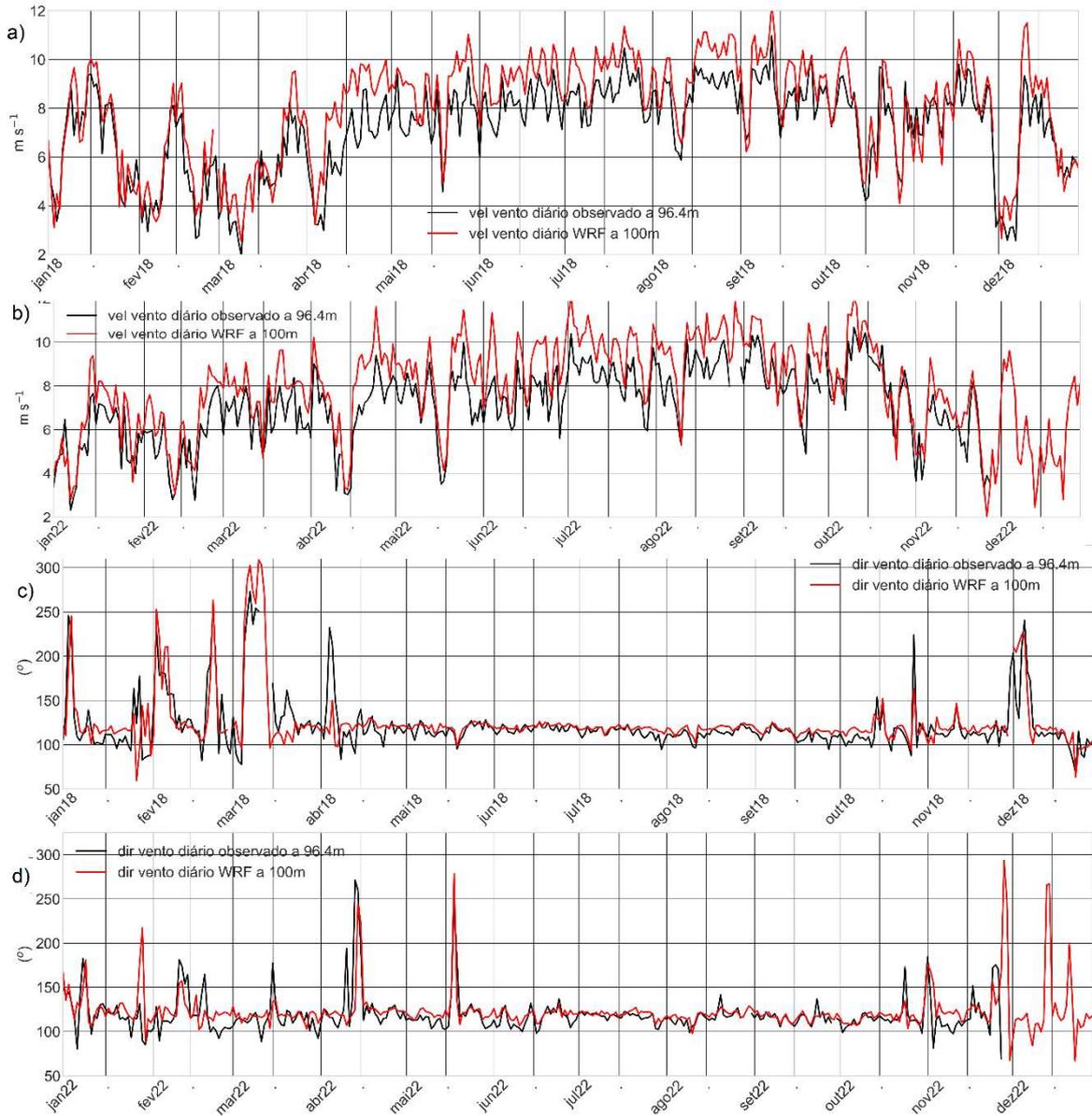
4.2 Comparativo dos Dados Medidos em TA2 e Modelados com WRF.

A Figura 4.2 abaixo mostra um comparativo das médias diárias de velocidade e direção do vento ao longo de todo o ano em 2018 e em 2022. Os dados medidos são oriundos da TA2 e os simulados, selecionados no ponto de grid mais próximo da localização TA2, na altura aproximada de 100m acima do nível do solo, obtidos das saídas do modelo WRF, executados no projeto de P&D PD-0048-0217/2020 conforme descrito nas seções 3.5 e 1.1.

Em ambos os anos é verificada uma boa convergência entre o modelado e o medido indicando apenas uma leve superestimativa do modelo tanto em velocidade quanto em direção. Esses dados também são confirmados na Tabela 4.1 que faz uma análise estatística dos dados modelados e medidos nos anos de 2018 e 2022. Observa-se que nos períodos de maior intensidade do vento nas Figura 4.2 a) e b), entre maio e outubro, o comportamento da direção nas Figura 4.2 c) e d) é mais regular do que nos outros meses, corroborando resultado verificado por SILVA et al. (2016).

Nos dois anos analisados é verificado que ocorrem alguns distúrbios, em períodos específicos, de queda de velocidade e consequente variação significativa na direção, sendo estes distúrbios mais frequentes nos meses de menor intensidade do vento. Estes eventos, embora sejam similares em quantidade de ocorrências, não são exatamente coincidentes nos períodos.

Figura 4.2. - Comparativo de valores medidos na TA2 a 96m e simulados WRF a 100m das médias diárias de velocidade e direção do vento, a) e c) em 2018, b) e d) em 2022.



Fonte: autoria própria.

Tabela 4.1. Métricas estatísticas comparativas das médias diárias dos dados medidos na TA2 e LIDAR e simulados com o modelo WRF.

	ANO 2018		ANO 2022		2022 LIDAR*	
	Velocidade m.s ⁻¹	Direção (°)	Velocidade m.s ⁻¹	Direção (°)	Velocidade m.s ⁻¹	Direção (°)
MBE	0.796	2.692	1.019	3.404	- 0.062	0.296
MAE	0.969	11.273	1.356	12.985	0.908	15.995
RMSE	1.215	22.723	1.346	20.542	1.222	32.222
r(Pearson)	0.896	0.740	0.905	0.563	0.911	0.603

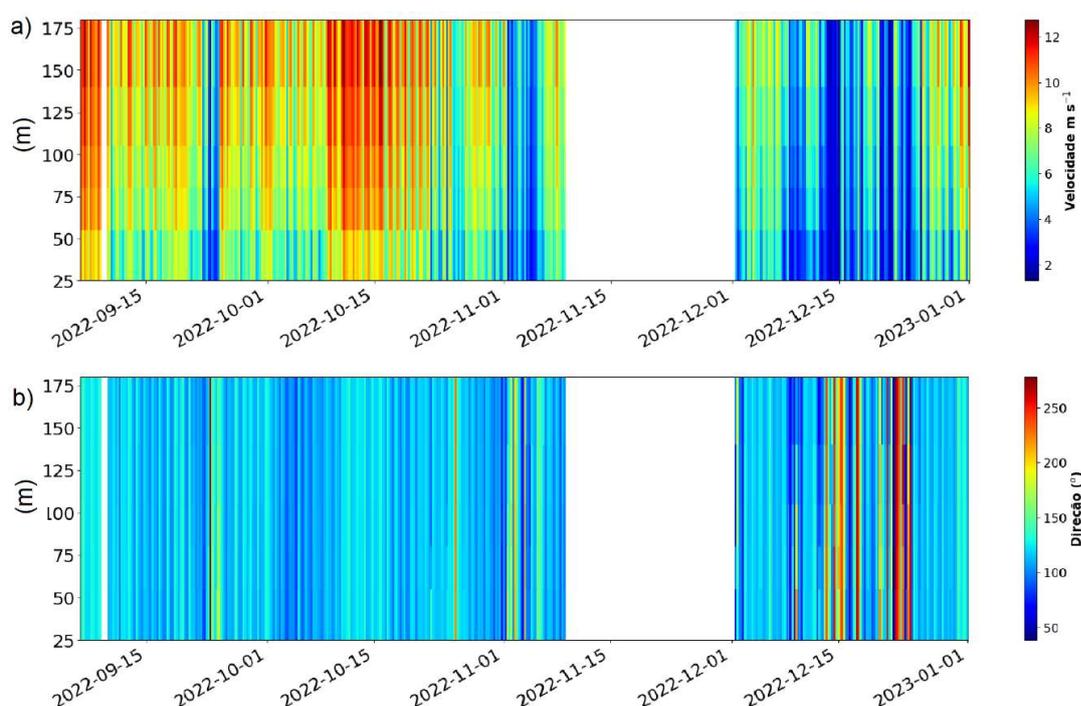
*95 dias de comparação

Fonte: autoria própria.

A decisão de realizar uma análise mais detalhada dos dados do WRF durante esses períodos específicos foi motivada pela observação de que, de acordo com IAKUNIN, SALGADO e POTES (2018), esses momentos coincidem com a diminuição da intensidade dos ventos de mesoescala, tornando mais evidente a influência dos efeitos locais.

4.3 Comparativos dados medidos com o LIDAR e modelados com WRF.

Figura 4.3. Mapas de calor de velocidade do vento e direção medidos com o LIDAR.

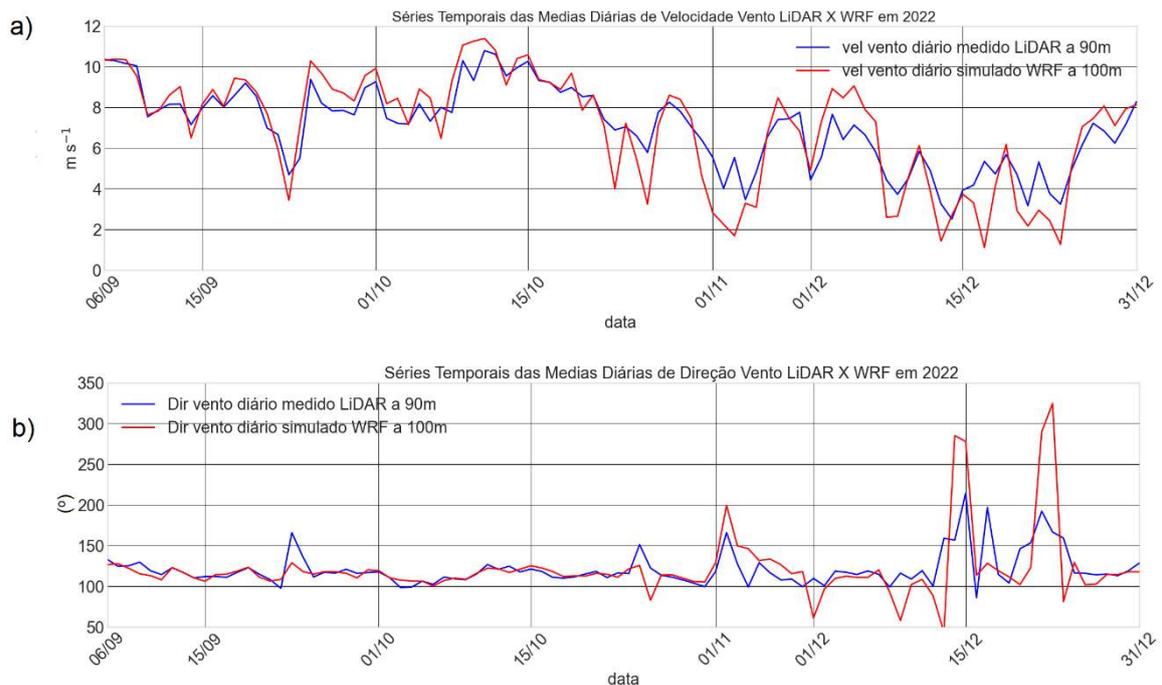


Fonte: autoria própria.

A Figura 4.3 apresenta os resultados adquiridos pelo LIDAR, exibindo um mapa de calor que representa a velocidade 4.3 a) e a direção 4.3 b) do vento em função das coordenadas altura versus tempo. As alturas de coleta dos dados foram 40 m, 60 m, 90 m 120 m e 160m.

A Figura 4.4 ilustra o comportamento médio diário da velocidade 4.4 a) e direção 4.4 b) do vento e compara os valores observados pelo LIDAR com os resultados do modelo WRF. Nesta análise observa-se uma ótima concordância entre os dados medidos com LIDAR a 90 m de altura e os simulados, focados no ponto de grid mais próximo da localização da usina flutuante onde o LIDAR estava instalado durante este período amostral, a uma altura de 100m acima do nível do solo. Essa concordância entre os dados também está registrada na Tabela 4.1.

