



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MONITORAMENTO METEOROLÓGICO E  
HIDRODINÂMICO DE UM AMBIENTE LÊNICO EM UMA  
REGIÃO METROPOLITANA AMAZÔNICA**

**Dissertação apresentada por:**

**JOÃO VITOR DA SILVA GOMES**

**ORIENTADOR: DR. RENAN PEIXOTO ROSÁRIO**

---

BELÉM – PARÁ

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**MONITORAMENTO METEOROLÓGICO E  
HIDRODINÂMICO DE UM AMBIENTE LÊNICO EM UMA  
REGIÃO METROPOLITANA AMAZÔNICA**

Dissertação apresentada por:

**JOÃO VITOR DA SILVA GOMES**

**ORIENTADOR: DR. RENAN PEIXOTO ROSÁRIO**

---

BELÉM – PARÁ

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

G633m Gomes, João Vitor da.  
Monitoramento meteorológico e hidrodinâmico de um ambiente lântico em uma região metropolitana amazônica / João Vitor da Gomes, . — 2025.  
xii, 100 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Belém, 2025.

1. Elementos meteorológicos. 2. Hidrodinâmica. 3. Lagos Urbanos. I. Título.

CDD 551.48

---



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

# MONITORAMENTO METEOROLÓGICO E HIDRODINÂMICO DE UM AMBIENTE LÊNICO EM UMA REGIÃO METROPOLITANA AMAZÔNICA

Dissertação Apresentado Por:

**JOÃO VITOR DA SILVA GOMES**

**Como requisito parcial para à obtenção de Grau de Mestre em Oceanografia na Área de  
concentração: Linha 1 – Processos em Sistemas Costeiros e Oceânicos.**

Aprovado: 25/04/2025

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário  
(Orientador – UFPA)

---

Prof.ª Dr.ª Ana Paula Linhares Pereira  
(Membro – UFPA)

---

Prof. Dr. Maamar El-Robrini  
(Membro – UFPA)

---

Prof. Dr. Maurício do Nascimento Moura  
(Membro – UFPA)

*In Memoriam* de Carolina Sousa, com eterna gratidão.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe Ana Gomes, que sob muito sol, fez-me chegar até aqui, na sombra.

A minha avó Maria Gomes, se hoje concluir mais uma etapa, saiba que a senhora tem um papel muito grande nessa caminhada.

Ao Aldrin Zydanne por ser uma irmão de longas datas e por todas as idas em campo. Se esse trabalho está finalizado hoje, saiba que você desempenhou um papel importante nessa caminhada.

Ao meu irmão Eduardo Pantoja, que ficou várias madrugadas ao meu lado tentando decifrar rotinas em Python e me incentivando a usar IA. Obrigado pelo aprendizado compartilhado e pelo apoio incondicional.

Ao maior churrasqueiro que já conheci, Enki Gautier. Nossas confraternizações não teriam a mesma graça sem ele. Valeu pelas boas histórias compartilhadas e pelo alto-astral.

Ao meu amigo Lucas Pereira, sua ajuda e apoio foram fundamentais, especialmente nos momentos de maior desafio. Sou muito grato pela sua amizade e por acreditar no meu potencial.

Ao Daniel Sotão, pelo socorro nas dificuldades, pelo compartilhamento de aprendizado nas rotinas de Python e pelo apoio nas coletas de campo. A parceria de um amigo faz toda a diferença, e ele provou exatamente isso.

Ao meu parceiro Marco Callado por todo sofrimento compartilhado durante o projeto do Utinga e por toda ajuda proporcionada no tratamento dos dados hidrodinâmicos.

A Michelly Moreira, a “irmã” que o mestrado me deu. Obrigado pelo apoio constante, pelo compartilhamento de experiências e pelos incentivos pra que eu continuasse tentando, apesar de tudo. Foi parceria pra vida toda.

Ao meu brother e estagiário Erithon Santos, que tornou essa jornada mais pesada um pouquinho mais leve, compartilhando tanto trabalho quanto algumas boas risadas pelo caminho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renan Peixoto, pelo aprendizado compartilhado, pelo apoio constante e pelas orientações que me ajudaram tanto a vencer as dificuldades quanto a me tornar um profissional melhor.

E ao LOF, pelo espaço compartilhado, pelo aprendizado junto e pelo apoio pra que tudo isso acontecesse.

Aos que me ajudaram de forma direta e indireta durante minha graduação.

Eternamente grato a todos!

“O mar é tudo. Cobre sete décimos do globo terrestre. Seu sopro é puro e saudável. É o imenso deserto onde o homem nunca está só, pois sente a vida borbulhar em toda parte.”

**JÚLIO VERNE**

## RESUMO

A crescente urbanização e a conseqüente pressão sobre os recursos hídricos têm intensificado a necessidade de monitorar e gerenciar ecossistemas aquáticos. O Parque Estadual do Utinga, localizado em Belém-PA, abriga um importante lago que desempenha um papel crucial no abastecimento da região. No entanto, a falta de planejamento urbano e o crescimento populacional desordenado têm colocado em risco a qualidade e a quantidade de água desse recurso hídrico. Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo avaliar as condições hidrodinâmicas e meteorológicas do lago Água Preta, visando contribuir para a sua conservação e gestão sustentável. As variáveis meteorológicas foram medidas por meio de uma estação meteorológica ao longo de 12 meses. Os dados foram disponibilizados em intervalos de 60 minutos. A aquisição dos dados hidrodinâmicos foram realizados usando instrumentos como o ADCP, que mede a intensidade e direção de corrente em intervalos de 50 cm ao longo da coluna d'água; o correntômetro eletromagnético que foi utilizado para medições durante o período menos chuvoso (seco) e chuvoso ao longo de 48 horas, a fim de validar o padrão hidrodinâmico do lago; o CTD responsável por medir o perfil vertical da temperatura e também foram instalados sensores de pressão da levellogger fundeados em locais estratégicos. Após análises, é possível afirmar que a velocidade de corrente do lago é lenta. Os fatores meteorológicos se mantiveram dentro dos parâmetros encontrados por outros autores, confirmando a consistência dos dados coletados com estudos anteriores. A análise hidrodinâmica revelou padrões de circulação restritos, com pouca movimentação das águas, principalmente próxima ao fundo. Sua principal forçante é através do acionamento das bombas que alimentam esse sistema com água vinda do rio Guamá. Em superfície, o deslocamento também é pequeno, pois os ventos não atingem valores elevados, o que dificulta a circulação nesse ambiente. Esses resultados destacam a relevância do monitoramento contínuo para a gestão eficiente do lago, especialmente em um contexto de pressão ambiental crescente devido à urbanização desordenada. As informações obtidas fornecem uma base sólida para futuras ações de conservação, contribuindo para a manutenção da biodiversidade e a sustentabilidade do abastecimento de água na região.

**Palavra-chave:** elementos meteorológicos; hidrodinâmica; lagos urbanos.

## ABSTRACT

The increasing urbanization and the resulting pressure on water resources have intensified the need to monitor and manage aquatic ecosystems. The Utinga State Park, located in Belém, Pará, is home to an important lake that plays a crucial role in supplying water to the region. However, the lack of urban planning and the disorderly population growth have jeopardized both the quality and quantity of this water resource. In light of this scenario, the present study aimed to evaluate the hydrodynamic and meteorological conditions of Água Preta Lake, with the goal of contributing to its conservation and sustainable management. Meteorological parameters were measured using a weather station over a 12-month period, with data made available at 60-minute intervals. Hydrodynamic data were collected using instruments such as the ADCP, which measures current intensity and direction at 50 cm intervals along the water column; an electromagnetic current meter, used for 48-hour measurements during both dry and rainy seasons to validate the lake's hydrodynamic patterns; and a CTD profiler, which measured the vertical temperature profile. Additionally, levellogger pressure sensors were deployed at strategic locations. After analysis, it was found that the lake's current velocity is low. Meteorological factors remained within the ranges reported by other authors, confirming the consistency of the collected data with previous studies. The hydrodynamic analysis revealed restricted circulation patterns, with limited water movement, especially near the bottom. The main driving force of the system is the operation of pumps that supply the lake with water from the Guamá River. Surface water movement is also limited, as wind speeds are low, hindering circulation in this environment. These results highlight the importance of continuous monitoring for the efficient management of the lake, especially in the context of growing environmental pressure caused by unplanned urbanization. The information obtained provides a solid foundation for future conservation actions, contributing to the preservation of biodiversity and the sustainability of the region's water supply.

**Keyword:** meteorological elements; hidrodinamic; urban lakes.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização do Parque Estadual do Utinga. A linha em vermelho mostra os limites do parque; a linha em preto mostra os limites municipais. ....	13
Figura 2 – Mapa hidrográfico dos lagos Água Preta, Bolonha e a bacia do rio Aurá. Fonte: Braz & Mello (2005) .....	14
Figura 3 – Sistema de adução e captação de água dos lagos. Fonte: Pereira 2004 (adaptado). 16	16
Figura 4 – Sistema de adução utilizado para a captação de água do rio Guamá com destino ao lago Água Preta. (A) Imagem de satélite mostrando a visão aérea do ponto de captação; (B) Estrutura de gradeamento, onde ocorre a entrada da água e a retenção de materiais sólidos de maior porte; (C) Conjunto de quatro das oito bombas responsáveis pela captação mecânica da água; (D) Tubulações que conduzem a água bombeada em direção ao lago Água Preta. ....	16
Figura 5 – Canal de ligação entre os lagos Água Preta e Bolonha. (A) Entrada do sistema; (B) estrutura que sustentam as comportas; (C) Comportas que separam os dois lagos; (D) Canal de ligação. ....	17
Figura 6 – Classificação Climática do estado do Pará de acordo com a classificação de Koppen. Fonte: Adaptado de Cordeiro et al. (2017). ....	18
Figura 7 – Série histórica (1989 - 2018) da precipitação e temperatura média mensal da estação meteorológica de Belém. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019). .	19
Figura 8 – Médias da intensidade e direção do vento, entre os anos de 2003 a 2021, para a cidade de Belém. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (2021). ....	20
Figura 9 – CTD SBE 19plus V2 SeaCAT em operação de perfilamento. Equipamento mede condutividade (precisão $\pm 0,0005$ S/m), temperatura ( $\pm 0,005^\circ\text{C}$ ) e pressão (até 6000 m de profundidade, com precisão de $\pm 0,1\%$ do fundo de escala). ....	21
Figura 10 - Sonda multiparâmetro Aquaread AP-2000 em operação, medindo em tempo real parâmetros como temperatura, condutividade, pH, oxigênio dissolvido (OD), turbidez e profundidade. ....	21
Figura 11 – Levelogger Junior 5 Sensor de pressão para medição de nível d'água, com alta precisão ( $\pm 0,05\%$ FS) e autonomia de até 10 anos. Aplicações em hidrogeologia e monitoramento ambiental. ....	22
Figura 12 – Perfilador Acústico de Corrente por efeito Doppler (ADCP) em operação, realizando medições tridimensionais de velocidade e direção de correntes aquáticas. Equipamento utiliza tecnologia Doppler para perfis contínuos de corrente com precisão de $\pm 0,5\%$ da velocidade medida $\pm 0,5$ cm/s. ....	22

- Figura 13 – O Infinity EM é um registrador de medidor de corrente eletromagnética. O instrumento fornece medições de corrente 2-D de alta precisão, mesmo em condições de baixa dispersão, onde ADVs (Velocímetro Doppler Acústico) não funcionam bem. A faixa de medição vai de 0 a  $\pm 500$  cm s<sup>-1</sup>. O design do instrumento é compacto (1,0 kg no ar) e permite medições de velocidade de corrente virtualmente em qualquer lugar. .23
- Figura 14 – Estação meteolimnométrica automática da empresa AG Solve Monitoramento Ambiental que está localizada as margens do lago Água Preta .....24
- Figura 15 – Materiais presentes na estação de monitoramento automático. Fonte: AgSolve (2023). .....25

## SUMÁRIO

<b>DEDICATORIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>EPIÍGRAFE</b> .....	v
<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	ix
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 JUSTIFICATIVA .....	4
1.2 HIPOTESE .....	4
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	6
2.1 OBJETIVO GERAL .....	6
2.2 OBJETIVO ESPECIFICO.....	6
<b>3 REFERENCIAL TEORICO</b> .....	7
3.1 LAGOS E AMBIENTES LACUSTRES ANTRÓPICOS: ESTRUTURA, FUNÇÃO E PRESSÕES URBANAS.....	7
3.2 ASPECTOS AMBIENTAIS E ECOLÓGICOS DOS LAGOS URBANOS .....	8
3.4 HIDRODINÂMICA DE LAGOS E PROCESSOS DE CIRCULAÇÃO .....	9
3.5 QUALIDADE DA ÁGUA E TRANSPORTE DE CONTAMINANTES .....	10
3.6 NORMAL CLIMATÓLOGICA .....	12
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	13
4.1 ÁREA DE ESTUDO .....	13
<b>4.1.1 Aspectos climatologicos e meteorologicos</b> .....	17
4.2 METODOLOGIA.....	20
<b>4.2.1 Parâmetros hidrodinâmicos</b> .....	20
<b>4.2.2 Parâmetros meteorológicos</b> .....	23
<b>4.2.3 Temperatura do ar e umidade relativa</b> .....	25

<b>4.2.4 Precipitação pluviométrica</b> .....	26
<b>4.2.5 Velocidade e direção do vento</b> .....	27
<b>4.3 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS</b> .....	28
<b>4.3.1 Perfilador acústico de corrente (ADCP)</b> .....	29
<b>4.3.2 Correntômetro eletromagnético</b> .....	29
<b>4.3.3 Temperatura da água – CTD</b> .....	30
<b>4.3.5 Sensor de pressão</b> .....	30
<b>4.3.6 Temperatura e umidade relativa do ar</b> .....	30
<b>4.3.7 Precipitação pluvial</b> .....	31
<b>4.3.8 Velocidade e direção do vento</b> .....	31
<b>4.3.9 Normal climatológica</b> .....	31
<b>4.3.10 Método de preenchimento de falhas</b> .....	31
<b>5 RESULTADOS</b> .....	33
<b>5.1 VARIABILIDADE TEMPORAL DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS E COMPARAÇÃO COM A NORMAL CLIMATOLÓGICA (1991-2020) EM UMA REGIÃO METROPOLITANA AMAZÔNICA</b> .....	34
<b>5.2 HIDRODINÂMICA DE UM AMBIENTE LÊNICO RASO EM UMA REGIÃO METROPOLITANA AMAZÔNICA</b> .....	63
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	96
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	97

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital que desempenha um papel fundamental na sociedade, sendo essencial à vida, à saúde humana e ao funcionamento de diversas atividades econômicas, como agricultura, indústria e geração de energia (Carvalho 2015, Nobrega Neto *et al.* 2016). Além disso, sua presença é indispensável à manutenção dos ecossistemas aquáticos, contribuindo para a biodiversidade e para a regulação climática por meio do ciclo hidrológico (Saes *et al.* 2018). Dessa forma, a preservação e o uso sustentável da água são imperativos para garantir o bem-estar das gerações atuais e futuras (Hailu *et al.* 2009).