Figura 4.4. Comparativo de valores medidos com o LIDAR a 90m e simulados no WRF a 100m das médias diárias de velocidade e direção do vento.



Fonte: autoria própria.

4.4 Análise de Dias Específicos.

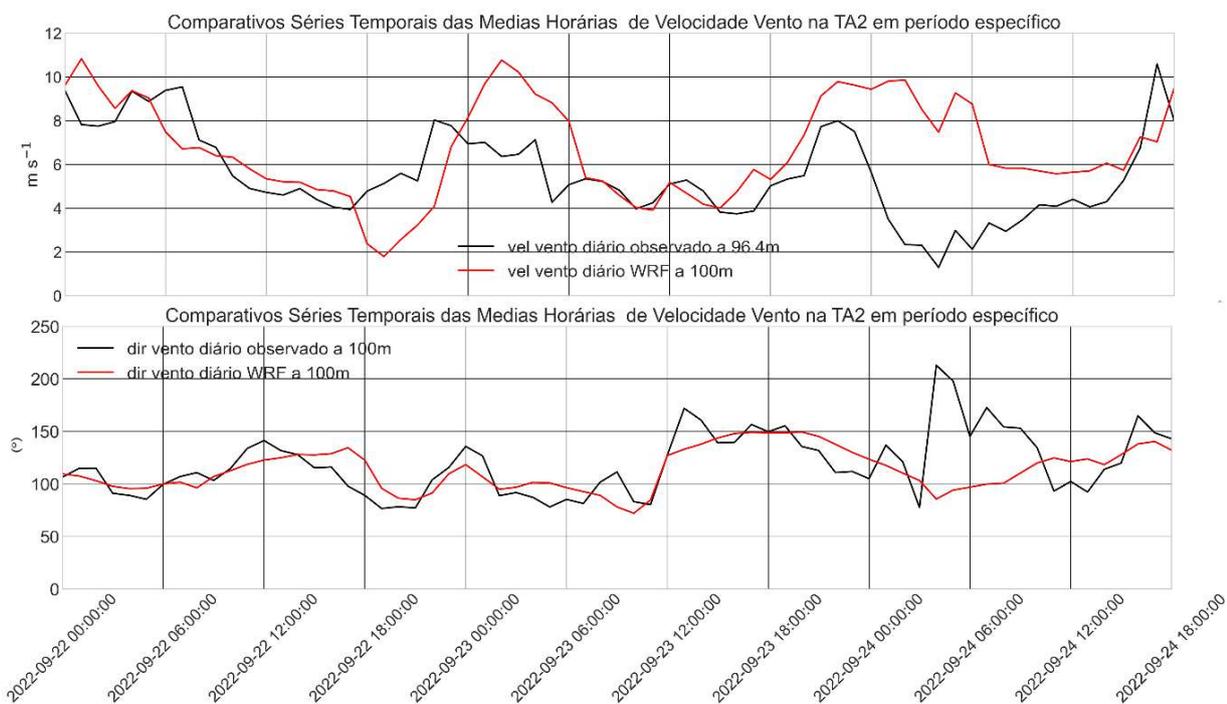
No período compreendido entre setembro e dezembro de 2022, durante o qual havia dados do LIDAR para aprimorar as análises, as Figura 4.5, Figura 4.7 e Figura

4.9 apresentam séries temporais que contrastam as médias horárias de velocidade e direção do vento. Essas séries abrangem os seguintes intervalos de datas:

- Dias 22 a 24/09/2022 (Figura 4.5): caracterizados como dias de distúrbio;
- Dias 28 a 30/09/2022 (Figura 4.7): considerados dias estáveis com ventos favoráveis;
- Dias 01 a 03/11/2022 (Figura 4.9): outro período de distúrbio.

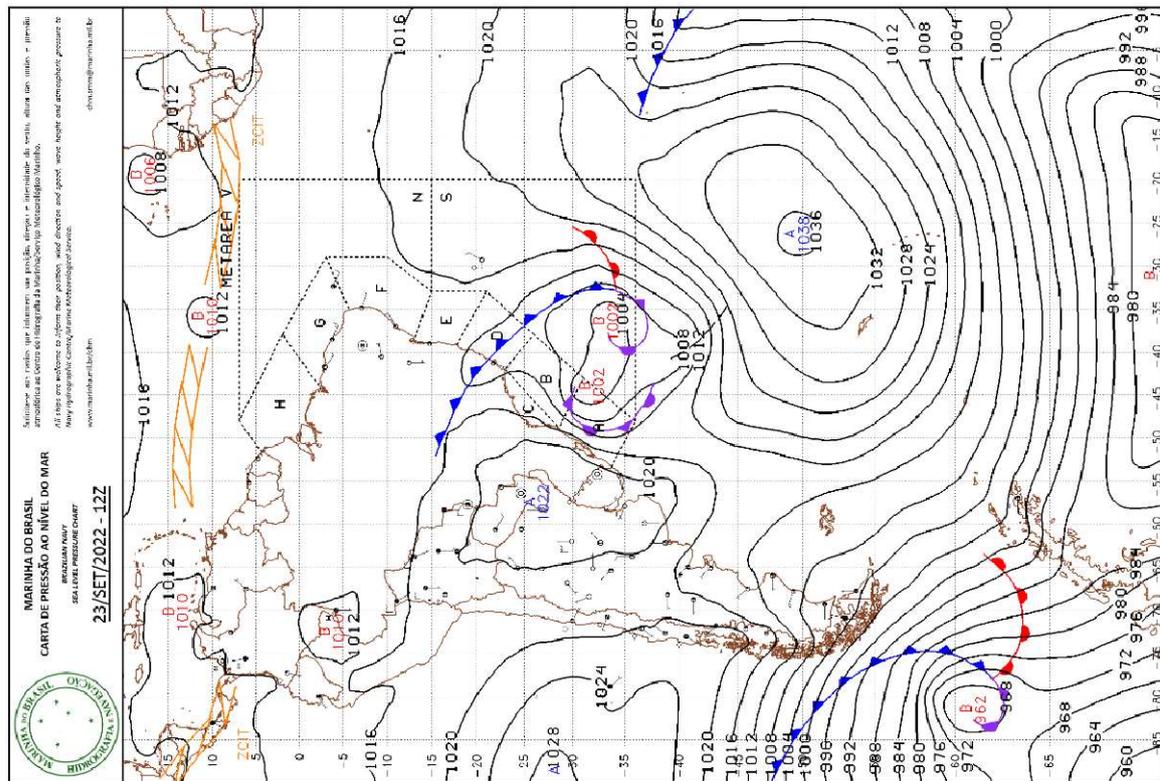
Os registros foram obtidos na estação TA2 a uma altitude de 96 metros e comparados com dados simulados pelo modelo WRF a uma altura de 100 metros.

Figura 4.5. Comparativo dos valores das médias horárias de velocidade e direção do vento registradas entre os dias 22 e 24/09/2022.



Fonte: autoria própria

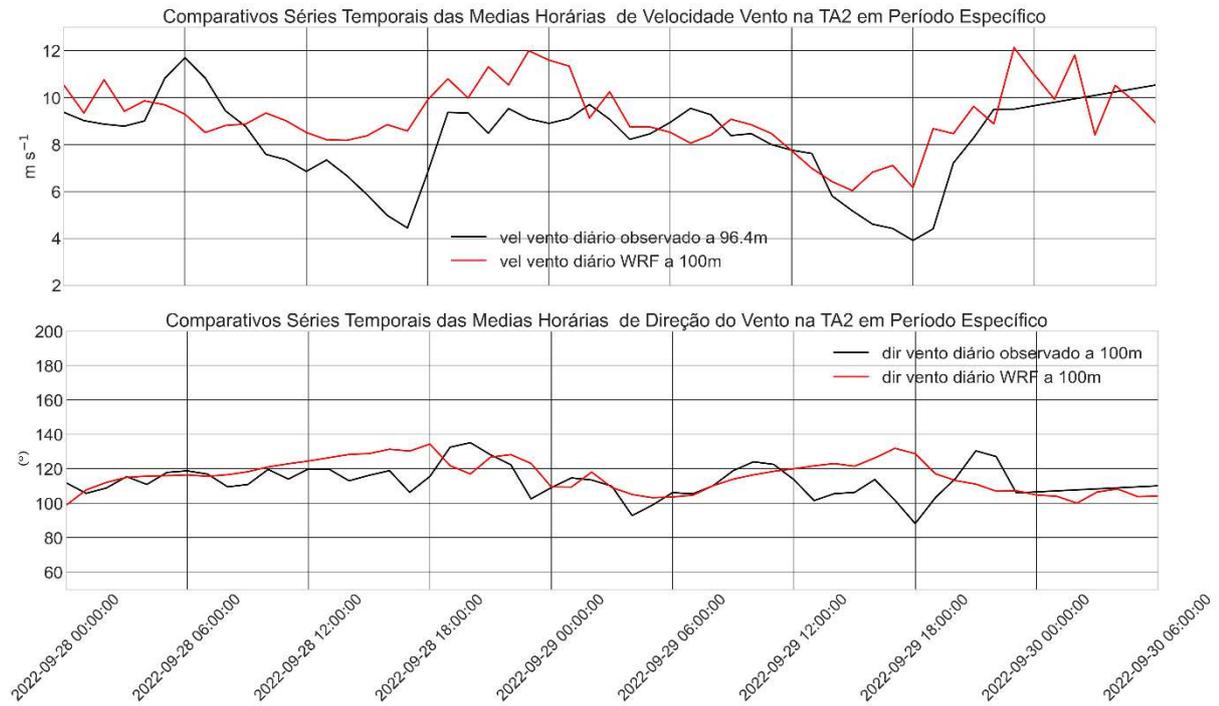
Figura 4.6. Carta de pressão ao nível médio do mar para a América do Sul no dia 23/09/2022 às 12H UTC.



Fonte: (MARINHA, 2023)

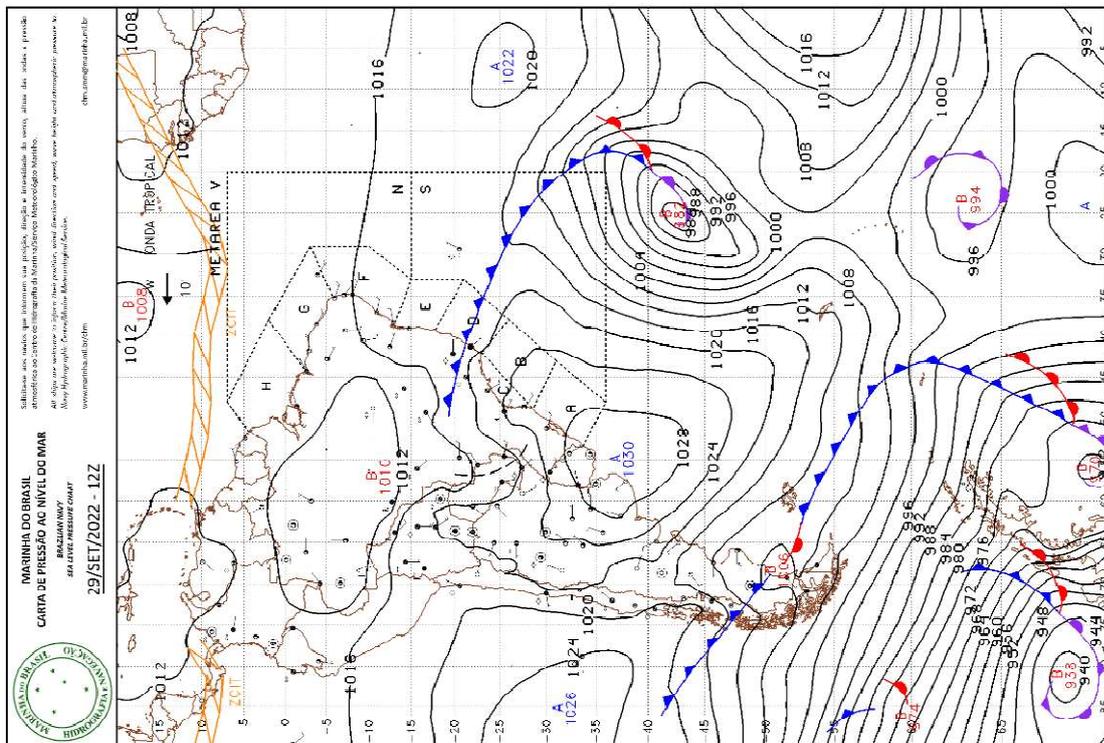
Notadamente, no dia 23/09/2022, observou-se na figura 4.5 uma queda persistente na velocidade do vento ao longo do dia, atingindo valores inferiores a 4 m s^{-1} no período da tarde. Coincidentemente, durante esse período, ocorreu uma mudança na direção do vento, ultrapassando 150 graus. Uma análise da carta sinótica apresentada na Figura 4.6 revelou a presença de uma frente fria associada a áreas de baixa pressão que se aproximava da região, enquanto uma zona de alta pressão no oceano Atlântico encontrava-se a maior distância.