O abastecimento de água potável é uma das aplicações mais fundamentais desse recurso, pois está diretamente relacionado à saúde pública e ao desenvolvimento urbano (Tabosa *et al.* 2016). A mesma se faz necessária em todas as facetas da vida urbana, proporcionando água limpa e segura para consumo humano, higiene, saneamento e até mesmo para combater incêndios (Flores & Misoczky 2015). A Organização das Nações Unidas (ONU), decretou que a disponibilidade de água potável confiável além de essencial é um direito garantido à sociedade, pois contribui para a saúde pública e o bem-estar da população (Nações Unidas Brasil 2015).

O acesso a água de qualidade é um direito humano fundamental, e sua falta pode resultar em sérios problemas de saúde, fome e dificuldades econômicas. Sendo assim, investir em infraestrutura de abastecimento de água, conservação e tratamento é essencial para garantir que todos tenham acesso a esse recurso vital e que as sociedades possam prosperar de maneira sustentável (Fenzl *et al.* 2010).

A relação entre o uso das águas a favor da sociedade, implica na sua retirada dos corpos hídricos que podem se dar por meio de lagos, igarapés, dentre outras formas (Sperling 1999). Os lagos, por sua acessibilidade e características de armazenamento, são frequentemente utilizados como mananciais de abastecimento. De acordo com Tundisi (2008), os lagos podem ser classificados conforme sua origem em 11 categorias distintas, são elas: tectônica, vulcânica, movimentos do terreno, glaciação, lagos de solução, ação fluvial ação eólica, na costa, acumulação orgânica, construído por organismo, impactos de meteoritos.

Os Lagos Bolonha (LB) e Água Preta (LAP), localizados na Região Metropolitana de Belém (RMB), apresentam características físico-químicas distintas, influenciadas pela sua localização. Estes corpos d'água se destacam pela alta turbidez, atribuída à presença de matéria orgânica em suspensão, característica comum em ambientes alagados amazônicos

(Vasconcelos & Souza 2011). A coloração escura, especialmente evidente no lago Água Preta, é resultante da decomposição da matéria orgânica e da lixiviação de compostos húmicos provenientes da vegetação circundante (Oliveira *et al.* 2018).

Esses lagos sofrem influência sazonal do ciclo de inundação, com variações significativas nos níveis de água, o que desempenha um papel fundamental na dinâmica dos nutrientes e na concentração de oxigênio dissolvido (Lima *et al.* 2020). A composição química das águas desses lagos reflete a influência das águas pluviais e fluviais da Bacia Amazônica, apresentando baixas concentrações de nutrientes inorgânicos e elevadas concentrações de matéria orgânica dissolvida (Rodrigues & Matos 2018). Essas características físico-químicas únicas conferem aos lagos um valor científico singular, destacando-se como ecossistemas de relevância para estudos científicos e conservação da biodiversidade amazônica.

A eutrofização é uma preocupação significativa nesse ambiente, devido às características físico-químicas únicas desses corpos d'água. A alta carga de matéria orgânica e a baixa concentração de nutrientes inorgânicos tornam esses lagos especialmente vulneráveis à eutrofização, um processo no qual há um aumento excessivo de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, resultando em um crescimento descontrolado de algas e plantas aquáticas (Vasconcelos & Souza 2011).

A matéria orgânica presente nas águas desses lagos fornece substrato adicional para o crescimento de microrganismos decompositores, levando à diminuição da concentração de oxigênio dissolvido durante a decomposição, o que pode resultar em zonas mortas ou hipóxicas (Lima *et al.* 2015). A eutrofização representa uma ameaça à qualidade da água e à biodiversidade desses ecossistemas, demandando monitoramento e estratégias de manejo apropriadas para mitigar seus efeitos negativos.

O estudo climatológico emerge como uma ferramenta crucial na compreensão da análise ambiental de um sistema lacustre. Sua importância se manifesta de maneira significativa para a sociedade, pois oferece uma base sólida para o desenvolvimento de diagnósticos fundamentais. Esses diagnósticos, por sua vez, têm um impacto substancial no planejamento e na gestão do território, sendo essenciais para a preservação da harmonia entre os diversos sistemas que coexistem nesse ambiente complexo (Conti 1996).

Mediante a análise climatológica, torna-se possível a detecção de eventos extremos de tempo e de clima que, bem diagnosticados, servem como base sólida para previsões mais acertivas a curto, médio e longo prazos e que possam ter impactos sobre a condição

do sistema lacustre. Isso, por sua vez, estabelece um alicerce sólido para orientar a tomada de decisões embasadas em informações e fomentar a promoção da sustentabilidade ambiental (Ayoade 1996).

Os lagos representam sistemas sujeitos a uma variedade de fenômenos meteorológicos, com impacto diário das flutuações climáticas. Portanto, a vigilância constante desse ambiente se torna indispensável para uma compreensão aprofundada de sua dinâmica (Esteves 2011). Um exemplo notável é a variação da temperatura da água, um dos parâmetros críticos para a manutenção da integridade do ecossistema, já que influencia diretamente a formação da estratificação térmica. Esta última, por sua vez, pode resultar na redução ou mesmo na ausência de oxigênio nas camadas mais profundas do lago, acarretando consequências significativas para a biota.

O monitoramento meteorológico e hidrodinâmico em um ambiente lacustre é essencial para prevenir uma série de acontecimentos, como por exemplo, em período de tempestades que podem ocasionar o transbordamento ou até mesmo a contaminação por substâncias alóctones, isso ocorre devido à suscetibilidade do terreno a inundações e ao processo de lixiviação (Menezes *et al.* 2002).

Tendo ciência dos elementos climáticos e hidrodinâmicos que um lago possui, torna-se factível a prevenção de transtornos que possam comprometer a integridade do sistema, como por exemplo o descarte irregular de esgoto doméstico diretamente no lago, que uma vez tendo conhecimento das correntes que atuam, é possível mitigar para onde esse material está sendo transportado ou até mesmo identificar a possível fonte deste poluente, já que substâncias adicionadas à água dos rios e lagos, tornam a recuperação dos ecossistemas eutrofizados extremamente complexos e dispendiosa em termos financeiro (Tundisi & Tundisi 2008).

O Parque Estadual do Utinga (PEUt) tem como um de seus principais propósitos a preservação da qualidade da água em seus lagos, garantindo assim o fornecimento de água potável. Dessa forma, é de suma importância conduzir uma análise detalhada das condições ambientais desse ambiente. Isso permitirá a realização de um diagnóstico preciso para avaliar a situação atual do local, bem como identificar potenciais problemas. Essa abordagem é essencial para enfrentar e/ou mitigar possíveis desafios, garantindo assim a preservação e eficiência do principal sistema de abastecimento da região, reconhecendo a sua importância crucial para a comunidade local.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O crescimento urbano acelerado em países em desenvolvimento tem promovido a substituição de modelos de cidades compactas por expansões desordenadas, resultando em significativos impactos ambientais. Essa dinâmica modifica drasticamente a cobertura do solo e exerce pressão crescente sobre ecossistemas sensíveis, especialmente sobre os mananciais urbanos responsáveis pelo abastecimento público (Matlhodi *et al.* 2019, Bordalo 2006).

Na Região Metropolitana de Belém, esse processo afeta diretamente a microbacia hidrográfica do lago Água Preta, situada no Parque Estadual do Utinga. Essa área é considerada estratégica para a conservação da biodiversidade e dos recursos hídricos que abastecem a capital paraense (Souza 2020).

Apesar da existência de infraestrutura para captação e distribuição de água, os desafios quanto à qualidade e disponibilidade hídrica persistem e se agravam. O avanço desordenado da urbanização e o crescimento populacional têm provocado a ocupação irregular do entorno do PEUt, a supressão da vegetação ripária e o lançamento de efluentes domésticos não tratados no lago. Esses fatores comprometem diretamente a integridade do ecossistema aquático e ameaçam a segurança hídrica da região (Oliveira *et al.* 2015).

Diante desse cenário, torna-se fundamental compreender os processos climatológicos e hidrodinâmicos do LAP. Esses mecanismos regulam aspectos cruciais, como a estratificação térmica, a dispersão de poluentes, os níveis de oxigênio dissolvido e a capacidade de autorremediação do sistema. O entendimento dessas variáveis é essencial para subsidiar estratégias eficazes de manejo ambiental.

Esta pesquisa, portanto, responde à necessidade urgente de avaliar as condições limnológicas do lago frente às pressões antrópicas, gerando informações técnicas que possam orientar políticas públicas voltadas à harmonização entre o desenvolvimento urbano e a conservação ambiental. Os resultados obtidos também poderão servir de referência para outras regiões tropicais que enfrentam desafios semelhantes, contribuindo para a promoção da resiliência socioambiental diante das mudanças climáticas e do crescimento demográfico.

## 1.2 HIPÓTESE

Parte-se da hipótese de que a principal forçante hidrodinâmica do lago Água Preta é a ação mecânica das bombas da adutora, responsáveis pela captação e movimentação da água proveniente do rio Guamá. Supõe-se que esse mecanismo induz padrões específicos de circulação interna, influenciando diretamente a distribuição das variáveis físicas, químicas e biológicas ao longo da coluna d'água.

Adicionalmente, considera-se que fatores climáticos, com destaque para a atuação dos ventos, embora secundários em intensidade, exercem influência complementar nos processos de mistura e redistribuição das massas de água, sobretudo nas camadas superficiais. A interação entre esses fatores tende a modular sazonalmente a estrutura térmica e, conseqüentemente, a qualidade da água do lago.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar a variabilidade espacial e temporal dos elementos meteorológicos e hidrodinâmicos em um ambiente lântico, visando compreender suas inter-relações e implicações na dinâmica ecológica do sistema, de modo a contribuir para o manejo sustentável e a preservação desse ecossistema.

### **2.2 OBJETIVO ESPECIFICO**

- Realizar o levantamento hidrodinâmico do Lago Água Preta, mapeando as características de circulação e os padrões de movimentação da água.
- Analisar a variabilidade temporal dos elementos climatológicos, como precipitação, umidade relativa do ar, temperatura do ar, e intensidade e direção do vento, ao longo do período de estudo.
- Investigar as relações entre a variabilidade dos elementos meteorológicos e a hidrodinâmica do lago, avaliando suas implicações no funcionamento ecológico do ecossistema.

### 3 REFERENCIAL TEORICO

#### 3.1 LAGOS E AMBIENTES LACUSTRES ANTRÓPICOS: ESTRUTURA, FUNÇÃO E PRESSÕES URBANAS

Os lagos podem ser classificados segundo sua origem em naturais ou antrópicos. Lagos naturais formam-se por processos geológicos, como a ação de geleiras, movimentos tectônicos, erupções vulcânicas, ou ainda por barramentos naturais de rios causados por deslizamentos ou acúmulo de sedimentos (Esteves 2011). Já os lagos antrópicos, também chamados de reservatórios artificiais, resultam da intervenção humana no ambiente, geralmente por meio de barragens destinadas ao abastecimento de água, geração de energia, irrigação ou contenção de cheias.

Um exemplo típico de reservatórios artificiais de menor escala são os açudes, estruturas comuns no semiárido brasileiro destinadas ao armazenamento de água da chuva. Essas estruturas desempenham papel fundamental no abastecimento de comunidades rurais, na dessedentação de animais e no suporte à agricultura familiar (Rêgo *et al.* 2017). Embora sejam artificiais, os lagos antrópicos podem, com o tempo, adquirir características ecológicas semelhantes às dos sistemas naturais, sustentando comunidades aquáticas complexas e promovendo processos limnológicos relevantes (Albinati 2006).

Os mananciais hídricos, por sua vez, são definidos como corpos d'água superficiais ou subterrâneos utilizados para o abastecimento humano, industrial, rural ou ambiental (Alvim 2015). No contexto urbano, os lagos e reservatórios artificiais frequentemente desempenham papel estratégico como mananciais, devido à sua capacidade de acumular volumes significativos de água e sua proximidade dos centros consumidores. Entretanto, a qualidade e a disponibilidade hídrica desses sistemas estão diretamente relacionadas às condições ambientais de suas bacias hidrográficas, à pressão antrópica e à eficácia das ações de proteção e monitoramento.

A degradação desses mananciais, procada por poluição difusa, ocupação irregulares, desmatamento ou lançamento de efluentes, compromete não apenas os serviços ecossistêmicos que oferecem, como também eleva os custos de tratamento da água, além de representar riscos à saúde pública (Andreoli 2005). Dessa forma, compreender a dinâmica limnológica dos sistemas lacustres utilizados como mananciais é essencial para gestão sustentável e para a conservação dos recursos hídricos.