Figura 4.7. Comparativo dos valores das médias horárias de velocidade e direção do vento registradas entre os dias 28 e 30/09/2022.



Fonte: autoria própria.

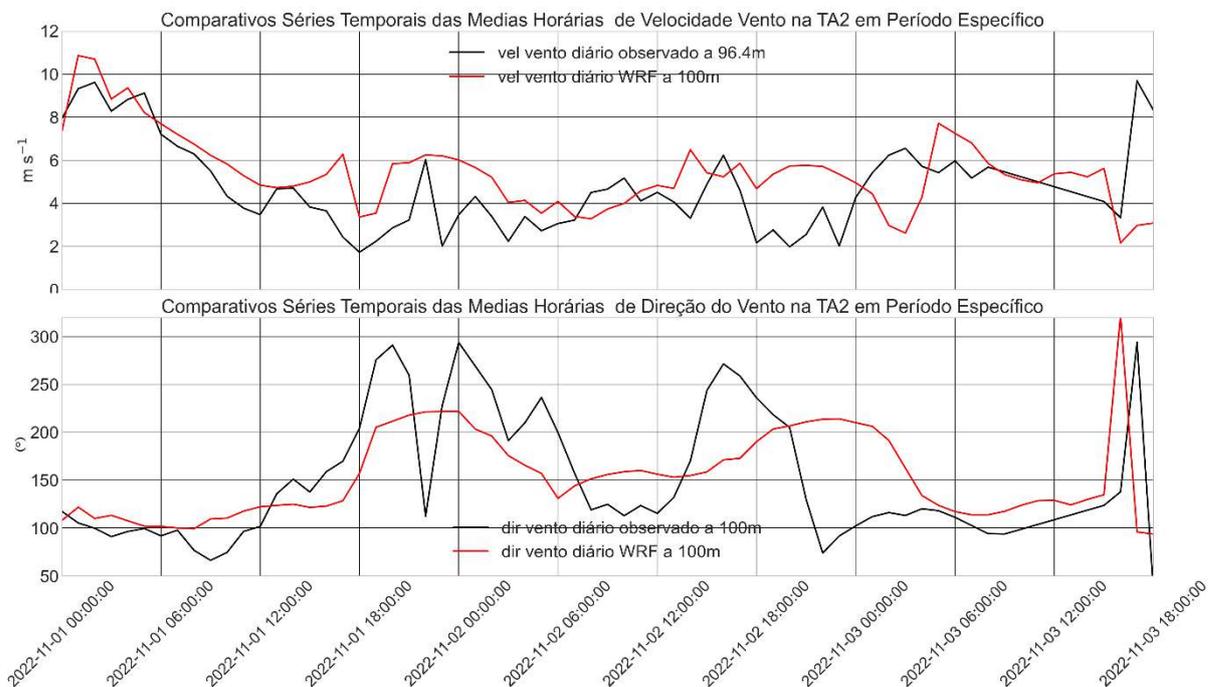
Figura 4.8. Carta de pressão ao nível médio do mar para a América do Sul no dia 29/09/2022 às 12H UTC.



Fonte: (MARINHA, 2023)

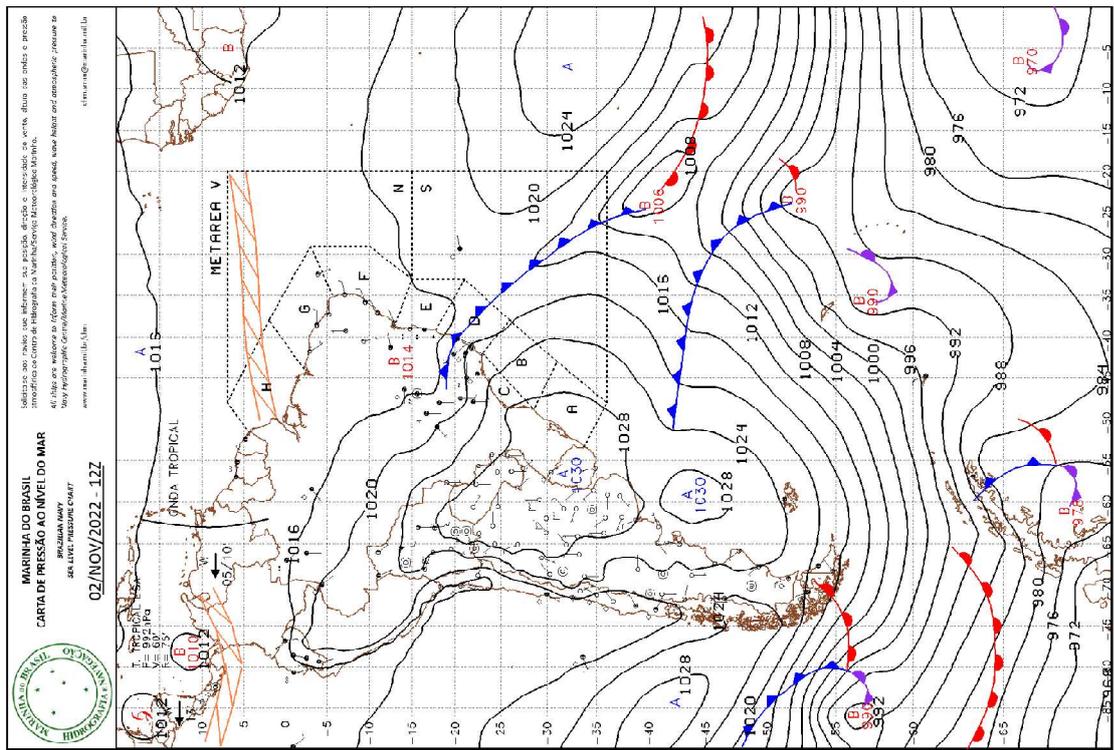
No dia 29/09, pela Figura 4.7 a intensidade dos ventos manteve-se dentro dos padrões médios para esta época do ano, com valores oscilando entre 4 m s^{-1} nos horários de mínima e 12 m s^{-1} nos horários de máxima. Durante este período, não foi observada uma alteração significativa na direção do vento. Uma análise da carta de pressão ao nível do mar, apresentada na Figura 4.8, indicou a aproximação de uma frente fria, embora esta ainda estivesse a uma distância considerável da região. Além disso, a zona de alta pressão no oceano Atlântico permanecia próxima da região Nordeste.

Figura 4.9. Comparativo dos valores das médias horárias de velocidade e direção do vento registradas entre os dias 01/11 e 03/11/2022.



Fonte: autoria própria.

Figura 4.10. Carta de pressão ao nível médio do mar para a América do Sul no dia 02/11/2022 às 12H UTC.



Fonte: (MARINHA, 2023)

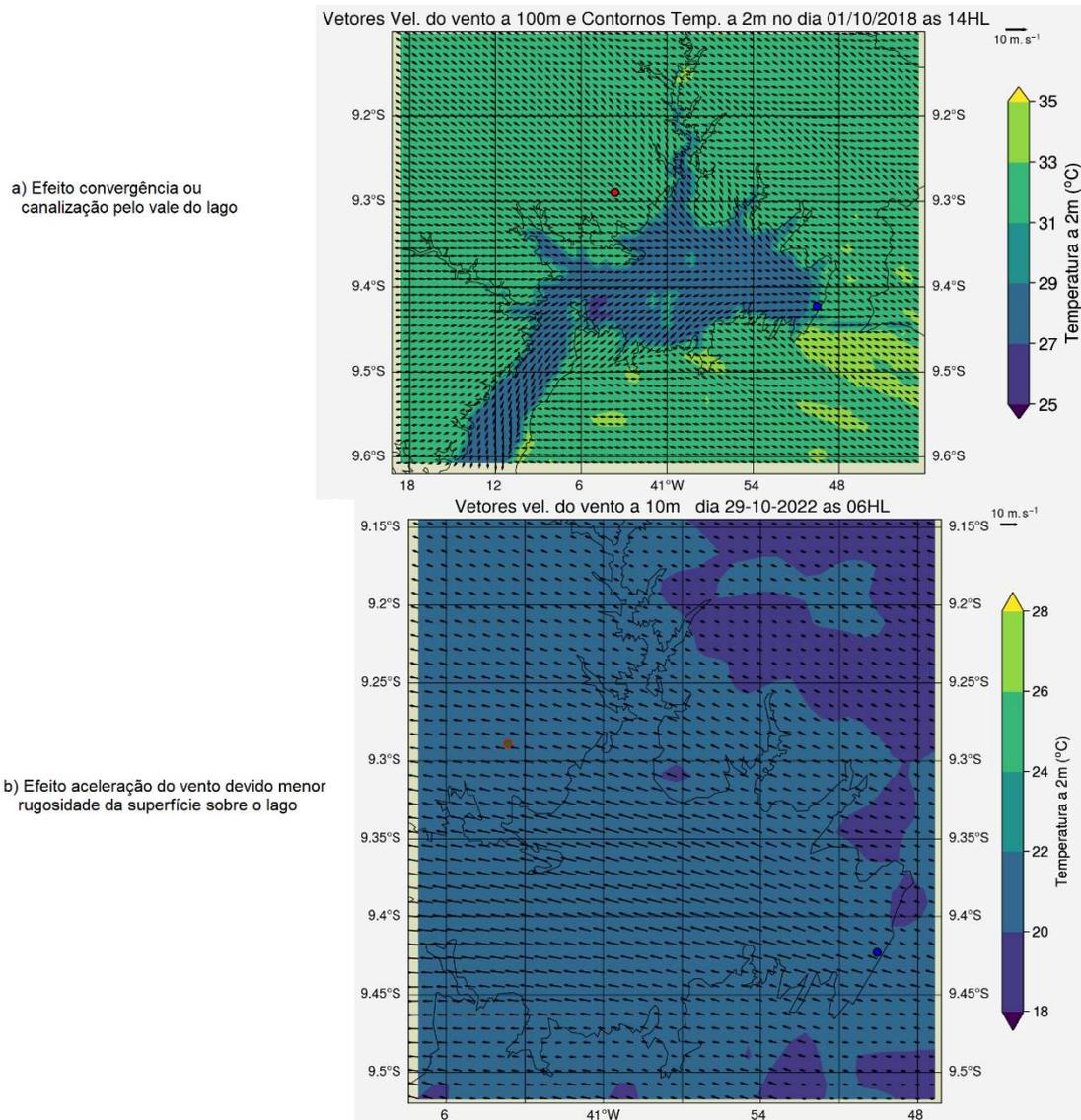
Já em 02 de novembro de 2022, um período que, em média, é caracterizado por ventos mais fracos, observou-se pela figura 4.9 uma queda persistente na velocidade do vento ao longo do dia, atingindo valores próximos a 2 m s^{-1} durante a madrugada e ao pôr do sol. Neste mesmo período, na estação TA2, registrou-se uma significativa mudança na direção do vento, com valores superiores a 250° . O modelo WRF também capturou essa mudança, embora com uma intensidade ligeiramente menor, em torno de 200° e com um certo retardo em relação às observações. A análise da carta de pressão ao nível do mar, apresentada na Figura 4.10, revelou a proximidade de uma frente fria em relação à região e o afastamento da zona de alta pressão no oceano Atlântico.

4.5 Efeitos do Lago no Escoamento Atmosférico Local

As Figuras Figura 4.11 a) e Figura 4.11 b) mostram gráficos de campos vetoriais de vento a 100 m e a 10 m, respectivamente, com contorno de temperatura a 2 metros da superfície e contorno do lago incorporados. Esses campos vetoriais representam um recorte no domínio 03, de 1 km de resolução, dos resultados do modelo WRF. A

marca circular vermelha indica a localização da estação TA2, enquanto a marca azul representa a localização do LIDAR.

Figura 4.11. Efeitos do lago na circulação local.