### 3.2 ASPECTOS AMBIENTAIS E ECOLÓGICOS DOS LAGOS URBANOS

Lagos urbanos são ecossistemas aquáticos de grande importância ecológica, paisagística e funcional para as cidades, especialmente em áreas densamente urbanizadas. Desempenham múltiplas funções, como regulação do microclima, controle de cheias, suporte à biodiversidade, recreação e, em muitos casos, fornecimento de água para consumo humano. Entretanto, sua localização em áreas urbanas os torna particularmente vulneráveis a pressões antrópicas, como a ocupação desordenada do solo, lançamento de efluentes sem tratamento e impermeabilização das bacias de drenagem (Henny & Meutia 2014).

Do ponto de vista ecológico, os lagos são sistemas complexos, cujos processos internos como ciclagem de nutrientes, dinâmica do fitoplâncton, interações tróficas e regulação da produção primária estão diretamente relacionados às condições ambientais locais e regionais. Em áreas urbanas, esses processos são frequentemente alterados pela ação humana, o que pode levar a desequilíbrios ecológicos, como a proliferação de cianobactérias, perda de diversidade biológica, eutrofização e contaminação por poluentes orgânicos e inorgânicos (Jacobsen & Nyholm 1986).

A substituição de vegetação nativa por áreas impermeáveis altera o balanço hídrico, aumenta o volume e a velocidade do escoamento superficial e eleva a carga de sedimentos e poluentes que chegam ao lago. Além disso, a introdução de espécies exóticas e o uso recreativo desordenado contribuem para a degradação dos habitats aquáticos e marginais, comprometendo os serviços ecossistêmicos oferecidos por esses ambientes (Shafee *et al.* 2024).

Sob a perspectiva ambiental, os lagos urbanos funcionam também como sistemas sentinelas, capazes de indicar mudanças na qualidade ambiental de uma bacia hidrográfica. Sua condição reflete diretamente os usos e conflitos em seu entorno. Zhu (2003) destaca que a qualidade da água em ambientes urbanos está diretamente relacionada à governança ambiental e à capacidade institucional de mitigar os impactos decorrentes da urbanização.

Em regiões tropicais úmidas, como a Amazônia, os lagos urbanos também exercem importante papel na regulação térmica e hídrica, absorvendo parte da intensa precipitação e contribuindo para o equilíbrio microclimático. No entanto, a degradação desses sistemas compromete sua função reguladora, podendo agravar problemas como as ilhas de calor e os alagamentos urbanos (Islam *et al.* 2012).

### 3.3 DINÂMICA METEOROLÓGICA E SUA INFLUÊNCIA EM SISTEMAS AQUÁTICOS

A dinâmica meteorológica envolve uma variedade de variáveis atmosféricas, como temperatura do ar, radiação solar, precipitação, vento e umidade relativa, que influenciam direta

e indiretamente o funcionamento dos ecossistemas aquáticos. Essas variáveis atuam como forçantes externas sobre os corpos hídricos, regulando processos físicos, químicos e biológicos em diversas escalas temporais e espaciais (Grant 2016).

Segundo Vogt *et al.* (2018), a radiação solar é um fator determinante para o aquecimento da superfície da água, promovendo gradientes térmicos verticais que originam a estratificação térmica em sistemas lacustres. Essa estratificação interfere na circulação da coluna d'água, na disponibilidade de oxigênio em profundidade e no metabolismo de organismos aquáticos. Em lagos tropicais rasos ou sob influência de forçantes antrópicas, a estratificação pode ser instável e apresentar variações diárias ou sazonais.

A temperatura do ar influencia tanto a temperatura superficial dos lagos quanto os fluxos de energia entre a atmosfera e o ambiente aquático. Essa interação modula a taxa de evaporação e afetar processos metabólicos, como respiração e decomposição da matéria orgânica. A elevação prolongada da temperatura atmosférica pode intensificar e prolongar eventos de estratificação, levando à formação de zonas hipóxicas ou anóxicas nas camadas mais profundas (Pompei *et al.* 2020).

De acordo com Esteves (2011), o vento é uma variável meteorológica fundamental na dinâmica de circulação dos lagos, especialmente na camada epilimnica. Atua como agente de mistura superficial, promovendo turbulência, ressuspensão de sedimentos e redistribuição de nutrientes e contaminantes. Em ambientes urbanos, construções e vegetação densa podem alterar os padrões de locais de vento e, conseqüentemente, modificar a distribuição da energia e do calor no corpo d'água.

A precipitação exerce influência direta sobre a carga hidráulica do sistema, alterando o nível da lâmina d'água e provocando o aporte de nutrientes e sedimentos, sobretudo por meio de processos de escoamento superficial. Em regiões tropicais, eventos de chuva intensa, podem causar o “flushing” do sistema, levando ao transporte de contaminantes pontuais e difusos para o interior do lago. Por outro lado, períodos prolongados de estiagem tendem a concentrar sais e nutrientes, favorecendo processos de degradação da água (Filippino *et al.* 2017).

### 3.4 HIDRODINÂMICA DE LAGOS E PROCESSOS DE CIRCULAÇÃO

A hidrodinâmica de lagos refere-se ao conjunto de processos físicos que determinam os movimentos da água dentro do interior do corpo hídrico, influenciando sua distribuição térmica, transporte de substâncias, a mistura vertical e horizontal, além dos fluxos de energia e matéria. Esses movimentos são controlados por interações entre forçantes externas, como vento, radiação solar, temperatura do ar, precipitação e ações antrópicas, e características internas do

sistema, como morfologia, profundidade, volume e densidade da água (Hamilton & MacIntyre 2024).

A circulação da água em lagos pode ocorrer em diferentes escalas e apresentar padrões estratificados ou homogêneos, dependendo da energia disponível para promover a mistura da coluna d'água. Em ambientes tropicais, é comum a ocorrência de lagos com circulação polimítica, ou seja, com misturas frequentes ao longo do ano, causadas por variações térmicas diárias ou sazonais (Esteves 2011). No entanto, a presença de forçantes artificiais, como bombas de captação, pode alterar esse comportamento natural, gerando fluxos forçados e padrões de circulação não usuais.

Os ventos atuam predominantemente na superfície do lago, promovendo circulação horizontal que pode formar giros, zonas de acúmulo de nutrientes ou de concentração de poluentes. Em lagos urbanos rasos, esse processo pode ser intensificado pela baixa profundidade e pelas margens antropizadas, provocando ressuspensão de sedimentos e redistribuição de contaminantes previamente depositados (Xue *et al.* 2023).

A estratificação térmica é outro processo hidrodinâmico fundamental, pois ocorre quando camadas de água com diferentes temperaturas e densidades se formam, impedindo a mistura vertical. Em sistemas estratificados, a camada superficial aquecida (epilímnio) permanece isolada da camada profunda mais fria (hipolímnio), dificultando a transferência de oxigênio para as zonas inferiores e favorecendo condições anaeróbicas no fundo do lago (Bouffard *et al.* 2025). A quebra dessa estratificação por ventos fortes, chuvas intensas ou ação de bombas pode levar à redistribuição de nutrientes e compostos tóxicos, como amônia e metais, podendo desencadear eventos de eutrofização.

Em sistemas urbanos com infraestrutura hidráulica, como os lagos utilizados para abastecimento público de água, a presença de estruturas de captação (bombas, dutos e comportas) cria forçantes mecânicas artificiais, que afetam significativamente o padrão de circulação interna. Esse tipo de perturbação pode gerar fluxos ascendentes ou descendentes localizados, influenciar a dispersão de plumas de contaminantes, reduzir a estabilidade térmica da coluna d'água e interferir nos ciclos biogeoquímicos locais (Pereira & Koide 2024).

### 3.5 QUALIDADE DA ÁGUA E TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

A qualidade da água em ambientes lacustres é determinada por um conjunto de propriedades físicas, químicas e biológicas que refletem o equilíbrio ecológico do sistema e sua adequação a diferentes usos, como o abastecimento público, a recreação, a preservação da biodiversidade e a pesca. Em lagos urbanos, esses parâmetros são frequentemente afetados por

pressões antrópicas, como a expansão desordenada, o lançamento de efluentes domésticos e industriais, e alterações hidrológicas associadas a obras de engenharia (Sitote & Gebremedhine 2024).

Entre os principais parâmetros utilizados para avaliar a qualidade da água destacam-se: oxigênio dissolvido, temperatura, pH, turbidez, condutividade elétrica, nutrientes (como nitrogênio e fósforo), coliformes termotolerantes, metais pesados e compostos orgânicos tóxicos. A interação entre a hidrodinâmica e o transporte de contaminantes é um fator-chave para a compreensão da distribuição e da persistência desses poluentes no ecossistema aquático (Rathore *et al.* 2016).

O transporte de contaminantes em lagos ocorre por meio de processos de advecção, difusão e mistura turbulenta, sendo controlado por variáveis como a morfologia do sistema, o tempo de residência da água e os fluxos de entrada e saída. Fontes pontuais, como efluentes lançados diretamente por emissários, e fontes difusas, como escoamento superficial urbano e deposição atmosférico, contribuem significativamente para a carga poluidora dos corpos d'água. Em eventos de chuvas intensas, o escoamento superficial carrega resíduos orgânicos, nutrientes e metais pesados das superfícies impermeáveis da cidade, promovendo a degradação da qualidade da água por meio de processos como a eutrofização e a contaminação microbiológica (Bordalo 2006).

A eutrofização, seja natural ou antrópica, é um dos principais problemas recorrentes em lagos urbanos. O excesso de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, favorecem a proliferação de algas e cianobactérias, podendo reduzir os níveis de oxigênio dissolvido e liberar toxinas prejudiciais à biota aquática e à saúde humana. Esse fenômeno compromete o uso da água para abastecimento e exige tratamentos mais complexos e onerosos (Kumari & Avi 2024, Sarma & Kumar 2024).

Outro fator crítico é a ressuspensão de sedimentos, que pode ocorrer por ação do vento, circulação induzida por bombas ou atividades antrópicas. Esse processo pode reintroduzir contaminantes anteriormente depositados no fundo do lago, como fósforo ligado ao ferro e metais pesados, contribuindo para ciclos internos de poluição. Em sistema com estratificação térmica e anoxia nas camadas profundas, reações redutoras podem liberar substâncias antes retidas nos sedimentos, agravando o processo de degradação ambiental (Burkholder & Glibert 2024).

### 3.6 NORMAL CLIMATOLÓGICA

A normal climatológica corresponde à média estatística de dados meteorológicos observados em um período contínuo de 30 anos, estabelecido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), com o objetivo de descrever o clima típico de uma determinada região. Essas médias incluem variáveis como temperatura do ar, precipitação, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, servindo como referência para análises ambientais e projeções hidrológicas (INMET 2020). No Brasil, o Instituto Nacional de Meteorologia adota atualmente a normal 1991–2020, que substitui a anterior (1961–1990), permitindo a comparação de tendências e anomalias climáticas. A utilização da normal climatológica é fundamental para a caracterização de padrões sazonais que influenciam a dinâmica dos ecossistemas aquáticos, especialmente no que se refere à estratificação térmica, ao balanço hídrico e à qualidade da água.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

O Parque Estadual do Utinga (PEUt) é uma unidade de conservação criada pelo governo do estado do Pará para preservar uma área verde ameaçada pelo crescimento populacional desordenado e pela falta de planejamento urbano em Belém (**Figura 1**). Essa realidade resultou em pressão crescente sobre o principal sistema de abastecimento hídrico da Região Metropolitana de Belém (RMB), responsável por cerca de 75% do fornecimento de água potável aos municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides e Santa Bárbara (Sodré 2007).

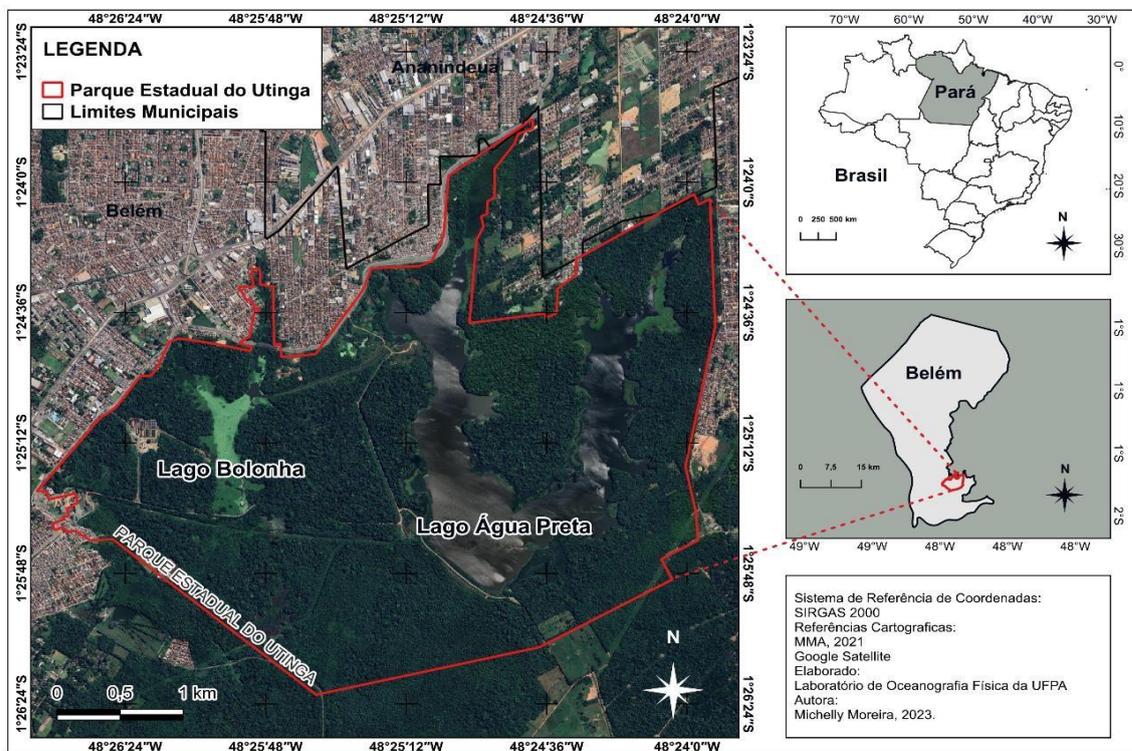


Figura 1 – Localização do Parque Estadual do Utinga. A linha em vermelho mostra os limites do parque; a linha em preto mostra os limites municipais.