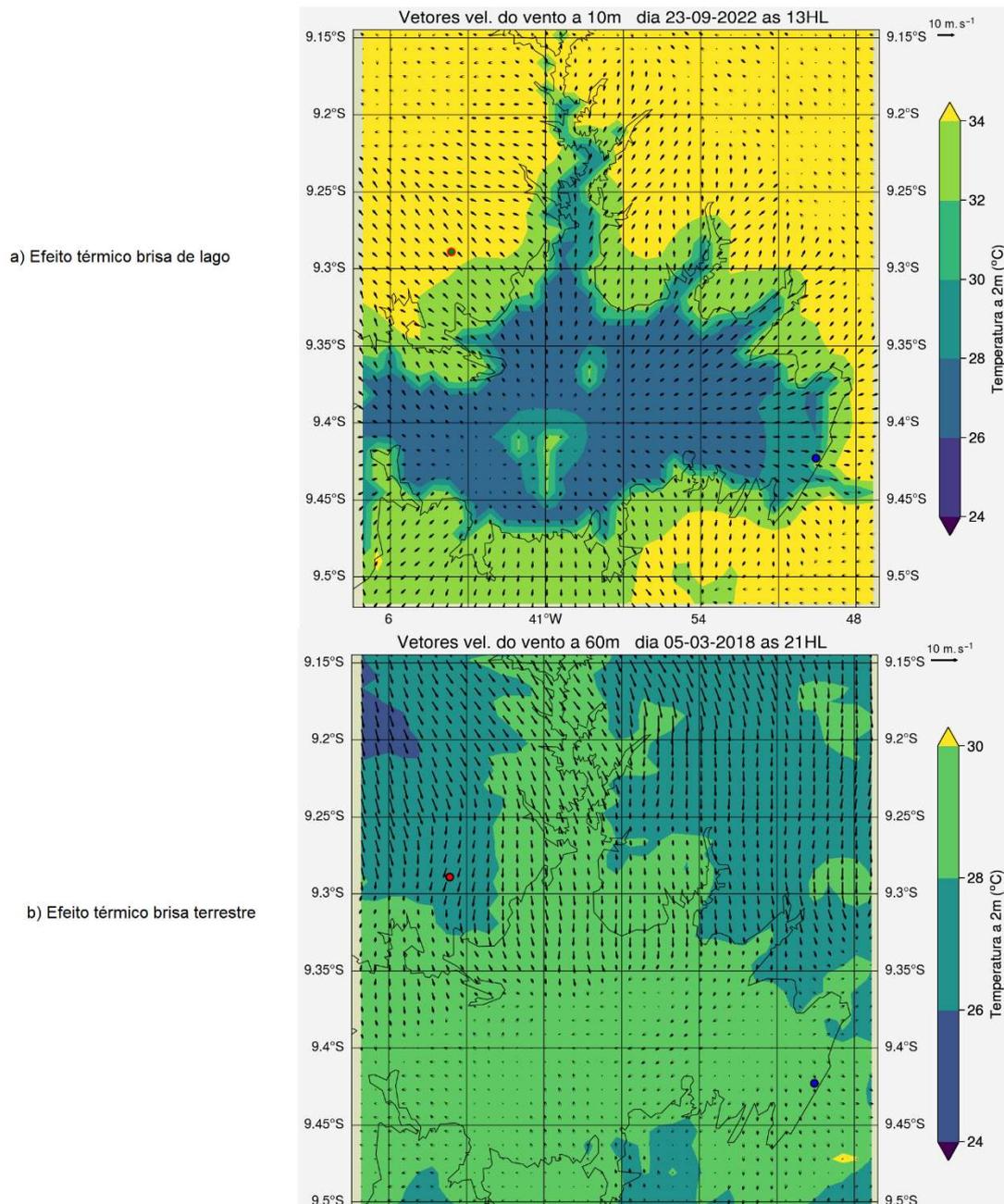


Fonte: autoria própria.

Na Figura 4.11 a) a concentração e a orientação dos vetores sobre o lago, no canto inferior esquerdo, evidenciam claramente a convergência dos ventos devido à canalização pela topografia do vale do lago, que segue o curso original do rio, conforme identificado por ASSIREU, PIMENTA e SOUZA (2011) e NASCIMENTO (2015). Na Figura 4.11 b), observa-se o efeito de aceleração do vento sobre o lago devido à menor rugosidade da superfície da água, como discutido por SILVA (2018) e GARRATT (1990). Especificamente sobre a área do lago, os vetores de vento são mais intensos e alinhados em comparação com as áreas circundantes. Esse efeito é

mais pronunciado nos níveis verticais mais baixos (não visualizado nesta figura) e diminui à medida que o vento atravessa a margem em direção à terra firme. Às 06 horas do horário local (HL), observam-se ventos mais intensos, mesmo a 10 metros de altura, e o lago ainda mantém uma temperatura ligeiramente mais elevada do que as áreas de maior altitude adjacentes.

Figura 4.12. Efeitos térmicos do lago na circulação local.



Fonte: autoria própria.

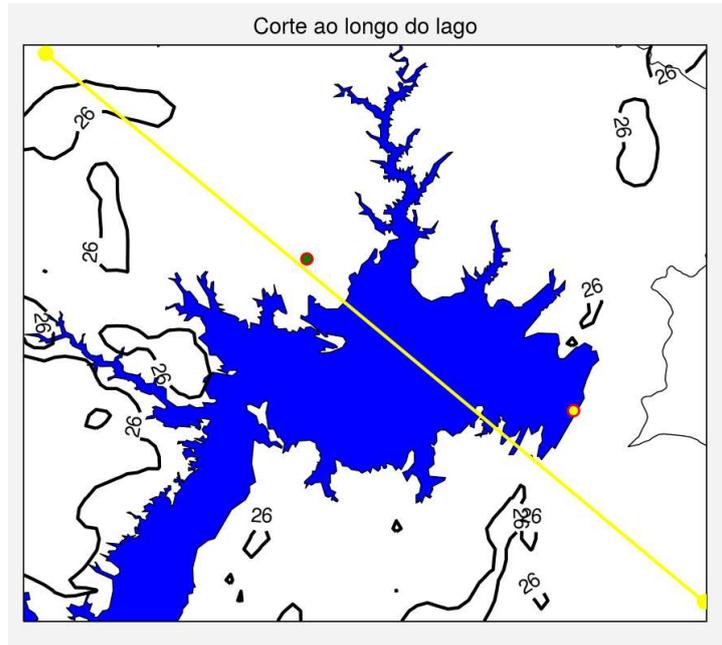
A Figura 4.12 a) destaca o efeito térmico do contraste lago-terra em um dia caracterizado por ventos sinóticos menos intensos. Em um momento em que este contraste térmico atinge seu pico, às 13HL, observa-se a orientação dos vetores de vento do centro do lago em direção à sua margem, sugerindo, por analogia, a formação de uma região de alta pressão sobre o lago caracterizada como brisa lacustre. Notavelmente, na localização do LIDAR, é verificada uma inversão na direção do vento em relação à direção predominante.

Nesse âmbito a Figura 4.12 b) mostra também um efeito térmico em um momento em que o gradiente de temperatura lago-terra é positivo, ou seja, o lago está cerca de 2 °C mais quente que as margens neste dia 05/03/2018 as 21HL. Os vetores de vento estão orientados para o centro do lago sugerindo uma região de baixa pressão sobre o mesmo e caracterizando a brisa terrestre. É uma situação difícil de ser captada, visto que pelas características da região, a maior parte do tempo o gradiente de temperatura lago-terra é negativo ou equilibrado e nos raros momentos que ocorre esta inversão, período noturno, os efeitos de maior escala são predominantes sobre os efeitos locais. Esta constatação de gradientes de temperatura e ocorrências predominantes de brisas lacustres é divergente da verificada por PURIFICAÇÃO et al. (2021) no reservatório do Alqueva em Portugal.

4.6 Alcance Horizontal e Vertical dos Efeitos.

Com o objetivo de quantificar a extensão dos efeitos observados do lago tanto no plano horizontal quanto no vertical, estabeleceu-se uma linha reta que atravessa o lago de sudeste a noroeste. Foram coletados os valores das componentes da velocidade do vento, ou seja, a velocidade zonal no centro de massa do grid do modelo WRF (u_a) e a velocidade meridional no centro de massa (v_a). Com base nesses valores, foi construído um gráfico que ilustra a variação da velocidade resultante do vento em relação à variação das coordenadas cartesianas no grid. A linha amarela na Figura 4.13 representa o corte no mapa onde será feita a análise vertical da variação da velocidade do vento, cruzando o lago em um sentido próximo a direção predominante do vento na região. As marcações verde e amarela indicam, respectivamente, a localização da estação TA2 e do LIDAR.

Figura 4.13. Representação do corte para análise do vento cruzando o lago.

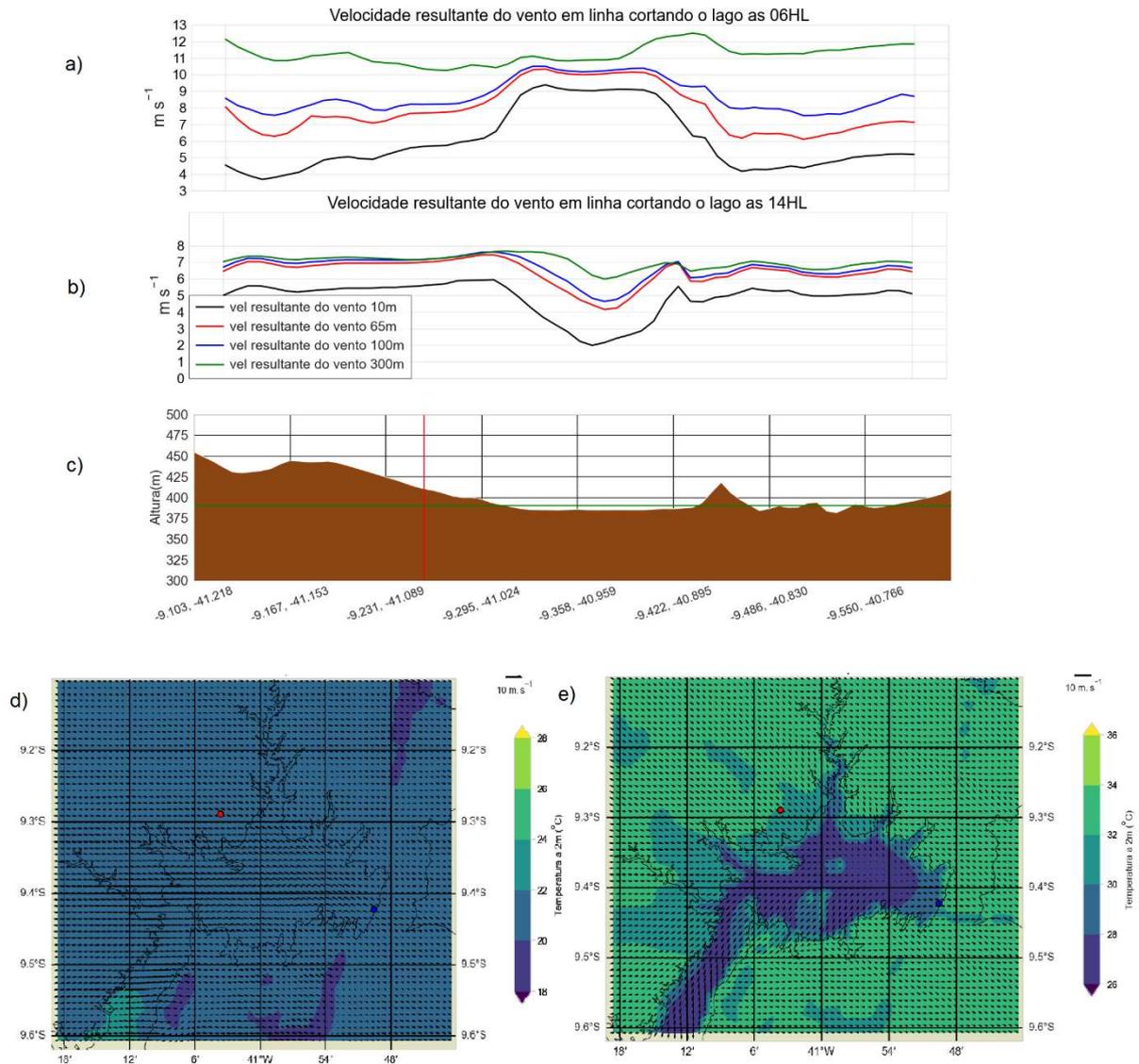


Fonte: autoria própria.