Embora o projeto tenha sido concebido com o objetivo de proteger os recursos naturais da RMB, ele esbarrou em um desafio: comunidades e bairros já haviam se estabelecido ao redor da área antes da criação da Área de Proteção Ambiental (APA) em 1993. A ausência de gestão ambiental efetiva à época permitiu a continuidade da ocupação irregular nas margens da unidade, gerando impactos significativos como o desmatamento e a poluição dos corpos hídricos (Souza 2020).

Essas ocupações que eram consideradas irregulares, acarretou na geração de impactos ambientais significativos sobretudo o desmatamento e a poluição dos corpos d'água. Esse contexto aumentou consideravelmente o risco, especialmente após a criação do complexo de resíduos sólidos da região de Belém em 1992, que se localizava próximo a cabeceira do lago Água Preta (Figura 2). Além disso, a atividade de mineração para a extração de areia e seixos também desempenhou um papel importante, alterando a capacidade de absorção do solo e, conseqüentemente, afetando o lençol freático (Bordalo & Sousa 2014).

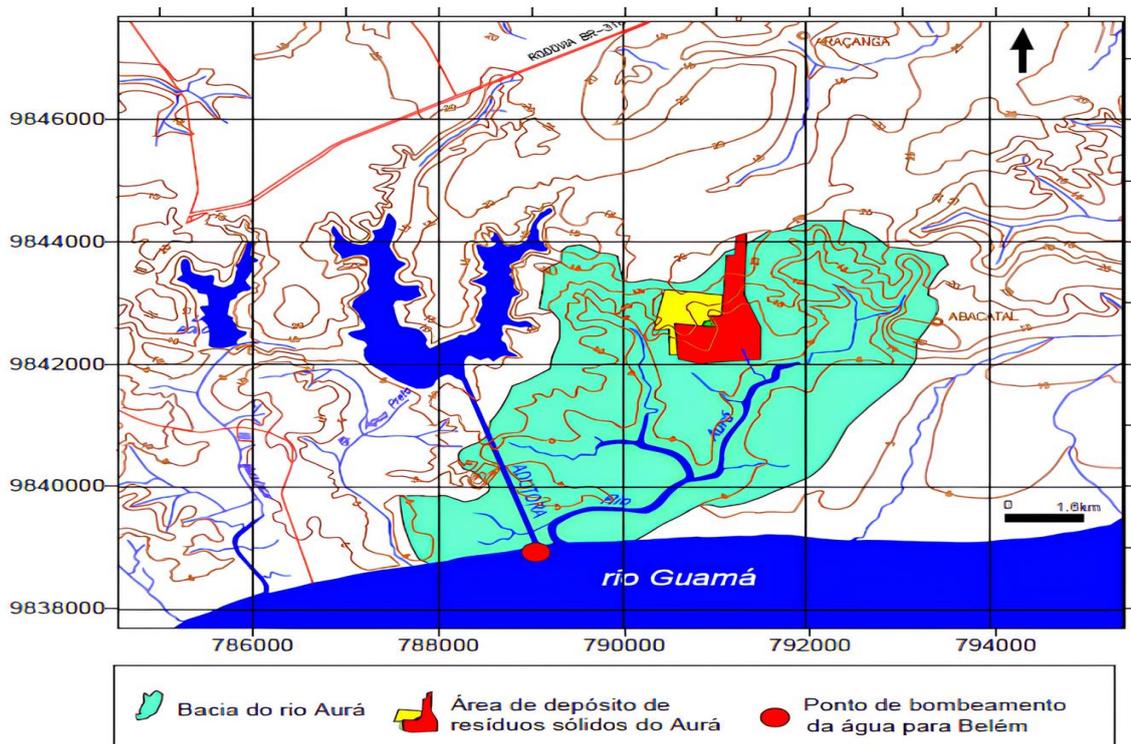


Figura 2 – Mapa hidrográfico dos lagos Água Preta, Bolonha e a bacia do rio Aurá. Fonte: Braz & Mello (2005)

As bacias hidrográficas que integram esse sistema, nomeadamente a bacia do Murucutu e a bacia do Aurá, encontram-se os seguintes bairros: Castanheira e Guanabara (ao Norte), Água Lindas (ao Nordeste), Souza (ao Noroeste), Aurá (a Leste) e Curió-Utinga (ao Sudeste). Além disso, ao Sul da região encontra-se o rio Guamá (Santos *et al.* 2016).

O manancial apresenta grande área e volume de armazenamento. O lago Bolonha possui aproximadamente 577.127 m<sup>2</sup> de superfície e volume estimado de 1.954.000 m<sup>3</sup>, enquanto o lago Água Preta apresenta 3.116.860m<sup>2</sup> de área e volume de 9.905.000 m<sup>3</sup> (Junior & Costa 2011). Apesar da capacidade significativa, o sistema ainda depende de recursos hídricos externos para garantir sua funcionalidade.

Considerando a população de Belém, que totaliza aproximadamente 1.303.389 habitantes de acordo com o IBGE (2022), a demanda por água tratada na cidade é elevada. A

Companhia de Abastecimento do Pará (COSANPA) é a entidade encarregada de administrar esse sistema e supervisionar a logística de distribuição. Para atender essa demanda, foi implantado um sistema de captação no rio Guamá, próximo à foz do rio Aurá, que conta com oito bombas para transferir água para o lago Água Preta (Figura 3 e



Figura 4).

Embora o lago Água Preta seja o maior dos dois, a Estação de Tratamento de Água (ETA) de Belém opera a partir do lago Bolonha. Por esse motivo, um canal de aproximadamente 1 km foi construído para interligar ambos os lagos e garantir o abastecimento contínuo (Figura 5).



Figura 3 – Sistema de adução e captação de água dos lagos. Fonte: Pereira 2004 (adaptado)



Figura 4 – Sistema de adução utilizado para a captação de água do rio Guamá com destino ao lago Água Preta. (A) Imagem de satélite mostrando a visão aérea do ponto de captação; (B) Estrutura de gradeamento, onde ocorre a entrada da água e a retenção de materiais sólidos de maior porte; (C) Conjunto de quatro das oito bombas responsáveis pela captação mecânica da água; (D) Tubulações que conduzem a água bombeada em direção ao lago Água Preta.

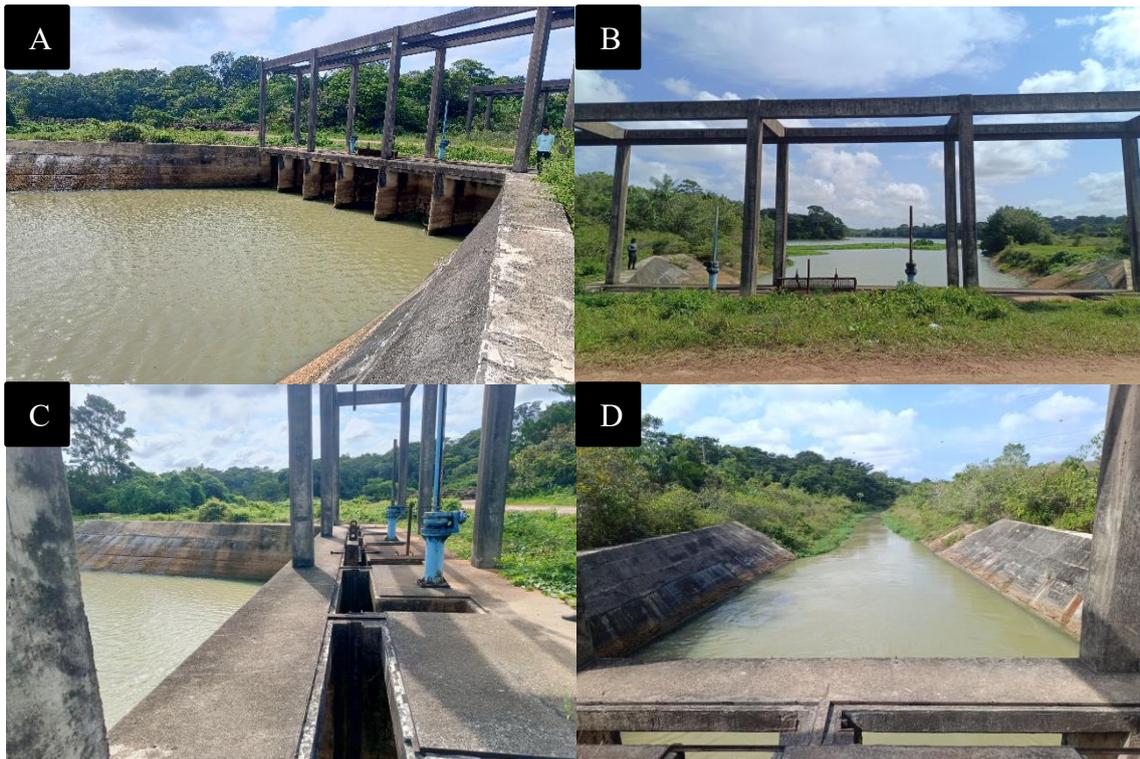


Figura 5 – Canal de ligação entre os lagos Água Preta e Bolonha. (A) Entrada do sistema; (B) estrutura que sustentam as comportas; (C) Comportas que separam os dois lagos; (D) Canal de ligação.

#### 4.1.1 Aspectos climatológicos e meteorológicos

A Região Metropolitana de Belém (RMB) está situada aproximadamente a  $1^{\circ}30'$  de latitude sul e  $48^{\circ}30'$  de longitude oeste, sendo quase totalmente circundada por corpos hídricos, como a baía do Guajará e o rio Guamá (Ximenes 2011). De acordo com Fisch (1998), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um dos principais sistemas responsáveis pelo regime de precipitação na região, atuando com maior intensidade entre os meses de dezembro a maio.

Segundo a classificação climática de Köppen (Figura 6), Belém apresenta clima equatorial úmido (Afi), um subtipo que não possui estação seca bem definida e apresenta precipitação média mensal superior a 60 mm mesmo nos períodos menos chuvosos (Martorano 1993). O total anual de precipitação varia entre 2.500 e 3.000 mm, com dois períodos distintos: o mais chuvoso, de dezembro a maio, e o menos chuvoso, de junho a novembro. No entanto, mesmo no período considerado menos chuvoso, a ocorrência de chuvas é comum ao longo do ano (Imbiriba & Costa 2003, Ramos 2004).

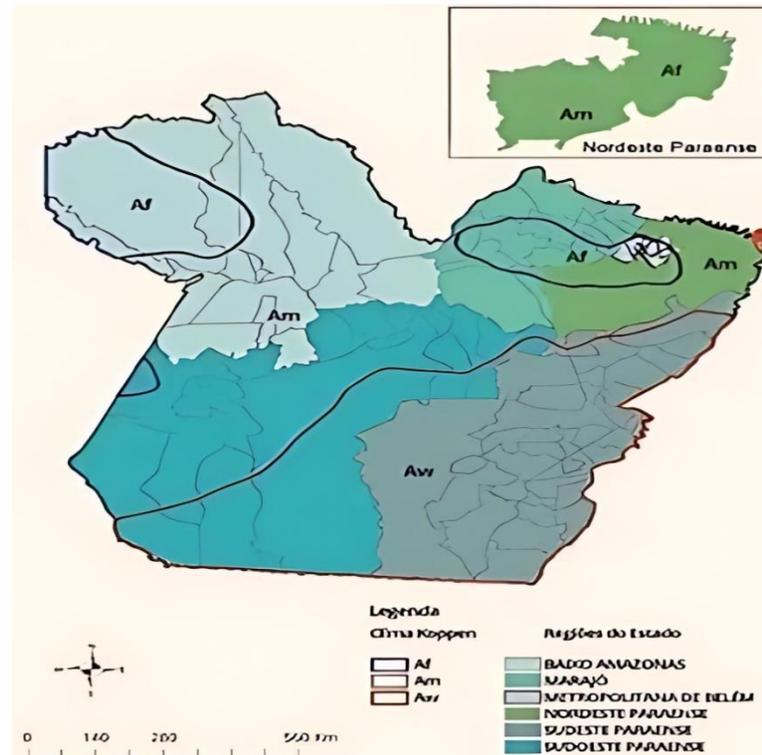


Figura 6 – Classificação Climática do estado do Pará de acordo com a classificação de Köppen. Fonte: Adaptado de Cordeiro *et al.* (2017).

A temperatura média anual na microrregião de Belém varia entre 23°C e 32°C, com baixa amplitude térmica. A variação entre a temperatura máxima e mínima média anual é de aproximadamente 9,83°C, conforme dados da normal climatológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET 2022). Essa estabilidade térmica é típica de regiões equatoriais e influencia diretamente os processos de estratificação térmica nos corpos d'água da região (Figura 7). A Figura 7 mostra a climatologia das chuvas e da temperatura média do ar para a cidade de Belém, de acordo com dados observacionais. Os maiores acumulados mensais de precipitação ocorrem devido a atuação de sistemas produtores de chuva como a Zona de Convergência Intertropical e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (Cavalcante *et al.* xx). As temperaturas aumentam significativamente durante a estação menos chuvosa, no segundo semestre, diminuindo novamente em dezembro quando o ciclo anual das chuvas inicia novamente.

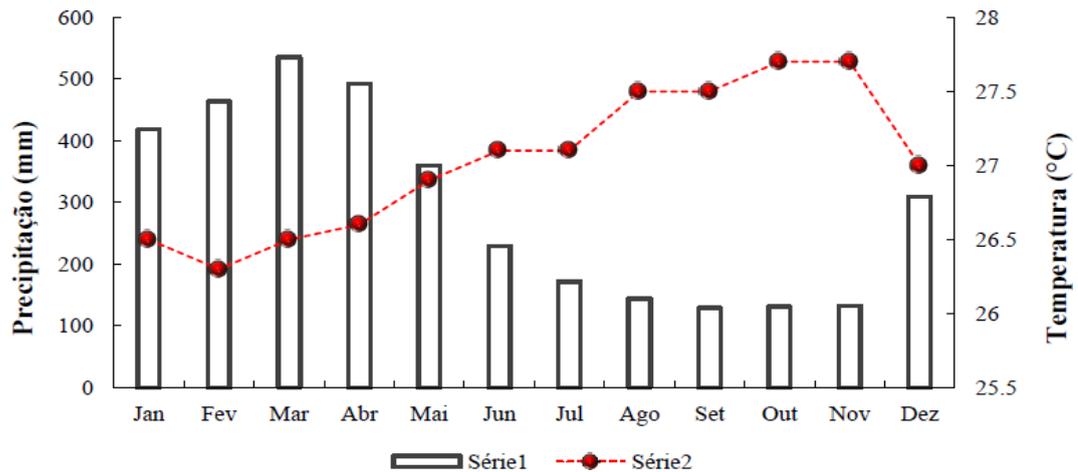


Figura 7 – Série histórica (1989 - 2018) da precipitação e temperatura média mensal da estação meteorológica de Belém. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet 2019).

A umidade relativa do ar apresenta pouca variação sazonal, sendo um parâmetro interligado com o regime de chuvas, o que explica os maiores índices entre dezembro – maio, justamente no período onde o índice atinge valores próximos ou superiores a 90%. Entretanto, a média anual se mantém acima de 70% (Idesp 1991). Como a temperatura do ar e a pressão atmosférica são parâmetros que não variam consideravelmente anualmente, pode-se destacar a precipitação pluviométrica sendo o sistema meteorológico com o maior parâmetro de influência do clima na região.

Em relação à dinâmica dos ventos que atuam na região costeira amazônica (próximo a 0° de latitude), El-Robrini (2006) destaca que em sua grande maioria são derivados dos ventos alísios, no entanto os valores de velocidade média mensal do ar não alcançam valores elevados, ficando em torno de 2,6 – 2,9 m/s com predominância de ventos vindo da direção Leste-Nordeste para os meses de agosto a março e predominância na direção Leste-Sudeste para os meses de abril a julho (Figura 8). Quando se analisam os dados ao longo do ano, aproximadamente 45% do tempo é caracterizado por períodos de calmaria (Imbiriba & Costa 2003).

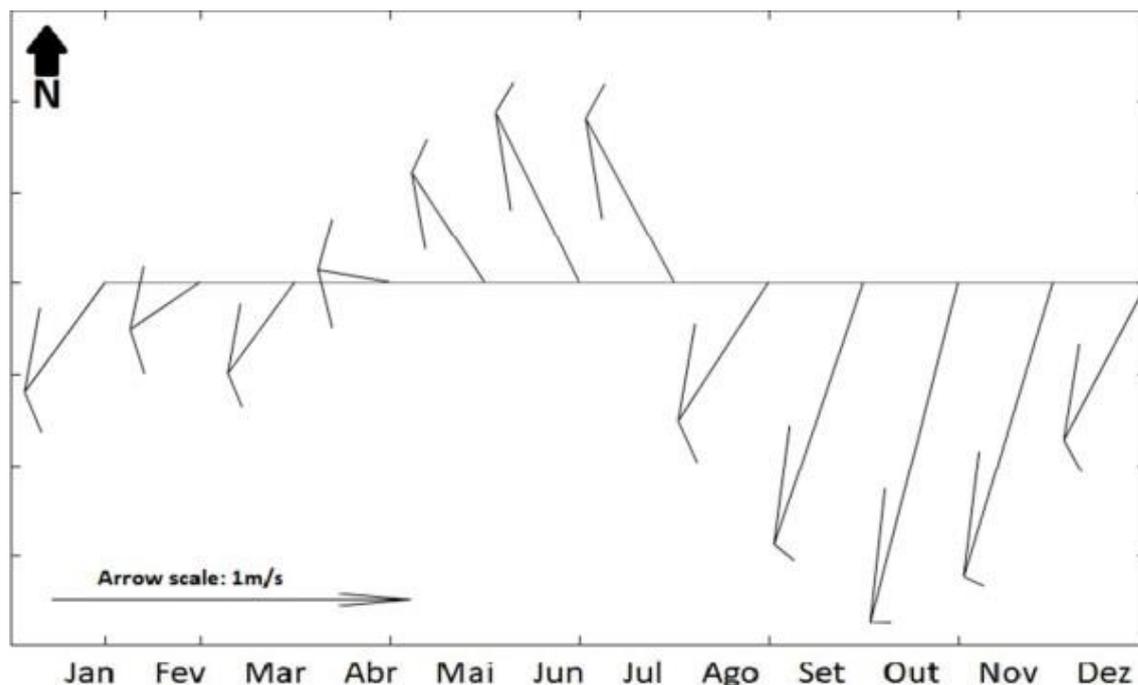


Figura 8 – Médias da intensidade e direção do vento, entre os anos de 2003 a 2021, para a cidade de Belém. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (2021)

## 4.2 METODOLOGIA

Os dados então subdivididos em duas áreas, a primeira envolve o levantamento hidrodinâmico do lago considerando os seguintes parâmetros físicos: temperatura da água, nível de água e velocidade e direção de corrente da água. A segunda área aborda levantamento de dados meteorológicos: temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica e intensidade e direção do vento.

### 4.2.1 Parâmetros hidrodinâmicos

Em relação aos parâmetros hidrodinâmicos as coletas foram divididas em seções; a primeira está relacionada com a temperatura da água, nessa medição foram utilizados dois métodos para averiguação. O primeiro método foram utilizando perfis verticais ao longo de 19 pontos no lago para determinação do padrão de estratificação térmica da coluna d'água ao longo de um dia (24h), em amostragens mensais utilizando um instrumento oceanográfico CTD (sigla derivada do inglês: Conductivity, Temperature, and Depth) que possui sensores para registrar perfis verticais, na coluna d'água, de condutividade elétrica, temperatura e pressão (Figura 9); e séries temporais longas (12 meses ininterruptos) registradas através de uma sonda multiparametros da Aquaread vinculada com a estação meteorológica (Figura 10) com uma taxa de medição de 60 minutos (1 hora), instalado em um ponto específico.



Figura 9 – CTD SBE 19plus V2 SeaCAT em operação de perfilamento. Equipamento mede condutividade (precisão  $\pm 0,0005$  S/m), temperatura ( $\pm 0,005^\circ\text{C}$ ) e pressão (até 6000 m de profundidade, com precisão de  $\pm 0,1\%$  do fundo de escala).



Figura 10 - Sonda multiparâmetro Aquaread AP-2000 em operação, medindo em tempo real parâmetros como temperatura, condutividade, pH, oxigênio dissolvido (OD), turbidez e profundidade.

A variação do nível da água foi monitorada com o uso de um sensor de pressão submersível Levelogger Junior 5, da fabricante Solinst. Embora esse equipamento seja comumente utilizado em poços, ele também pode ser aplicado em ambientes lânticos, desde que respeitados os limites de salinidade indicados pelo fabricante. O sensor possui alta precisão ( $\pm 0,05\%$  FS) e autonomia de até 10 anos. (Figura 11).



Figura 11 – Levellogger Junior 5 Sensor de pressão para medição de nível d'água, com alta precisão ( $\pm 0,05\%$  FS) e autonomia de até 10 anos. Aplicações em hidrogeologia e monitoramento ambiental.

Para a aquisição de dados de intensidade e direção de corrente ao longo da coluna d'água, foi utilizado um Perfilador Acústico de Corrente por efeito Doppler (ADCP), da marca Sontek Argonaut XR (Figura 12), fundeado próximo a região de conexão entre o lago e o Rio Guamá. Sua medição na coluna d'água ocorreu a cada 50 cm, considerando 7 dias no período seco e outros 7 dias no período chuvoso.



Figura 12 – Perfilador Acústico de Corrente por efeito Doppler (ADCP) em operação, realizando medições tridimensionais de velocidade e direção de correntes aquáticas. Equipamento utiliza tecnologia Doppler para perfis contínuos de corrente com precisão de  $\pm 0,5\%$  da velocidade medida  $\pm 0,5$  cm/s.

Para validação dos dados obtidos pelo ADCP e ampliação do entendimento hidrodinâmico do sistema, foi utilizado o modelo Infinity AEM-USB, da empresa JFE Advantech (**Figura 13**). Compacto e de alta precisão, esse equipamento permite medições contínuas de velocidade em duas direções, mesmo em condições de baixa turbulência. As coletas com o correntômetro foram realizadas mensalmente ao longo de 24 horas, em diferentes pontos do lago.



**Figura 13** – O Infinity EM é um registrador de medidor de corrente eletromagnética. O instrumento fornece medições de corrente 2-D de alta precisão, mesmo em condições de baixa dispersão, onde ADVs (Velocímetro Doppler Acústico) não funcionam bem. A faixa de medição vai de 0 a  $\pm 500$  cm s<sup>-1</sup>. O design do instrumento é compacto (1,0 kg no ar) e permite medições de velocidade de corrente virtualmente em qualquer lugar.

#### 4.2.2 Parâmetros meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos por meio de uma estação meteolimnométrica automática fornecida pela empresa AG Solve Monitoramento Ambiental, instalada às margens do lago Água Preta (**Figura 14**).



Figura 14 – Estação meteolimnométrica automática da empresa AG Solve Monitoramento Ambiental que está localizada as margens do lago Água Preta

Essa estação é equipada com sensores especializados para o monitoramento contínuo dos seguintes parâmetros: temperatura do ar, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, rajada de vento, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica. Além dos sensores, a estação conta com os seguintes materiais: Caixa Metálica – com coletor de dados Ag Logger; Bateria 12V 7Ah, presente dentro da caixa metálica; Painel Solar 20W com suportes; Cabo de Comunicação RS232; Modem de transmissão GPRS (Figura 15).

<p><b>Caixa metálica</b></p> 	<p><b>Ag Logger</b></p> 	<p><b>Painel Solar 20 W</b></p> 
<p><b>Bateria 12 V</b></p> 	<p><b>Modem GPRS</b></p> 	<p><b>Cabo de Comunicação RS232</b></p> 
<p><b>Sensor de Precipitação</b></p> 	<p><b>Sonda Multiparâmetros AquaPlus</b></p> 	<p><b>Black Box</b></p> 
<p><b>Sensor de Velocidade e Direção do Vento</b></p>	<p><b>Sensor de Temperatura e Umidade do Ar</b></p>	<p><b>Abrigo p/ Sensor de Temperatura e Umidade do Ar</b></p>
		

Figura 15 – Materiais presentes na estação de monitoramento automático. Fonte: AgSolve (2023).

Esta estação é de modelo automático e tem a capacidade de transmitir em tempo real os dados coletados em uma frequência de 60 minutos, e esse sistema funciona através de uma plataforma web, além do mais, ainda é possível a visualização das condições mais recentes, visualizar gráficos, configurar sensores, configurar painel e agendar entrega de dados por e-mail.

#### 4.2.3 Temperatura do ar e umidade relativa

A temperatura do ar e a umidade do ar foram obtidas através do mesmo sensor conjugado SHT31 acoplado ao Radiation Shield da serie RHRS da empresa Dwyer que é um sistema de pratos que protege os transmissores da chuva e do calor irradiado. Com o formato curvo e a cor das placas sendo brancas, o fluxo de ar é capaz de se mover através do sensor para evitar que as temperaturas irradiadas das superfícies ao redor afetem a leitura deste parâmetro. Este instrumento possui elevada precisão e um excelente tempo de resistência em campo. As especificações do sensor podem ser consultadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações do sensor de temperatura e umidade do ar

<b>Variável</b>	<b>Valor</b>
Power	2,5 - 5,5 V DC
Consumo	4,8 uW
Comunicação	I2C
Dimensões	Diâmetro 16 mm / Comprimento 90 mm / Cabo 1,5 m
<b>TEMPERATURA</b>	
Resolução	0,01°C
Repetibilidade	0,24°C (condição baixa), 0,12°C (média) 0,06°C (alta)
Acurácia	0,2 °C (na faixa de 0 a 90°C)
Range	-40°C +125°C
Tempo de resposta	2 segundos
Estabilidade	<0,03 °C por ano
<b>UMIDADE</b>	
Resolução	0,03% RH
Repetibilidade	0,1% RH
Acurácia	2% RH (na faixa de 10% a 90% RH)
Não linearidade	< 1% RH
Range	0% - 100% RH
Tempo de resposta	4 segundos
Histerese	+1% RH
Estabilidade	<1% UR por ano

#### 4.2.4 Precipitação pluviométrica

Para aquisição dos dados foi utilizado um pluviômetro Davis modelo 6464M que é feito de plástico ABS com uma alta resistência a raios UV, as dimensões do instrumento é uma abertura de 16,5 cm (6,5') x 24 cm (9,5') de altura e possui a massa equivalente a 1kg. A área de coleta é igual a 214 cm<sup>2</sup>, com um sistema basculante que possui um interruptor magnético para registrar cada clique e a capacidade necessária para ativar o sistema equivale a 0,2 mm. As especificações do sensor podem ser consultadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações do sensor de pluviosidade

Variável	Valor
Saída	Fechamento de contato
Comprimento do cabo	12 metros
Material	Plástico ABS resistente a raios UV
Dimensões	Diâmetro de abertura de 16,5 cm (6.5') x 24 cm (9.5') de altura
Peso	1kg
Área de coleta	214 cm <sup>2</sup> (33.2 <sup>2</sup> )
Capacidade de bascula	0,2 mm
Sensibilidade	1 pulso/báscula
Precisão	<± 1% até 2 pol/h (50 mm/h) ± 1% até 3 pol/h (75 mm/h) ± 3% até 4 pol/h (100 mm/h)

#### 4.2.5 Velocidade e direção do vento

Para o monitoramento das condições anemométricas, foi utilizado um anemômetro da Davis Instruments, modelo Standard - K6410. O sensor é composto por três cúpulas giratórias (tipo copo anemométrico) para medição da velocidade do vento e uma veleta acoplada para determinação da direção. O material de fabricação é plástico resistente com proteção contra radiação ultravioleta (UV), adequado para uso prolongado em campo. A faixa de medição da velocidade do vento vai de 2 a 89 m/s, com resolução de 0,1 m/s e precisão de ±5%. A direção do vento é registrada em um intervalo de 0° a 360°, com resolução de 1°. As especificações do instrumento podem ser consultadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações do anemômetro

<b>Variável</b>	<b>Valor</b>
Tipo	Velocidade do Vento - Sensor magnético Direção do Vento - Ventoinha e potenciômetro
Material	Ventoinha e Cabeçote - ABS resistente a raios UV Copos de vento - Policarboneto Braço do Anemômetro - Alumínio anodizado preto
Dimensões	470 mm x 191 mm x 121 mm
Peso	1,332 kg (2 lbs. 15 oz.)
<b>Velocidade do vento</b>	
Alcance	1 a 200 mph, 1 a 173 nós, 0,5 a 89 m/s, 1 a 322 km/h
Precisão	±2 mph (2 nós, 3 km/h, 1 m/s) ou ±5%, a que for maior
Resolução	1 mph (1 nó, 0,1 m/s, 1 km/hr)
Tempo de medição	Período de Amostra - 2.25 segundos
Saída	600 rev/hr = 1 mph
<b>Direção do vento</b>	
Alcance	0° a 360° ou 16 pontos de compasso
Precisão	±3°
Resolução	1° (0° a 355°) 22,5° entre os pontos de compasso
Tempo de medição	Intervalo de Amostra - 1 segundo Constância do tempo de filtragem 8 segundos Intervalo de atualização - 2 segundos
Saída	Resistência variável 0 - 20kΩ

#### 4.3 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados obtidos ao longo do monitoramento foram organizados e processados em três etapas principais: (1) análise de consistência e organização dos dados brutos, (2) construção de séries temporais, e (3) análise estatística e interpretação dos padrões hidrometeorológicos.