A Figura 4.14 ilustra as variações da velocidade do vento resultante cruzando o lago as 06HL 4.14 a) e as 14HL 4.14 b) do dia 01-10-2018 sobrepostas a figura 4.14 c) que mostra a elevação do terreno, obtida no modelo WRF, ao longo do corte da Figura 4.13. A linha vertical vermelha marca a posição da TA2 e a linha horizontal verde o nível do lago. Os campos vetoriais de vento sobre contornos de temperatura a 2m são ilustrados nos respectivos horários nas figuras 4.14 d) e 4.14 e).

As quatro curvas mostradas nas figuras 4.14 a) e 4.14 b) representam a velocidade resultante do vento ao longo das coordenadas de latitude e longitude em quatro alturas diferentes acima do solo: 10 m, 65 m, 100 m e 300 m.

Figura 4.14. Alcance Horizontal e Vertical dos Efeitos.



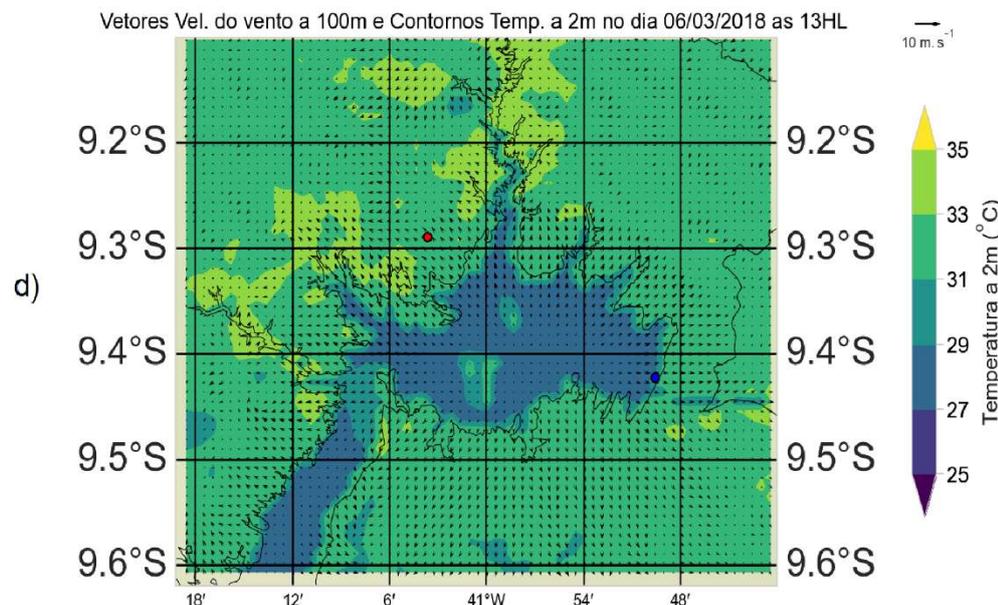
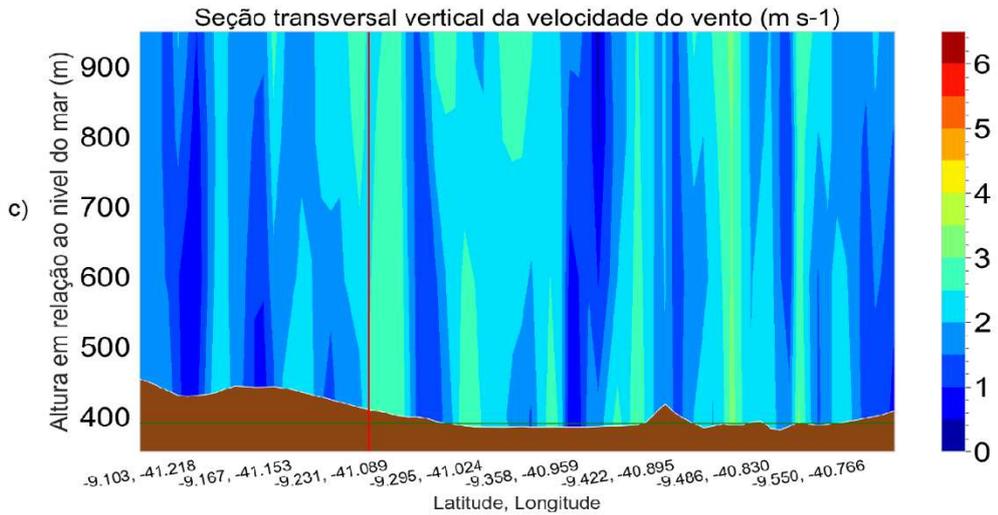
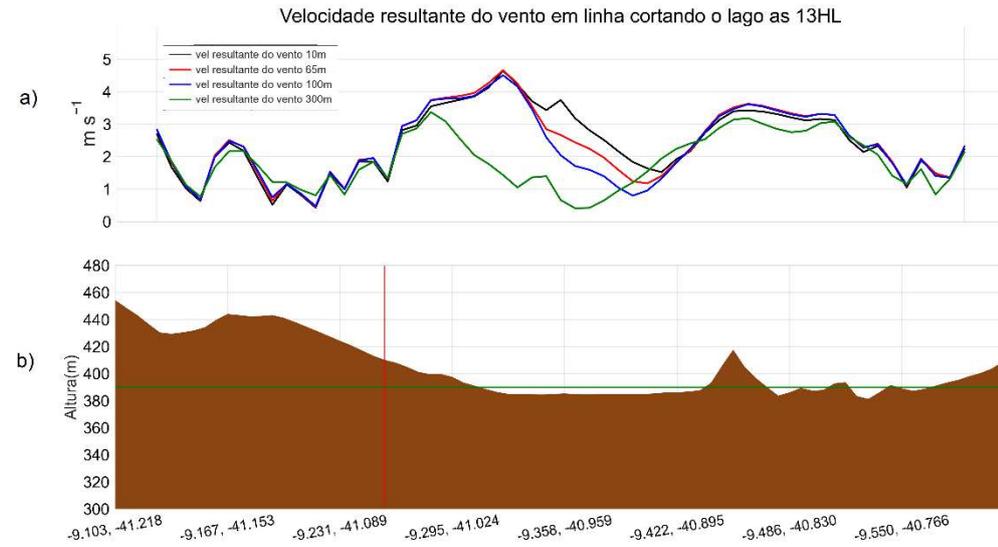
Fonte: autoria própria.

Às 06HL do dia 01/10/2022, quando os ventos eram significativos, a Figura 4.14 d) ilustra que a temperatura sobre o lago e a terra ao redor estavam em equilíbrio. Na figura 4.14 a) a 10 metros de altura, a velocidade do vento aumentou de 4 m s^{-1} , para 8 m s^{-1} sobre a superfície o lago. Isso se deve à baixa rugosidade desta superfície em relação a terra e, em menor medida, à orografia, com maior impacto nas camadas mais baixas. Esse efeito diminui gradualmente com a altitude e se torna praticamente imperceptível a 300 metros de altura. Às 14HL, quando os ventos eram menos intensos, a temperatura a 2 metros acima do lago estava aproximadamente $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ mais baixa do que a temperatura sobre a terra ao redor. As brisas lacustres ou influências térmicas tornaram-se evidentes, refletidas na redução do vento sobre o lago

mostradas na figura 4.14 b) e no alinhamento dos vetores em direção às margens na figura 4.14 e). As curvas de velocidade resultante na Figura 4.14 b) mostram uma redução de 5 m s^{-1} para 3 m s^{-1} exatamente sobre o lago, com efeitos que persistem nas alturas subsequentes, embora com atenuação à medida que a altitude aumenta. Esse efeito tem maior impacto a 300 metros de altura do que o efeito de rugosidade. Após a margem do lago, esse efeito diminui e não influencia significativamente a região da TA2 (indicada pela linha vertical vermelha), onde passa a prevalecer a influência da orografia local.

A Figura 4.15 a) mostra curvas da variação da velocidade do vento resultante cruzando o lago sobreposta a elevação do terreno ao longo do corte na figura 4.15 b). A seção transversal vertical da velocidade do vento é representada na figura 4.15 c) e o campo vetorial de vetores de vento na 4.15 d) no dia 06/03/2018 as 13HL. Neste horário, quando os ventos de mesoescala estavam muito fracos, até altitudes de aproximadamente 200 metros os ventos eram predominantemente influenciados pelo lago. Na Figura 4.15 d) os vetores de vento, a 100 metros de altura, indicam um direcionamento do centro do lago para as bordas, com um sentido de aproximadamente 270° na região do LIDAR e cerca de 180° na borda sul do lago. Próximo à TA2, observa-se um direcionamento mais próximo da direção predominante. Nas Figuras 4.15 a) e 4.15 c), observa-se um aumento de velocidade de aproximadamente 1 m s^{-1} para 3 m s^{-1} , sobre a superfície do lago a 100 metros de altura, indicando a intensidade dos efeitos.

Figura 4.15. Alcance Horizontal e Vertical dos Efeitos com Vertcross.



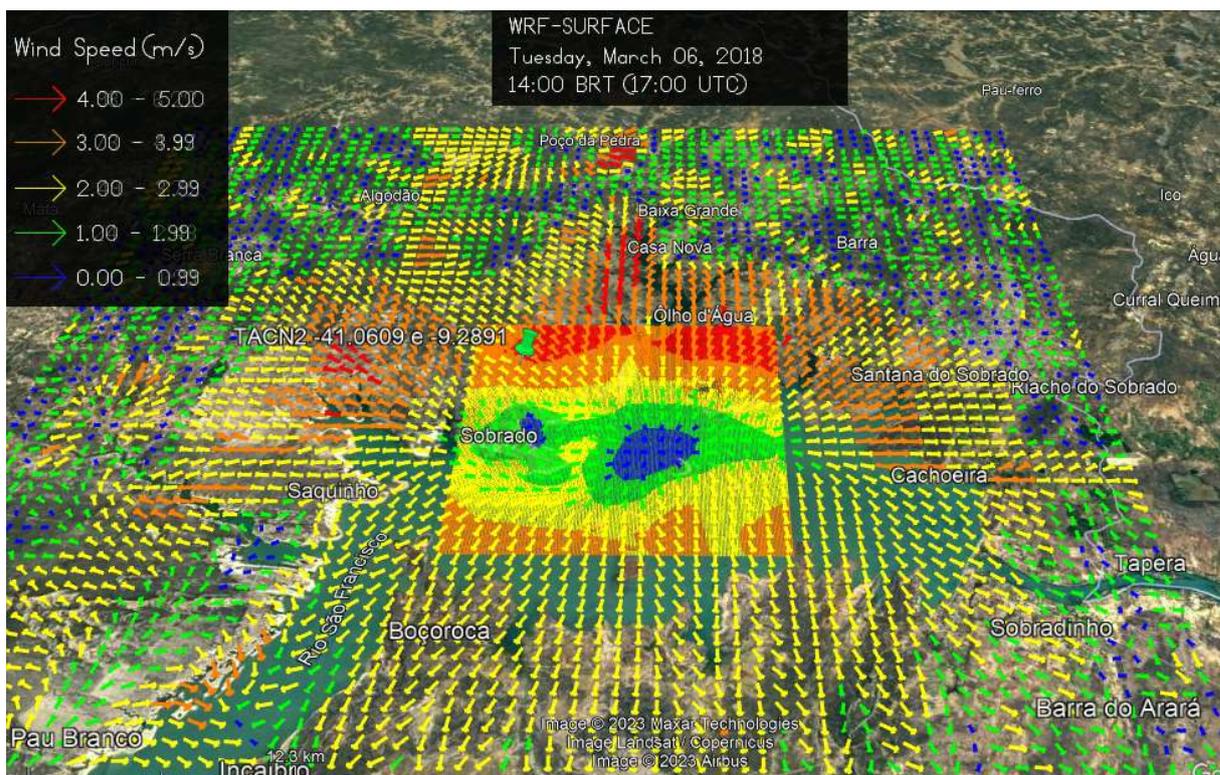
Fonte: autoria própria.