A análise dos dados foi conduzida com o suporte das plataformas Python, MATLAB e Microsoft Excel, de forma complementar. O uso dessas ferramentas visou garantir maior robustez, precisão e flexibilidade no tratamento e interpretação dos dados. O Microsoft Excel foi empregado nas etapas iniciais de organização, inspeção visual e triagem dos dados brutos,

facilitando a identificação de inconsistências e valores ausentes.

Em seguida, as linguagens de programação Python e MATLAB foram utilizadas para as etapas mais avançadas de processamento, incluindo filtragem de dados, aplicação de correções instrumentais, análise estatística e construção de gráficos e visualizações. O Python, por meio de bibliotecas como Pandas, NumPy e Matplotlib, proporcionou um ambiente eficiente para manipulação de séries temporais e geração de visualizações dinâmicas. O MATLAB foi particularmente útil na análise vetorial e no processamento de dados de perfil vertical, devido à sua ampla gama de funções específicas para oceanografia física e dados ambientais.

#### **4.3.1 Perfilador acústico de corrente (ADCP)**

Os dados de corrente foram coletados por um ADCP instalado em ponto fixo, registrando perfis verticais da coluna d'água ao longo do tempo. Inicialmente, os dados brutos foram organizados e verificados quanto à consistência temporal, profundidade dos bins e presença de valores inválidos. Foram removidos outliers com base em limites estatísticos e na qualidade do sinal.

A seguir, os dados foram suavizados com filtro passa-baixa, e segmentados em intervalos regulares para facilitar a análise. Foi realizada análise vetorial da corrente em cada camada, incluindo cálculo da velocidade e direção médias, vetores resultantes e perfis verticais de corrente. Por fim, os dados tratados foram exportados para o MATLAB para representação gráfica, como séries temporais por profundidade, perfis médios verticais, permitindo a caracterização detalhada do padrão de circulação na coluna d'água ao longo do período de medição.

#### **4.3.2 Correntômetro eletromagnético**

Os dados de corrente foram obtidos por correntômetro eletromagnético instalado em pontos estratégicos durante as coletas de 2023 e 2024. Inicialmente, passaram por verificação de integridade, com checagem de datas, horários e valores inconsistentes. Em seguida, foram removidos os dados espúrios com base em critérios estatísticos, e os dados faltantes tratados por interpolação simples ou exclusão.

Os dados foram suavizados com filtro passa-baixa para reduzir ruídos de alta frequência, e posteriormente segmentados em intervalos regulares para análise. A análise estatística envolveu o cálculo de médias, desvios padrão e vetores de corrente média e resultante, além da geração de diagramas como séries temporais

#### **4.3.3 Temperatura da água – CTD**

A temperatura da água foi medida por meio de um sensor acoplado ao instrumento CTD, o qual permite a aquisição de perfis verticais de alta resolução. As coletas foram realizadas em pontos representativos do lago, com descidas lentas e constantes do equipamento, permitindo registrar a variação da temperatura ao longo da coluna d'água.

Os dados foram processados por meio do software do equipamento e MATLAB, sendo posteriormente organizados em planilhas para análise gráfica dos gradientes térmicos verticais e identificação de eventuais estratificações térmicas temporárias. O CTD forneceu também a profundidade associada a cada medição, permitindo a análise da distribuição espacial da temperatura em função da profundidade.

#### **4.3.4 Temperatura da água – Sonda Multiparâmetros**

A temperatura da água foi monitorada de forma contínua com o uso de uma sonda multiparâmetros Aquaread, instalada em ponto fixo no lago, ao longo de um período de 12 meses consecutivos. A sonda foi configurada para realizar medições em intervalos regulares de 60 minutos, com envio automático dos dados para um sistema de armazenamento remoto, otimizando o acompanhamento e a segurança das informações coletadas.

O sensor termométrico integrado à sonda registrou a temperatura em tempo real, permitindo o acompanhamento das variações térmicas ao longo do tempo. Os dados foram posteriormente organizados em planilhas eletrônicas e submetidos a análise de estatística descritiva, com o cálculo de médias diárias e mensais, valores extremos e desvios padrão.

#### **4.3.5 Sensor de pressão**

Para o monitoramento da variação do nível da água, foram utilizados sensores de pressão submersíveis (levellogger 5 Junior), instalados em pontos estratégicos do lago. Os sensores registraram a pressão hidrostática exercida pela coluna d'água sobre o equipamento, permitindo a inferência da variação média do nível ao longo do tempo. Os dados foram coletados de forma contínua, com intervalos de registro de 60 minutos, e posteriormente processados em ambiente de planilha eletrônica.

#### **4.3.6 Temperatura e umidade relativa do ar**

Os dados de temperatura do ar e umidade relativa foram tratados por meio de técnicas básicas de estatística descritiva, com o objetivo de identificar tendências gerais e variações ao longo do período monitorado. Inicialmente, os dados brutos foram organizados em planilhas eletrônicas, passando por um processo de triagem para exclusão de valores inconsistentes ou

ausentes. Posteriormente, foram calculadas medidas como média, mediana, mínimo, máximo e desvio padrão, permitindo uma visão geral do comportamento das variáveis ao longo do tempo.

#### **4.3.7 Precipitação pluvial**

Os dados de precipitação pluviométrica foram analisados por meio de estatística descritiva, com o intuito de caracterizar a distribuição e a intensidade das chuvas ao longo do período estudado. Os registros horários foram organizados e consolidados em totais diários e mensais, permitindo uma avaliação das variações sazonais. Foram determinadas medidas como total acumulado, média diária, máximos registrados, número de dias com chuva e desvio padrão, a fim de identificar padrões de ocorrência e intensidade.

#### **4.3.8 Velocidade e direção do vento**

Os dados de velocidade e direção do vento foram submetidos a uma análise descritiva com o objetivo de caracterizar o comportamento anemométrico da área de estudo. Inicialmente, os registros foram organizados em planilhas, com verificação e correção de eventuais inconsistências. A velocidade do vento foi avaliada por meio de medidas como média, máximos registrados, desvio padrão e frequência de ocorrência por faixas de velocidade. Já os dados de direção foram agrupados em setores (rosas dos ventos), possibilitando a identificação das direções predominantes ao longo do período.

#### **4.3.9 Normal climatológica**

Para a contextualização climática da área de estudo, foi utilizada a normal climatológica referente ao período de 1991 a 2020, conforme diretrizes da Organização Meteorológica Mundial (OMM). Os dados históricos foram obtidos a partir da estação meteorológica convencional de código 82191, operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na cidade de Belém-PA. As variáveis consideradas foram: temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica, velocidade do vento e direção do vento. A partir da série histórica, foram extraídas as médias mensais e anuais, valores máximos e mínimos e os desvios padrão, permitindo a construção de um panorama climático de longo prazo da região.

#### **4.3.10 Método de preenchimento de falhas**

Para garantir a continuidade e a consistência da série, adotou-se o método de substituição por médias climatológicas mensais, uma técnica amplamente utilizada para preenchimento de dados em séries de longo prazo. Nesse procedimento, os valores ausentes

foram preenchidos com base na média histórica do respectivo mês em que ocorreu a falha, considerando os demais anos da série. Nos casos em que o número de falhas em um mês específico foi superior a 20% dos dados esperados, os dados foram mantidos como ausentes e excluídos das análises estatísticas, conforme recomendações da OMM para garantir a confiabilidade da série.

## **5 RESULTADOS**

Os resultados foram divididos em artigos para publicação: Artigo 1 – Variabilidade temporal de elementos meteorológicos e comparação com a normal climatológica (1991-2020) em uma região metropolitana amazônica; Artigo 2 – Hidrodinâmica de um ambiente lântico raso em uma região metropolitana amazônica.

## 5.1 VARIABILIDADE TEMPORAL DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS E COMPARAÇÃO COM A NORMAL CLIMATOLÓGICA (1991-2020) EM UMA REGIÃO METROPOLITANA AMAZÔNICA

### RESUMO

Este estudo analisou a variabilidade temporal de parâmetros meteorológicos na Região Metropolitana de Belém (RMB), com ênfase no Parque Estadual do Utinga (PEUt), comparando-os à normal climatológica (1991–2020). Os dados foram coletados por uma estação meteorológica automática e englobaram temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, velocidade e direção do vento, entre dezembro de 2023 e novembro de 2024. Os resultados indicaram um aumento gradual da temperatura média do ar ( $27,75\text{ °C} \pm 2,61\text{ °C}$ ), com a maior média registrada em novembro ( $29,68\text{ °C}$ ). A análise de tendência revelou um padrão crescente, sugerindo aquecimento local. A umidade relativa apresentou média de 84,89%, com leve declínio ao longo do ano, refletindo a sazonalidade amazônica. A precipitação acumulada foi de 1.873,2 mm, abaixo da média histórica, com anomalias parcialmente atribuídas a obstruções no pluviômetro e à influência do fenômeno ENOS. Os ventos predominaram nas direções norte e nordeste, com velocidade média de 1,34 m/s, inferior à climatologia. As rajadas também apresentaram valores reduzidos (média de 2,70 m/s). A comparação com a normal climatológica evidenciou anomalias significativas, como temperaturas mais altas e redução da precipitação e da intensidade dos ventos, possivelmente associadas a mudanças climáticas e pressões antrópicas. Conclui-se que a RMB apresenta tendências de aquecimento e alterações nos padrões pluviométricos, com potenciais impactos sobre ecossistemas, recursos hídricos e atividades humanas. O estudo reforça a importância do monitoramento contínuo para subsidiar políticas de adaptação e mitigação frente às mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** variabilidade climática, amazônia, normal climatológica, mudanças climáticas, meteorologia urbana.

### INTRODUÇÃO

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), as mudanças climáticas representam um dos maiores desafios globais da atualidade, com impactos significativos nos ecossistemas e nas sociedades. O aumento da temperatura média global, a intensificação de eventos extremos e as alterações nos

padrões de precipitação estão entre as principais manifestações desse fenômeno, resultantes, sobretudo, do aumento das emissões de gases de efeito estufa e da intensificação das atividades humanas (Estrada *et al.* 2023, Clarke 2022). Esses fatores afetam diretamente a variabilidade climática em escalas regional e local, tornando fundamental a análise de padrões meteorológicos ao longo do tempo.

Na região Norte do Brasil, caracterizada por clima predominantemente quente e úmido, a variabilidade climática influencia diretamente os ecossistemas amazônicos e o modo de vida das populações locais (Borges 2023). A intensificação de períodos secos, a maior frequência de eventos extremos de precipitação e o aumento da temperatura média são alterações já observadas nas últimas décadas. Tais mudanças impactam a biodiversidade, a disponibilidade hídrica e diversas atividades econômicas, como agricultura e pesca, o que reforça a necessidade de estudos que analisem as tendências meteorológicas em relação a padrões climatológicos de longo prazo (Borma *et al.* 2013; Coelho *et al.* 2012).

Os dados meteorológicos podem ser obtidos por meio de estações convencionais ou automáticas; sensores remotos, orbitais, aerotransportados ou baseados em radar (Vianna *et al.* 2017). A análise dessas informações possibilita a elaboração de zoneamentos agrícolas, a identificação de áreas vulneráveis a riscos climáticos e a previsão do tempo, além de subsidiar estudos de planejamento ambiental e urbano (Machado & Assis 2018).

O Parque Estadual do Utinga Camilo Vianna (PEUt), uma das principais áreas de conservação da Região Metropolitana de Belém (RMB) exerce papel fundamental na regulação do microclima local e na manutenção dos serviços ecossistêmicos (Souza 2020). No entanto, a falta de estudos sistemáticos sobre a variabilidade climática na área dificulta a formulação de estratégias eficazes de preservação. Alterações no regime de chuvas e variações na umidade relativa do ar já afetam a fauna, a flora e os recursos hídricos do parque, evidenciando a necessidade de compreender melhor a dinâmica climática da região (Velloso 2024).

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo analisar a variabilidade temporal dos principais elementos meteorológicos na RMB, com ênfase no PEUt, e comparando-os com a normal climatológica do período de 1991 a 2020. A proposta é identificar tendências, anomalias e potenciais impactos ambientais decorrentes dessas variações.

## MATERIAL E MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Belém, a capital do estado do Pará, está situada na latitude -1.45502 e longitude -48.5024. limita-se a oeste com a Baía do Guajará, ao sul com o rio Guamá, ao norte com a Baía de Santo Antônio e a leste com o município de Ananindeua. Segundo dados do IBGE (2024), o município possui uma população de 1.303.405 habitantes e área territorial de 1.059,458 km<sup>2</sup>, que inclui 39 ilhas.

O clima de Belém, conforme a classificação de Köppen (1900–1936), é do tipo Af — tropical chuvoso (Peel *et al.* 2007). A temperatura média anual é de  $26,0 \pm 0,4$  °C, com máximas e mínimas variando entre  $31,5 \pm 0,7$  °C e  $22,0 \pm 0,3$  °C, respectivamente (Silva Júnior *et al.* 2011). A umidade relativa oscila entre 85% e 91%, e a precipitação anual ultrapassa 2.500 mm. O regime de chuvas apresenta uma estação chuvosa bem definida, de dezembro a maio, influenciada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), e uma estação menos chuvosa, de junho a novembro, com redução do volume, embora as precipitações ainda ocorram com frequência (Lopes *et al.* 2013, Brasil 2021).

O PEUt (Figura 1) é uma unidade de conservação (UC) instituída pelo governo estadual com o objetivo de mitigar os impactos do crescimento populacional acelerado e da ocupação urbana desordenada na Região Metropolitana de Belém (Menezes *et al.* 2013). A expansão urbana desregulada intensificou a pressão sobre o ecossistema local, o qual abriga o principal sistema de abastecimento hídrico da região (Fenzl 2010). Esse sistema é responsável por aproximadamente 75% do fornecimento de água para os municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides e Santa Bárbara, tornando a conservação do parque essencial para a segurança hídrica e ambiental da região (Sodré 2007).

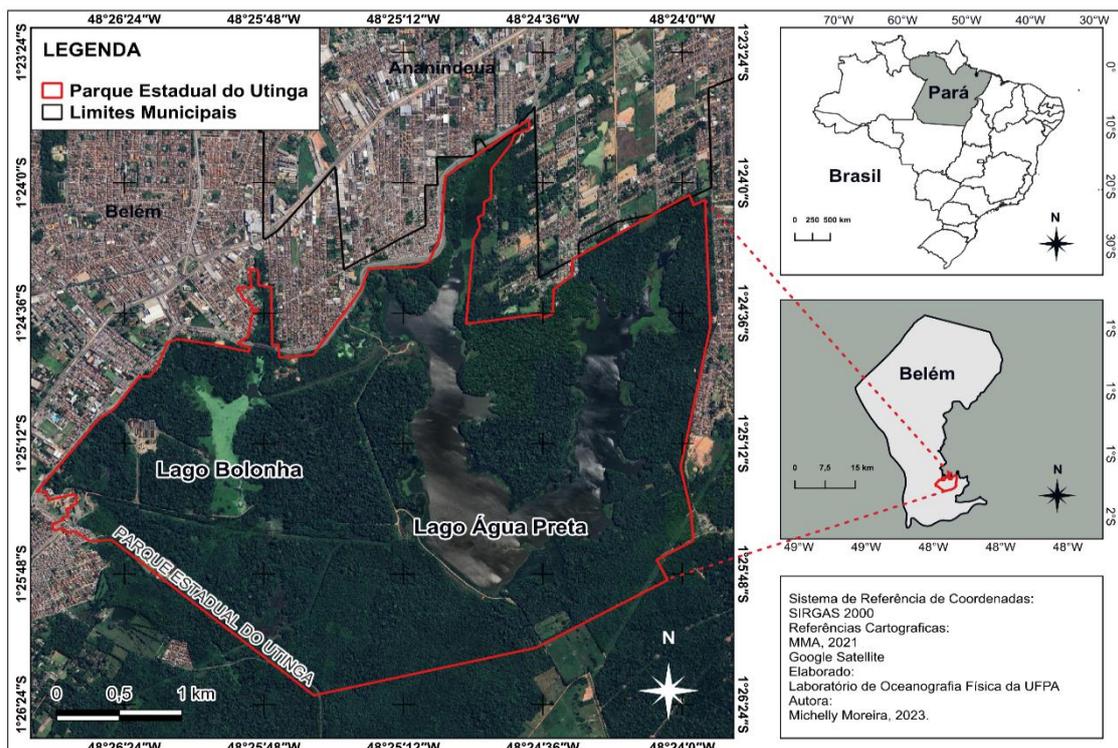


Figura 1 – A localização do Parque Estadual do Utinga (PEUt), situado na Região Metropolitana de Belém, estado do Pará, Brasil. A área do parque está delimitada em linha vermelha, evidenciando seus limites oficiais. Também são apresentados os limites municipais de Belém e Ananindeua, representados em linha preta.

## AMOSTRAGEM

Os dados meteorológicos foram coletados por uma estação meteolimnométrica da empresa AG Solve Monitoramento Ambiental (Figura 2), localizada às margens do lago Água Preta (latitude  $-1.426077$ ; longitude  $-48.418844$ ). Essa estação possui instrumentos meteorológicos capacitados para medir parâmetros de temperatura do ar, velocidade e direção do vento, rajada de vento, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica. Além dos sensores, a estação conta com os seguintes materiais: Caixa Metálica – com coletor de dados Ag Logger; Bateria 12V 7Ah, presente dentro da caixa metálica; Painel Solar 20W com suportes; Cabo de Comunicação RS232; Modem de transmissão GPRS.



Figura 2 – Estação meteorolímométrica automática da AG Solve instalada as margens do lago Água Preta.

A estação é de modelo automático e tem a capacidade de transmitir em tempo real os dados coletados em uma frequência de 60 minutos, e esse sistema funciona através de uma plataforma web, além do mais, ainda é possível a visualização das condições mais recentes, visualizar gráficos, configurar painel e agendar entrega de dados por e-mail.

A temperatura do ar e a umidade do ar foram obtidas através do mesmo sensor conjugado SHT31 acoplado ao Radiation Shield da série RHRS da empresa Dwyer que é um sistema de pratos que protege os transmissores de umidade do ar da chuva e do calor irradiado.

A precipitação foi registrada com um pluviômetro Davis modelo 6464M, que é feito de plástico ABS com uma alta resistência a raios UV, as dimensões do instrumento é uma abertura de 16,5 cm (6,5') x 24 cm (9,5') de altura e possui a massa equivalente a 1 kg. A área de coleta é igual a 214 cm<sup>2</sup>, com um sistema basculante que possui um interruptor magnético para registrar cada clique. e a capacidade necessária para ativar o sistema equivale a 0,2 mm.

A medição da velocidade e direção do vento foi realizada por meio de um anemômetro da marca Davis. A velocidade do vento é determinada por um sensor magnético, enquanto a direção é obtida por meio de uma ventoinha acoplada a um potenciômetro. O instrumento possui dimensões de 470 mm × 191 mm × 121 mm e massa total de 1,33 kg, incluindo o suporte de fixação. O anemômetro opera com faixas

de medição de velocidade que variam entre 0,5 e 89 m/s (equivalente a 1 a 200 mph, 1 a 173 nós ou 1 a 322 km/h), com precisão de  $\pm 2$  mph ( $\pm 2$  nós,  $\pm 3$  km/h ou  $\pm 1$  m/s), ou  $\pm 5\%$ , considerando o maior valor. A medição da direção do vento varia de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , com precisão de  $\pm 3^\circ$ .

O tratamento dos dados consistiu, inicialmente, na aplicação de estatística descritiva (média, moda, desvio padrão, valores mínimo e máximo, correlação e regressão linear) às séries adquiridas. Foi também calculada a amplitude térmica mensal, com base na diferença entre as temperaturas máximas e mínimas mensais, permitindo analisar as oscilações térmicas ao longo do ano.

Foi realizado o cálculo para saber os dias com e sem chuva, onde adotou-se o critério: acumulado diário  $\geq 1$  mm = dia com chuva; acumulado  $< 1$  mm = dia seco. Com esse parâmetro é possível diferenciar o dia seco do dia com chuva.

Na etapa de processamento, os dados coletados estavam em formato .CSV (comma separated values), o que exigiu limpeza e organização para garantir a integridade das informações. Após o pré-processamento, iniciaram-se os testes para validação das séries.

Para a análise e visualização dos dados, foi utilizada a linguagem de programação Python. As bibliotecas empregadas incluíram: NumPy, Pandas, Matplotlib, Plotly, Seaborn, Windrose e SciPy. No processo de tratamento, cada instrumento teve uma respectiva atenção, onde foram visualizados número de dados registrados, dados ausentes (NaN) e outliers. Foi realizado o método de preenchimento em dados faltosos obtidos do site da BDMEP da estação (82191) que foi a base para realizar a confecção da normal climatológica da região.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados apresentados são referentes ao período de 01 de dezembro de 2023 às 00:00 a 30 de novembro de 2024 às 23:00, totalizando 366 dias e 8783 dados coletados. Cabe salientar que os sensores funcionaram de maneira coerente ao longo dos meses, no entanto, ocorreram algumas complicações que afetaram a precisão dos dados do pluviômetro durante aproximadamente 50 dias, o que equivale à metade da segunda quinzena de janeiro a o início da primeira quinzena de março. Esse sinistro que ocorreu no instrumento está descrito no tópico que se trata a precipitação pluviométrica.

Foram extraídas informações sobre a variabilidade de elementos meteorológicos. Após análise descritiva, obtiveram-se os seguintes resultados referentes a média/moda

mensal conforme ilustrado na tabela 1.

Tabela 1 - Tabela com estatísticas descritivas (média e desvio padrão) dos elementos meteorológicos registrados no período de dezembro/2023 a novembro/2024.

<b>Meses</b>	<b>P</b>	<b>Temp</b>	<b>Umi_ar</b>	<b>Vel_ven</b>	<b>Dir_v</b>	<b>Vel_ra</b>
<b>Dez_23</b>	189,8	27,53(±2,60)	86,34(±7,95)	1,33(±0,89)	17,85	2,79(±1,58)
<b>Jan_24</b>	232,4	26,96(±2,46)	88,61(±7,40)	1,18(±0,90)	18,76	2,61(±1,68)
<b>Fev_24</b>	31,2	26,88(±2,31)	88,55(±6,96)	1,25(±0,97)	18,68	2,71(±1,82)
<b>Mar_24</b>	246,2	27,22(±2,22)	89,55(±6,47)	0,92(±0,79)	19,83	2,08(±1,50)
<b>Abr_24</b>	459,8	27,35(±2,31)	90,25(±6,27)	0,74(±0,68)	20,39	1,80(±1,39)
<b>Mai_24</b>	249,8	27,71(±2,46)	88,79(±6,82)	0,91 (±0,80)	18,47	1,96(±1,53)
<b>Jun_24</b>	155,8	27,92(±2,52)	84,50(±7,57)	1,40(± 0,78)	13,29	2,73(±1,30)
<b>Jul_24</b>	28,8	28,18(±2,68)	80,95 (±9,85)	1,36(±0,70)	13,26	2,60(±1,09)
<b>Ago_24</b>	73,2	28,12(±2,82)	81,16(±8,96)	1,54(±0,77)	15,63	3,00(±1,28)
<b>Set_24</b>	39,6	28,40(±2,78)	80,07(±7,85)	1,89(±0,87)	15,42	3,50(±1,23)
<b>Out_24</b>	44,8	28,30 ±2,70)	80,62(±7,62)	1,79(±0,89)	10,20	3,33(±1,34)
<b>Nov_24</b>	121,8	29,68(±2,76)	79,36(±8,67)	1,74(±0,91)	9,80	3,29(±1,44)

P = Precipitação (mm)

Temp\_ar = Temperatura do ar (°C)

Umi\_ar = Umidade do Ar (UR%)

Vel\_ven = Velocidade do Vento (m/s)

Dir\_v = Direção do Vento (Graus)

Vel\_ra = Velocidade de Rajada (m/s)

## TEMPERATURA DO AR

A temperatura média do ar na área de estudo variou entre 22,2 e 35,1 °C. Novembro apresentou a maior média mensal ( $29,68 \pm 2,76$  °C), enquanto fevereiro apresentou a mais baixa ( $26,88 \pm 2,31$  °C). As médias mensais apresentaram variação discretas, mantendo-se relativamente estáveis ao longo do ano, característica típica de regiões equatorial. A média anual foi de 27,75 °C, com desvio padrão de  $\pm 2,61$  °C.

A análise da série temporal evidencia oscilações diárias marcadas por máximos e mínimos, refletindo as flutuações naturais da temperatura. Embora a sazonalidade esteja presente, a variação da variável manteve-se alta durante todo o período. A linha de tendência indica um padrão crescente, com aumento gradual da temperatura média ao longo do ano (Figura 3).