As curvas do vento cruzando o lago da figura 4.15 a) mostram uma redução no centro e uma aceleração em direção à borda mais próxima da TA2. A análise do corte vertical da velocidade do vento, apresentada na Figura 4.15 c), confirma essa redução de velocidade no centro do lago e a aceleração nas bordas. Notavelmente, essa ilustração em corte permite registrar o alcance vertical da influência do efeito térmico, que atinge alturas de aproximadamente 200 metros acima da superfície no centro do lago e cerca de 250 metros nas bordas mais próximas à TA2. A figura 4.15 d) ilustra de forma quantitativa o alcance horizontal da brisa de lago. Verificando que este efeito se dissipa nos limites da localização da TA2, que está aproximadamente a 6 km da borda do lago, é possível considerar que este é o alcance e que este permanece nesta mesma simetria também nas regiões noroeste, norte e leste do lago.

4.7 Aumento da resolução do WRF com acoplamento ao WindNinja.

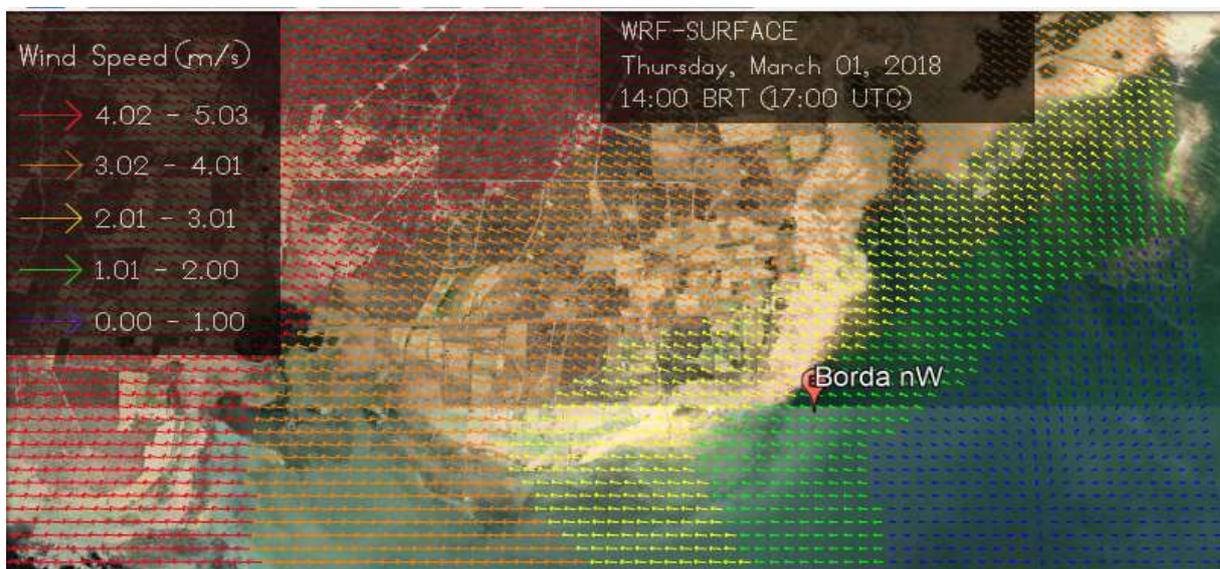
O primeiro momento analisado com o WindNinja foi o dia 06/03/2018, um dia de ventos sinóticos fracos. O horário escolhido foi o de maior contraste térmico lago-terra no dia. Na Figura 4.16 estão representados dois campos sobrepostos projetados no Google Earth, que é a saída gráfica mais conveniente do WindNinja. O campo maior e mais grosseiro é oriundo do modelo WRF usado como entrada no WindNinja. O campo menor e de maior resolução é a saída do WindNinja. Em ambos é visível o ponto de alta pressão no interior do lago devido a velocidade abaixo de $1,0 \text{ m s}^{-1}$, indicada neste local, e a orientação dos vetores sempre do centro para as bordas do lago. Nas bordas próximas a TA2, apontada na marcação verde, a velocidade sobe acima de $2,0 \text{ m s}^{-1}$ e nas proximidades da TA2 atinge valores superiores a $3,0 \text{ m s}^{-1}$. Essa sobreposição dos campos ilustra a capacidade do WindNinja de refinamento e detalhamento dos campos de vento, neste exemplo a resolução foi aumentada de 1000m para 100m.

Figura 4.16. Sobreposição de campos de vento de entrada e saída no WindNinja.



Fonte: autoria própria

Figura 4.17. Campo gerado no WindNinja nas bordas próximas a TA2.



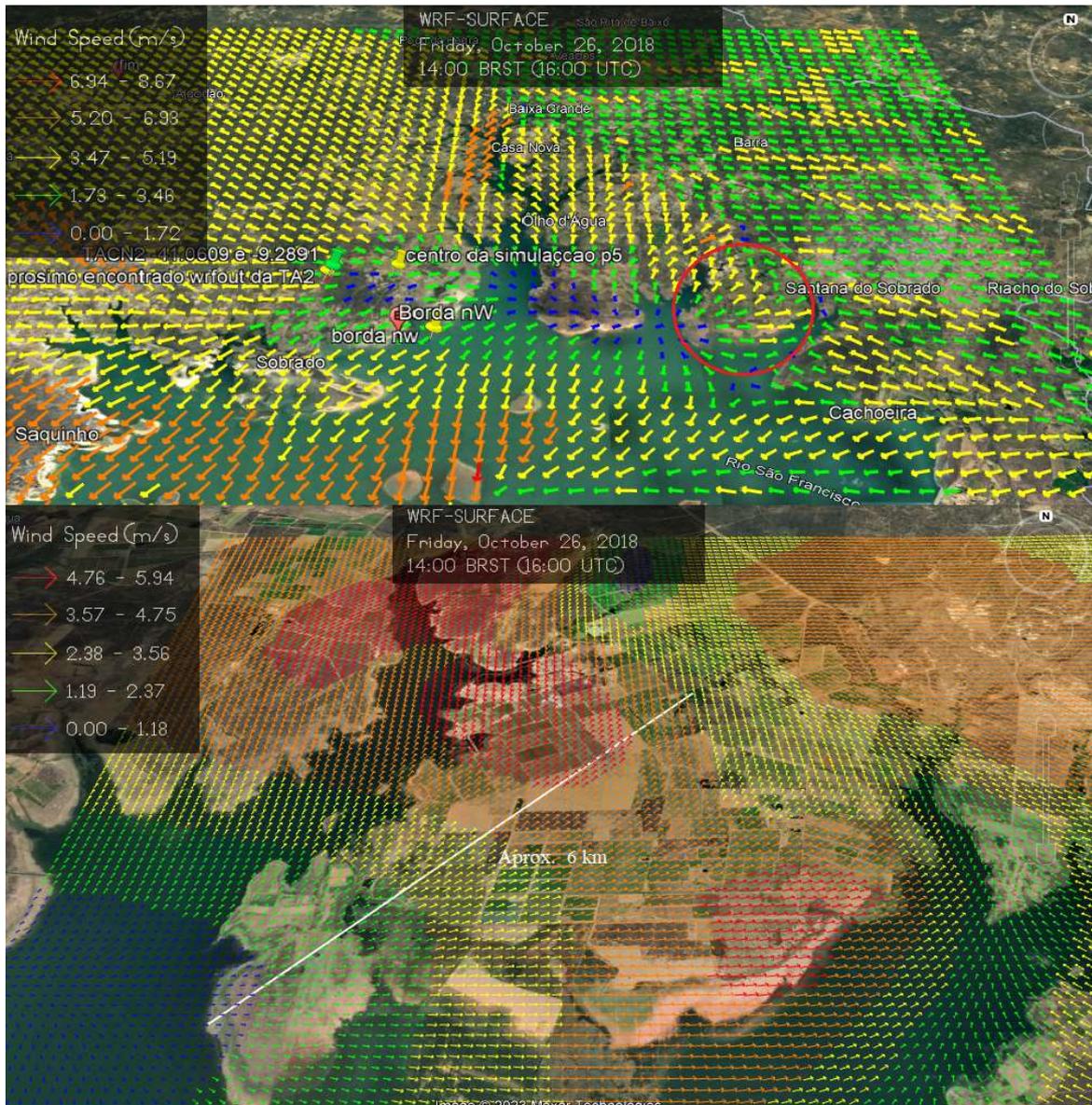
Fonte: autoria própria

A Figura 4.17, saída do WindNinja ampliada no Google Earth para o momento as 14HL do dia 01/03/2018, também revela o efeito da brisa lacustre no sentido do interior do lago para as bordas na proximidade da TA2 e os degraus de aumento da velocidade do vento ao sair do lago. Nesta imagem não é possível definir até onde a influência da brisa alcança, pois, a partir de determinado ponto os ventos sinóticos se

sobrepõem novamente às brisas e o crescimento no mesmo sentido passa a ser influenciado mais pela orografia do que pela brisa e não é verificada nenhuma descontinuidade onde seria possível definir esta fronteira.

A Figura 4.18, registrada no dia 26 de outubro das 2018 às 14HL, no lado do lago mais próximo a barragem, mostra uma zona de inversão de ventos o que possibilita demarcar melhor a interface da brisa com o vento sinótico.

Figura 4.18. Campos gerados no WindNinja: superior dados entrada WRF e inferior saída do WindNinja



Fonte: autoria própria

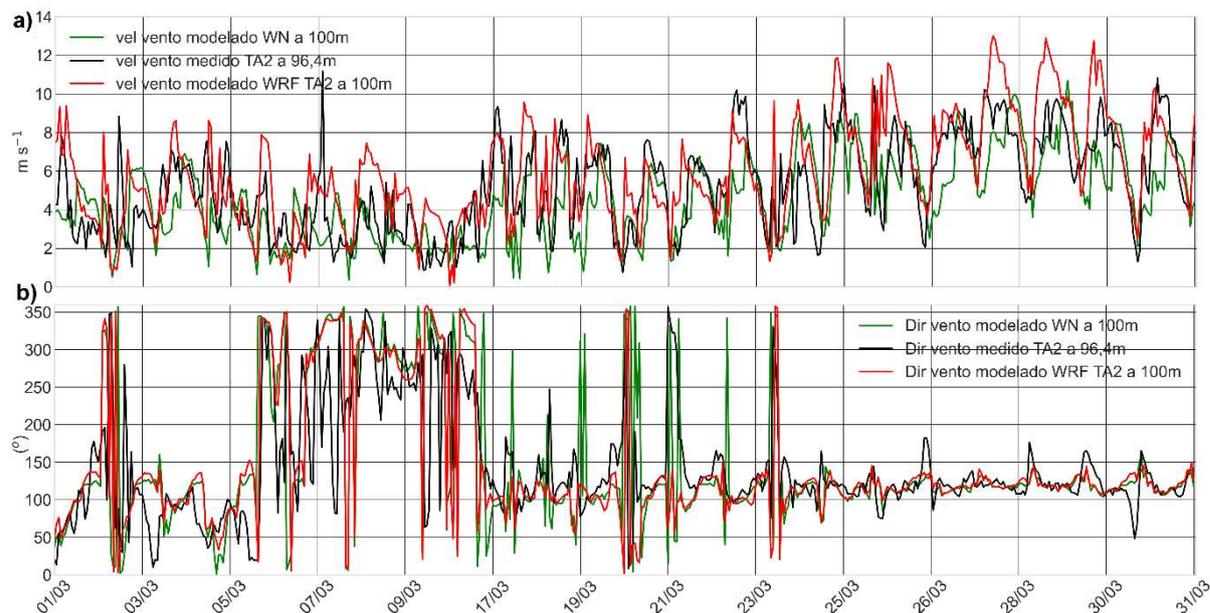
Os ventos da brisa estão no sentido do lago para as bordas e os ventos de maior escala vêm em direção oposta. Na parte superior da imagem, que abrange uma maior parte do lago, é mostrado o campo WRF. Na imagem inferior que mostra a saída

do WindNinja, recortada na área do círculo vermelho indicado na imagem superior, mostra em alta resolução a região da inversão. Na imagem mais detalhada, é possível verificar um degradê com maior quantidade de degraus de variação da velocidade do vento e um detalhamento maior na região de divergência dos vetores. No sentido saindo do lago os vetores mostram um crescimento da velocidade de abaixo de $1,0 \text{ m s}^{-1}$ até as velocidades acima de $4,0 \text{ m s}^{-1}$ chegando em alguns pontos aos $5,0 \text{ m s}^{-1}$ até começar a reduzir e mudar a direção na divergência a cerca de $6,0 \text{ km}$ da borda. Por essa imagem é possível deduzir que este é o limite da influência do efeito térmico.

4.8 Comparativo dados WindNinja e WRF e medidos na TA2

A Figura 4.19 abaixo traz um comparativo entre a velocidade 4.19 a) e a direção 4.19 b) dos ventos medidos na TA2 a $96,4 \text{ m}$, simulados com o WRF a 100 m e refinados com modelo WindNinja em 520 passos horários durante o mês de março de 2018.

Figura 4.19 Comparativo TA2, WRF e WindNinja



Fonte: autoria própria

Ainda nesta perspectiva, a Figura 4.20 traz um comparativo entre a diferença dos valores entre os resultados do WindNinja e os Medidos na TA2 e entre os resultados do WRF e os medidos na TA2, para o mês de março de 2018, para velocidade e direção do vento. A Tabela 4.2 traz uma análise estatística desta comparação.

Figura 4.20 Comparativo Diferenças WRF e WindNinja versus TA2



Fonte: autoria própria

Tabela 4.2. Métricas estatísticas comparativas resultados WindNinja e WRF em relação a TA2.

	WindNinja		WRF	
	Velocidade m.s ⁻¹	Direção (°)	Velocidade m.s ⁻¹	Direção (°)
MBE	-0,63	3,76	0,72	1,52
MAE	1,72	48,43	1,67	41,13
RMSE	2,17	84,51	2,15	73,11
r(Pearson)	0,60	0,48	0,68	0,58

Fonte: autoria própria

Pela Figura 4.20 a) e pelos valores do erro médio da Tabela 4.2 é verificado que o WindNinja, neste período analisado, mostra tendência de subestimar os dados de velocidade enquanto o WRF superestima. No gráfico de direção 4.20 b) verifica-se três trechos distintos no gráfico: no primeiro entre 01/03 e 17/03 tanto o WN quanto o WRF erraram muito, mas erraram de forma similar. No segundo trecho, entre 17/03 e 23/03, também erraram bastante, mas de forma divergente o WN apresentou alguns picos de superestimativa. Já no terceiro trecho, após 23/03, erraram menos e foram convergentes. Houve um aumento na intensidade dos ventos neste período. Pela tabela 4.2 é verificado que, neste período analisado, os indicadores estatísticos são muito próximos para as saídas do WRF e do WindNinja comparados aos medidos na

TA2. Não é possível afirmar que o WindNinja melhorou os dados simulados como WRF.

5 CONCLUSÕES

Não foram verificadas diferenças significativas no regime de ventos na região entre o ano de 2018, lago mais vazio, e o ano de 2022, lago cheio, exceto no período entre janeiro e abril de 2018, quando o vento teve menor intensidade e uma maior variabilidade na direção. Nas comparações gráficas e estatísticas entre os resultados do modelo WRF e dados medidos na TA2 e LIDAR foi observado uma boa correspondência, indicando uma pequena tendência de uma superestimativa do modelo. No entanto, as simulações do modelo WRF representaram muito bem as variações tanto em velocidade como em direção.

Com os resultados muito similares dos indicadores estatísticos no comparativo de simulações entre WindNinja e WRF não é possível determinar que o WindNinja conseguiu melhorar os resultados do WRF nas condições de terreno no entorno da TA2. Para isso é necessário ampliar esta análise considerando um maior conjunto de dados ampliando o período de análise abarcando mudanças na sazonalidade e nas condições de vento e explorar mais o potencial do WindNinja usando o modo conservação de massa e momento, modo de estabilidade atmosférica e fluxos diurnos, potencialidades do programa que não foram exploradas neste trabalho.

Os campos vetoriais de vento são ferramentas interessantes para analisar influências no campo horizontal e até mesmo vertical no caso de análise de campos sobrepostos variando com a altitude, algo que os cortes verticais fornecem com mais objetividade. Neste sentido, o acoplamento WRF e WindNinja foi muito eficaz em conseguir registrar detalhes de elementos de influência meteorológica em escala local, como: um lago, um vale ou uma pequena elevação.

O resultado do vento local é um somatório dos efeitos sinóticos, de mesoescala, de orografia, de rugosidade da superfície e efeitos térmicos tais como brisas lacustres e terrestres. Os efeitos térmicos e de rugosidade tem um alcance vertical de cerca de 300 m acima do nível do lago e de 6 km no plano horizontal. Estes são muito evidentes sobre o lago, mas têm pouco alcance além das bordas. A proposta de ASSIREU, PIMENTA e SOUZA (2011) de aproveitamento eólico dentro dos lagos das

hidrelétricas tem um aspecto desfavorável no caso de Sobradinho: este seria prejudicado sistematicamente por essa influência considerável verificada sobre o lago.

O efeito térmico é o mais significativo e se sobrepõe mais em dias de ventos sinóticos fracos, tanto em altura quando além das bordas. Importante salientar que, devido aos limites de alcance verificados, os efeitos térmicos e de baixa rugosidade da superfície do lago na velocidade e direção do vento, na altura do “hub” de um aerogerador na região de Casa Nova, são pouco significativos ou possuem alguma particularidade que este estudo não conseguiu captar. O efeito local que mais contribui positivamente com a velocidade do vento na região da planta híbrida é a orografia, pois coincide um pediplano com uma suave elevação logo após o lago e uma região sem obstáculos no sentido predominante do vento sinótico, corroborando o resultado obtido por EKHTIARI et al., (2017).

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- i) Fazer simulações e modelos desconsiderando a presença do lago e comparando com o lago cheio;
- ii) Realizar medições com o LIDAR e ou SODAR na borda próxima a planta híbrida para melhor identificar a formação e o desenvolvimento da CLI;
- iii) Explorar os efeitos com outras variáveis tais como, umidade, temperatura e fluxos de calor, essa atuação conjunta das variáveis pode apontar resultados quantitativos mais precisos;
- iv) Aumentar o período de análise no sentido de identificar alguma alteração climática.

REFERÊNCIAS

- AHRENS, D. C., **Meteorology today: an introduction to weather, climate and the environment**. 9. ed. Brasil: Brooks/Cole, 2009.
- ALMEIDA, A. P. **Análise multitemporal e espacial dos usos e cobertura das terras no município de Casa Nova, Bahia, no período de 1996 a 2011**. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Feira de Santana.
- ANA. Medição SIN. 2023. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin>>. Acesso em: 22 Jun. 2023.
- ASSIREU, A. T.; PIMENTA, F. M.; De FREITAS, R. M. Observações e modelagem da camada limite interna no entorno de extensos sistemas aquáticos. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 305-311, 2016.
- ASSIREU, A.T., PIMENTA, F.M., SOUZA, V. Assessment of the Wind Power Potential of Hydroelectric Reservoirs. In: Alcantara, E. (Ed.). **Energy Resources: Development, Distribution and Exploitation**. Nova York: Nova Publishers, 2011. p. 1-28.
- ATKINSON, B. W., 1981: **Mesoscale Atmospheric Circulations**. Academic Press, 495 pp.
- BUHR, R and Kassem, H K, H., STEINFELD, G., ALLETTO, M., WITHA, B., DÖRENKÄMPER M. A Multi-Point Meso–Micro Downscaling Method Including Atmospheric Stratification. **Energies**, v. 14, n. 4, p. 1191, 2021
- CAMILO JUNIOR, W. O. et al. Análise comparativa de dados de reanálise era5 e observacionais de escoamento atmosférico para estudos de geração eólica no nordeste brasileiro. In: XIII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. **Anais [...]**: Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, 2022. p. 225–237.
- CARVALHO, D., ROCHA, A., SANTOS C.S., PEREIRA, R. Wind resource modelling in complex terrain using different mesoscale–microscale coupling techniques. **Applied Energy**, v. 108, p. 493-504, 2013.
- CARVALHO, D.; GUARDIA, E. LIMA, J. W., Technical-economic analysis of the insertion of PV power into a wind-solar hybrid system, **Solar Energy**, Volume 191, 2019,
- CARVALHO, M. A. V. de; OYAMA, M. D. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical atlântica: Aspectos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 305-316, 2013.
- CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Dados de Geração de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/pt/web/quest/dados-e-analises/dados-geracao>, Acesso em: jun. 2023.

- CORREIA, M. F.; DA SILVA DIAS, M. A. F. Variação do nível do reservatório de Sobradinho e seu impacto sobre o clima da região. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 157, 2003.
- CORREIA, M. F.; DIAS, M. S.; ARAGÃO, M. S. Soil occupation and atmospheric variations over sobradinho lake área. part two: A regional modeling study. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 94, p. 115–128, 2006b
- COSTA, P. C. de S. **Tendências e ciclos médios da velocidade do vento e complementaridade energética em regiões próximas a empreendimento eólicos no Nordeste do Brasil**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- CPRM. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, Diagnóstico do Município de Casa Nova – Bahia. Salvador: CPRM/PRODEEM, 2005. 28p.
- CROSMAN, Erik T.; HOREL, John D. Idealized large-eddy simulations of sea and lake breezes: Sensitivity to lake diameter, heat flux and stability. **Boundary-layer meteorology**, v. 144, p. 309-328, 2012.
- CROSMAN, Erik T.; HOREL, John D. Sea and lake breezes: A review of numerical studies. **Boundary-layer meteorology**, v. 137, n. 1, p. 1-29, 2010.
- CZARNOBI, A. F., R. S. Prudêncio, and M. L. G. Rodrigues. "A Circulação Atmosférica Local na Região da Usina de Itá." In Congresso Brasileiro de Meteorologia, XIV. 2006.
- DANSO, D. K., François, B., Hingray, B., Diedhiou, A. Assessing hydropower flexibility for integrating solar and wind energy in West Africa using dynamic programming and sensitivity analysis. Illustration with the Akosombo reservoir, Ghana. **Journal of Cleaner Production**, v. 287, p. 125559, 2021.
- DECASTRO, M., Salvador, S., Gómez-Gesteira, M., Costoya, X., Carvalho, D., Sanz-Larruga, F. J., & Gimeno, L. Europe, China and the United States: Three different approaches to the development of offshore wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 109, p. 55-70, 2019.
- DRANKA, G. G.; CUNHA, J.; LIMA, J. D.; FERREIRA, P. V. **Economic evaluation methodologies for renewable energy projects**. American Institute of Mathematical Sciences (AIMS), 2020.
- EKHTIARI, N., GROSSMAN-CLARKE, S., KOCH, H., MEIRA DE SOUZA, W., DONNER, R. V., VOLKHOLZ, J. Effects of the lake Sobradinho reservoir (Northeastern Brazil) on the regional climate. **Climate**, v. 5, n. 3, p. 50, 2017.
- ELETRONBRAS CHESF. Descrição do aproveitamento de Sobradinho. Disponível em: (<https://www.chesf.com.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Sobradinho.aspx>). Acesso em: abr. 2023.

- FEDOROVA, N., DOS SANTOS, D. M. B., SEGUNDO, M. M. L., LEVIT, V. Middle tropospheric cyclonic vortex in Northeastern Brazil and the Tropical Atlantic. **Pure and Applied Geophysics**, v. 174, p. 397-411, 2017.
- FERREIRA, M. D. de Melo. **Estudo da velocidade do vento através de downscaling dinâmico em alta resolução sobre terreno complexo no Nordeste do Brasil**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- FIGLIUOLO, G. C. **Variabilidade de TSM no Atlântico Tropical em respostas às teleconexões de diferentes Enos e seus impactos na precipitação na América do Sul**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Amazonas.
- FIRELAB. Tutoriais WindNinja . Missoula Fire Sciences Laboratory , 2018 Disponível em: <<https://weather.firelab.org/windninja/tutorials/>>. Acesso em 06/03/2023.
- GARRATT, J. R. **The Atmospheric Boundary Layer**. 1ª ed., New York, Cambridge University Press, 1992.
- GARRATT, J. R. "The Internal Boundary Layer – A Review". **Boundary Layer Meteorology**, v.50, pp.171–203, 1990.
- GILLILAND, J. M.; KEIM, B. D. Position of the South Atlantic Anticyclone and Its Impact on Surface Conditions across Brazil. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, [s.l.], v. 57, n. 3, p.535-553, mar. 2018. American Meteorological Society.
- GOMES, H. B. et al. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. **Climate Dynamics**, [s.l.], p.1060-1073, 15 fev. 2019. Springer Nature.
- HALEY, M., BROWNRIGG, R., HALLOCK, K., LADWIG, B.; CLYNE, J. NCL and the Pivot to Python Discussion and Roadmap, January 2019; NCAR
- HARI PRASAD, K. B. R. R., REDDY, B. R., SRINIVAS, C. V., RAKESH, P. T., BASKARAN, R., VENKATRAMAN, B. Simulation of atmospheric dispersion of airborne effluent releases at a tropical coastal site under sea-breeze circulation and internal boundary layer development. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 131, p. 1617-1634, 2019.
- IAKUNIN, M.; SALGADO, R.; POTES, M. Breeze effects at a large artificial lake: summer case study. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 10, p. 5191-5210, 2018.
- JIMÉNEZ-ESTEVE, B. et al. Land use and topography influence in a complex terrain area: A high resolution mesoscale modelling study over the Eastern Pyrenees using the WRF model. **Atmospheric Research**, [s.l.], v. 202, p.49-62, abr. 2018. Elsevier BV.

- JÚNIOR, C. M. L. O. **Estimativa do Campo de Vento em Alta Resolução com Assimilação Híbrida ETKF-3DVAR para Estimativa de Energia Eólica**. Dissertação de Mestrado. 2020. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - RS.
- KESSEL, D. G. Global warming—facts, assessment, countermeasures. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 26, n. 1-4, p. 157-168, 2000.
- KUNIN, P.; ALPERT, P.; ROSTKIER-EDELSTEIN, D. Investigation of sea-breeze/foehn in the Dead Sea valley employing high resolution WRF and observations. **Atmospheric Research**, [s.l.], v. 229, p.240-254, nov. 2019. Elsevier BV.
- LADWIG, W. (2017). wrf-python (Version 1.3.4.1) [Software]. Boulder, Colorado: UCAR/NCAR. <https://doi.org/10.5065/D6W094P1>
- LAIRD, N. F.; WALSH, J. E.; KRISTOVICH, D. A.R. Model simulations examining the relationship of lake-effect morphology to lake shape, wind direction, and wind speed. **Monthly weather review**, v. 131, n. 9, p. 2102-2111, 2003.
- LI, J.; YU, X. B. LiDAR technology for wind energy potential assessment: Demonstration and validation at a site around Lake Erie. **Energy Conversion and Management**, v. 144, p. 252-261, 2017.
- LI, J.; YU, X. B. Onshore and offshore wind energy potential assessment near Lake Erie shoreline: A spatial and temporal analysis. **Energy**, v. 147, p. 1092-1107, 2018.
- LUZ, T. d.; MOURA, P. Power generation expansion planning with complementarity between renewable sources and regions for 100% renewable energy systems. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 29, n. 7, p. e2817, 2019.
- MAGEAU, M., SUNDERLAND, B., STARK, S., GRAHAM, S. Wind resource development along Minnesota's north shore of Lake Superior. **Renewable Energy**, v. 96, p. 812-823, 2016.
- MARINHA, D. B. Cartas Sinóticas. 2023. Centro de Hidrografia da Marinha MARINHA DO BRASIL. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>>.
- MELO, E. C. de S., ARAGÃO, M. R. S., CORREIA, M. de F. Regimes do vento à superfície na área de Petrolina, submédio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v. 29, n. 2, p.229-241, jun. 2014.
- MILLER, S.T.K., KEIM, B.D., TALBOT, R.W., MAO, H. "Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts". **Reviews of Geophysics**, v.41, n.3, p.1011-1042. 2003, DOI10.1029/2003RG000124.
- MOREIRA, D.; VILHENA, M. (Ed.). **Air pollution and turbulence: modeling and applications**. CRC Press, 2009.

- MOSCATI, M. C. L.; GAN, M. A. Rainfall variability in the rainy season of semiarid zone of northeast Brazil (NEB) and its relation to wind regime. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 493–512, 2007.
- MUSIAL, W., GREEN, R., DEMEO, E., COOPERMAN, A., HOUSNER, S., MARQUIS, M., ... RANGEL, E. Great Lakes Wind Energy Challenges and Opportunities Assessment, 2023.
- NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)(2013). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global. Distributed by OpenTopography. Disponível em: <https://doi.org/10.5069/G9445JDF>. Acesso em: out. 2018
- NASA-JPL; CALTECH. Is the Sun causing global warming? 2023. Global Climate Change. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/faq/14/is-the-sun-causing-global-warming/>. Acesso em: out. 2023
- NASCIMENTO, M. L. L. **A camada limite planetária na região da barragem do Alqueva**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade de Lisboa.
- NOAA. Cold Warm Episodes by Season. 2023. NOAA/ National Weather Service National Centers for Environmental Prediction Climate Prediction Center. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: set. 2023
- OLIVEIRA, A. M. de; SILVA, J. R. da; GOMES, R. G. Testes nas parametrizações de microfísica e de camada limite planetária na simulação de um sistema convectivo de mesoescala, **Universidade Federal de Pelotas**, 2010.
- OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. Araújo. Estudo de variabilidade do vento em escala sazonal sobre o nordeste brasileiro utilizando o RAMS: os casos de 1973-1974 e 1982-1983. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v. 26, n. 1, p.53-66, mar. 2011.
- ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of the American Meteorological Society**, p. 527-530, 1975.
- PANOFSKY, H. A.; TOWNSEND, A. A. Change of terrain roughness and the wind profile. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 90, n. 384, p. 147-155, 1964.
- PELLEGRINI, C. C., ARAUJO, C., REIS, A., PIMENTA, F. M., ASSIREU, A. T. Análise do desempenho do modelo WRF num episódio de vento intenso e persistente num grande reservatório tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 121-138, 2019.
- PELLEGRINI, C. C., NETO, A. V., ASSIS, J. V. B., ASSIREU, A. T. Um Estudo Numérico da Intensificação do Vento em Reservatórios de Centrais Hidroelétricas da Região Sudeste do Brasil. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 197-203, 2016.
- PIELKE, R. A. **Mesoscale Meteorological Modeling**. Academic Press, 1984 612 pp.

- POUDEL, R. C.; TINNESAND, H.; BARING-GOULD, I. E. An evaluation of advanced tools for distributed wind turbine performance estimation. In: **Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2020. p. 012017.
- PURIFICAÇÃO, C. et al. Lake and land breezes at a Mediterranean artificial lake: observations in Alqueva Reservoir, Portugal. **Atmosphere**, v. 12, n. 5, p. 535, 2021.
- RAMOS, D. N. da S., LYRA, R. F. da F., SILVA JUNIOR, R. S. (2013). Previsão do vento utilizando o modelo atmosférico WRF para o estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 163-172, 2013.
- RAMOS, R. P. L. Precipitation characteristics in the Northeast Brazil dry region. **Journal of Geophysical Research**, v. 80, n. 12, p. 1665-1678, 1975.
- RICHARDSON, M. I.; TOIGO, A. D.; NEWMAN, C. E. Planet WRF: A general purpose, local to global numerical model for planetary atmospheric and climate dynamics. **Journal of Geophysical Research: Planets**, v. 112, n. E9, 2007.
- ROBALLO, Suelen Trindade; FISCH, Gilberto. Escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): parte I - aspectos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s.l.], v. 23, n. 4, p.510-519, dez. 2008.
- ROSA, C. d. O. C. S.; CHRISTO, E. d. S.; COSTA, K. A.; SANTOS, L. d. . Assessing complementarity and optimising the combination of intermittent renewable energy sources using ground measurements. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, n. 258, p. 120946, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120946>
- SALVADOR, N. **Estudo da Camada Limite Atmosférica em Regiões Metropolitanas Costeiras com Simulações de Brisa Marinha**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo.
- SANTOS, A. T. S.; SILVA, C. M. S. Seasonality, Interannual Variability, and Linear Tendency of Wind Speeds in the Northeast Brazil from 1986 to 2011. **The Scientific World Journal**, [s.l.], v. 2013, p.1-10, 2013. Hindawi Limited.
- SANTOS, J. G. M.; SIMÕES, J. L. D.; RAMOS, D. N. S.; EICHHOLZ, C. W. **Aplicações de Python em Geociências**. INPE, 2022.
- SCHULZ-STELLENFLETH, J. et al. Coastal impacts on offshore wind farms—a review focussing on the german bight area. **Meteorol. Z**, v. 31, p. 289–315, 2022.
- SEGAL, M. et al. Small lake daytime breezes: Some observational and conceptual evaluations. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 6, p. 1135-1148, 1997.
- SILVA, A. R., PIMENTA, F.M, ASSIREU, A. T., SPYRIDES, M.H. C., Complementarity of Brazil's hydro and offshore wind power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 56(2016)413–427, 2015

- SILVA, G. R. **Características de vento da região Nordeste: Análise, Modelagem e Aplicações para Projetos de Centrais Eólicas**. 2003. 131f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- SILVA, L. A. F. **Análise da formação de camada limite interna em regiões costeiras tropicais utilizando sondagens acústicas e o modelo atmosférico WRF**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.
- SILVA, P. K. O.; ARAGÃO, M. R. da S. ; ; CORREIA, M. de F. ; SANTOS, S. de A. . Influência de circulações locais em áreas de aproveitamento de potencial eólico na região do Lago de Sobradinho. **Ciência e Natura**. 2016;
- SIMPSON, J.E., 1994: **Sea breeze and local winds**. Cambridge University Press, UK, 234 pp.
- SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J. B., DUDHIA, J., GILL, D. O., LIU, Z., BERNER, J., ... HUANG, X. -yu. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 (No. NCAR/TN-556+STR), 2021, doi:10.5065/1dfh-6p97
- SMITH, D.A., HARRIS, M., COFFEY, A.S., MIKKELSEN, T., JØRGENSEN, H.E., MANN, J., DANIELIAN, R. Wind lidar evaluation at the Danish wind test site in Høvsøre. **Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology**, v. 9, n. 1-2, p. 87-93, 2006.
- SOUZA, N. B. P.; NASCIMENTO, E. G. S., SANTOS, A. A. B., MOREIRA, D. M. Wind mapping using the mesoscale WRF model in a tropical region of Brazil. **Energy**, v. 240, p. 122491, 2022.
- SRINIVASAN, T.; GOPI RETHINARAJ, T. Fukushima and thereafter: Reassessment of risks of nuclear power. **Energy Policy**, v. 52, p. 726–736, 2013.
- STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. 1ª ed., Massachusetts, Kluwer Academic Norwell, 1988.
- TAVARES, L. F. de A., SHADMAN, M., ASSAD, L. P. de F., ESTEFEN, S. F. Influence of the WRF model and atmospheric reanalysis on the offshore wind resource potential and cost estimation: A case study for Rio de Janeiro State. **Energy**, v. 240, p. 122767, 2022.
- TORMA, P.; KRÁMER, T. Wind shear stress interpolation over lake surface from routine weather data considering the IBL development. **Periodica Polytechnica-Civil Engineering**, p. No.-9542, 2016.
- VIEIRA, B. J. A. **Metodologia para elaboração de mapa de potencial eólico de regiões metropolitanas**. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- WAGENBRENNER, N. S.; FORTHOFER, J. M.; LAMB, B. K.; SHANNON, K. S.; BUTLER, B. W. Downscaling surface wind predictions from numerical weather

prediction models in complex terrain with windninja. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 8, p. 5229–5241, 2016.

WAGENBRENNER, N. S.; FORTHOFFER, J. M.; PAGE, W. G. .; BUTLER, B. W. Development and evaluation of a reynolds-averaged navier–stokes solver in windninja for operational wildland fire applications. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, p. 672, 2019

WALLACE, J. M.; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science: an introductory survey**. Elsevier, 2006.

WANG, W. Y.; LIU, W.; MA, X. J. Analysis for influence upon local climate factors of reservoir area of hydropower station after water storage. Applied Mechanics and Materials, **Trans Tech Publications Ltd.**, v. 212, p. 245–252, 2012

WANG, Y., Gao, Y., Qin, H., Huang, J., Liu, C., Hu, C., ... & Lee, X. Spatiotemporal characteristics of lake breezes over Lake Taihu, China. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 56, n. 7, p. 2053-2065, 2017.

WANG, Z.; SHEN, C.; LIU, F. A conditional model of wind power forecast and its application in scenario generation. **Applied Energy**, v. 212, p. 771–785, 2018

WRF USERS PAGE. WRF Model Users Page. 2023. <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/modeloverview.htm>

YEMER, F. M. (2010). **Urban Wind Map for Delft, Rotterdam and Zoetermeer**. Delft University of Technology.

ZHANG, X., HUANG, J., LI, G., WANG, Y., Liu, C., ZHAO, K., ... LEE, X. Improving lake-breeze simulation with WRF nested LES and lake model over a large shallow lake. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 58, n.8, p. 1689-1708, 2019