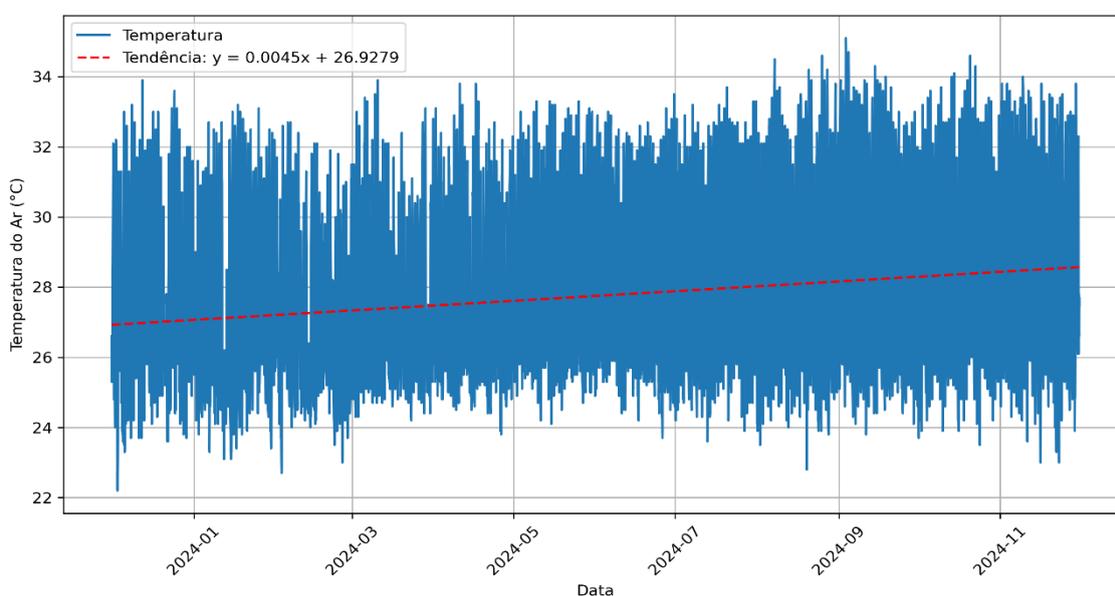


Figura 3 - Série temporal da temperatura média do ar (°C) registrada entre dezembro de 2023 a novembro de 2024, com linha de tendência linear indicando variação ao longo do período.

A equação da linha de tendência é dada por:  $y = 0.0045x + 26.9279$ , o que sugere um acréscimo médio diário de 0,0045 °C. O coeficiente angular evidencia uma tendência sutil de aquecimento ao longo dos meses. As oscilações diárias e sazonais são evidentes e refletem diretamente na amplitude térmica da região. O mês de maio registrou o menor valor, com 9,2 °C, enquanto agosto apresentou a maior, atingindo 11,8 °C (Figura 4). Esses valores conseguem mostrar a variação anual mostrando uma variação entre o período chuvoso e menos chuvoso.

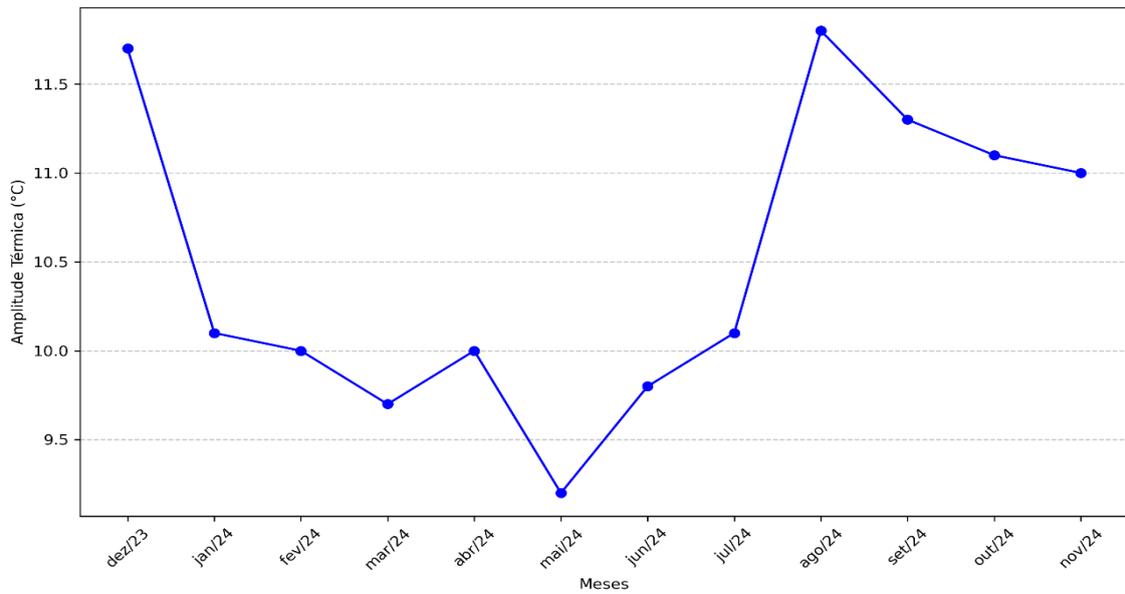


Figura 4 – Variação mensal da amplitude térmica (°C) — diferença entre as temperaturas máxima e mínima mensal registrada entre dezembro de 2023 e novembro de 2024.

Ao comparar a média da série recente com a normal climatológica (1991-2020), observam-se variações sazonais semelhantes, embora os valores do período atual se apresentem sistematicamente superiores. Em novembro, por exemplo, a média foi cerca de 2 °C mais alta do que a registrada na série histórica (Figura 5).

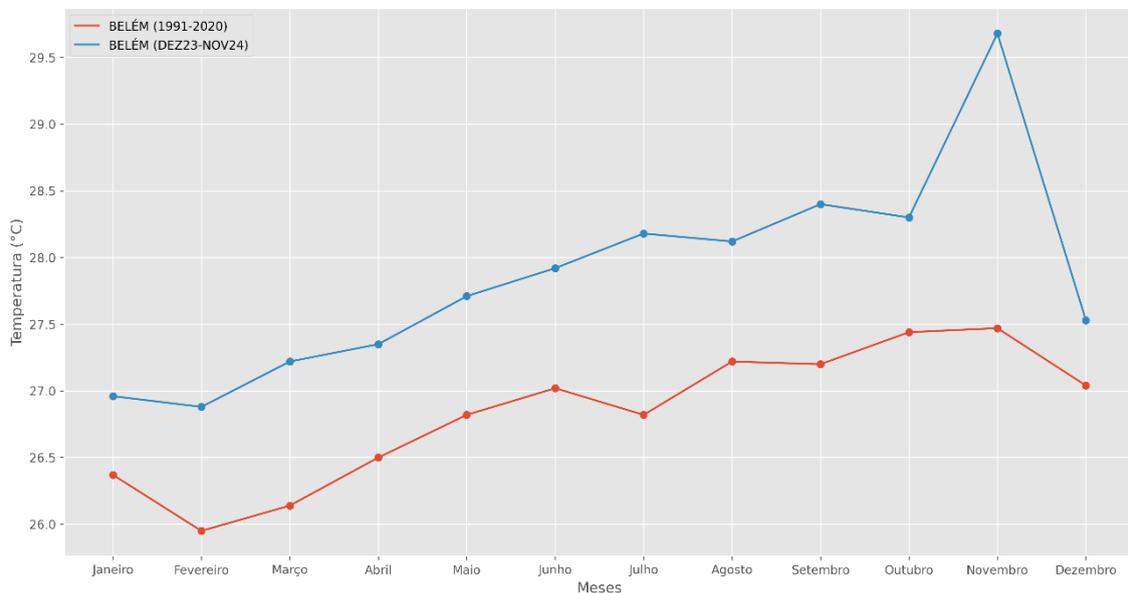


Figura 5 – Comparação mensal das temperaturas médias (°C) em Belém entre a normal climatológica (linha vermelha) e o período recente (linha azul).

A análise de regressão linear entre as duas séries revelou uma correlação positiva moderada (Figura 6). A equação da reta de regressão indica que, para cada aumento de 1 °C na temperatura média da normal climatológica, a temperatura média recente tende a crescer em

aproximadamente 1,31 °C.

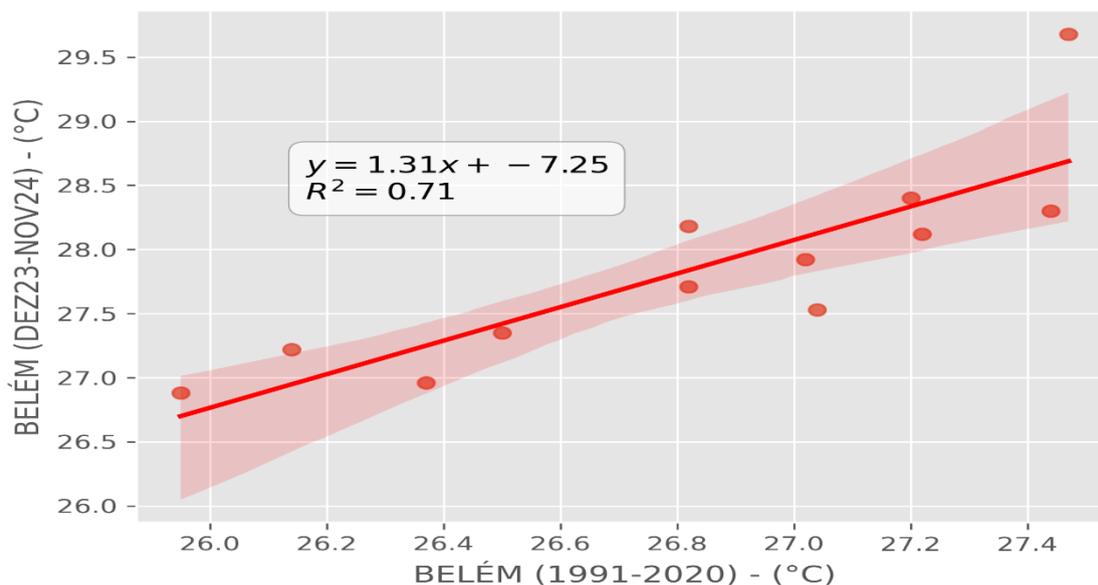


Figura 6 – Correlação e regressão linear da série recente com a normal climatológica para o parâmetro de temperatura do ar

O coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,71$ ) indica que 71% da variabilidade da temperatura recente pode ser explicada pelos valores históricos, demonstrando um bom ajuste do modelo. A correlação de Pearson associada pode ser estimada como:  $r \approx \sqrt{0,71} \approx 0,84$  e esse valor representa uma correlação forte e positiva entre as duas variáveis. Isso quer dizer que, em geral, quanto maior a temperatura média histórica, maior tende a ser a temperatura média no período atual analisado.

A faixa sombreada ao redor da linha de tendência representa o intervalo de confiança da regressão. A proximidade dos pontos com a linha reforça a confiabilidade do modelo e evidencia uma tendência linear consistente, compatível com a dinâmica climática da região.

## UMIDADE DO AR

A série temporal da umidade relativa do ar (UR) apresentou significativa variabilidade diária, com valores oscilando entre 49,4% (mínimo registrado em 17 de julho de 2024, às 16h) e 97,3% (máximo observado em 1º de dezembro de 2023, às 2h). A média anual foi de 84,89%, com desvio padrão de  $\pm 8,75\%$ , indicando flutuações relevantes ao longo do período (Figura 7).

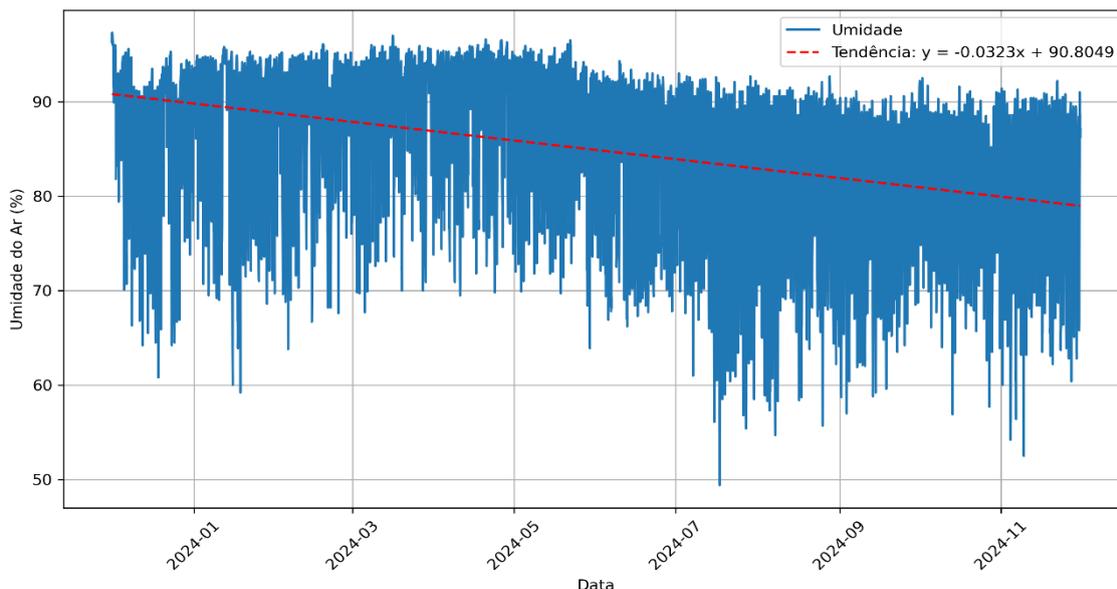


Figura 7 – Variação temporal da umidade relativa do ar (%) durante o período de dezembro de 2023 a novembro de 2024, com linha de tendência destacando uma redução na média.

A linha de tendência da série indica uma leve redução na umidade relativa do ar ao longo dos meses, conforme representado pela equação linear ajustada:  $y = -0.0323x + 90.8049$ , o que sugere um decréscimo contínuo e discreto, possivelmente associado à sazonalidade amazônica. A intensificação da variabilidade diária nos meses de estiagem torna mais evidente a distinção entre as estações chuvosa e menos chuvosa, sugerindo forte influência da temperatura e da radiação solar sobre a umidade atmosférica.

Ao comparar a série recente com a normal climatológica (1991–2020), nota-se que, durante o período chuvoso (março a junho), os valores atuais de UR foram superiores aos da climatologia, com destaque para abril, que ultrapassou 90%. Já no segundo semestre, os valores históricos passaram a predominar (Figura 8). Mesmo assim, os níveis da série recente permaneceram acima de 79%, não atingindo os mínimos da climatologia (~75% em dezembro). Esses resultados indicam que, no período recente, o "verão amazônico" (estação seca) foi menos pronunciado em termos de umidade relativa, apresentando atenuação na queda desse parâmetro em comparação com o padrão histórico.

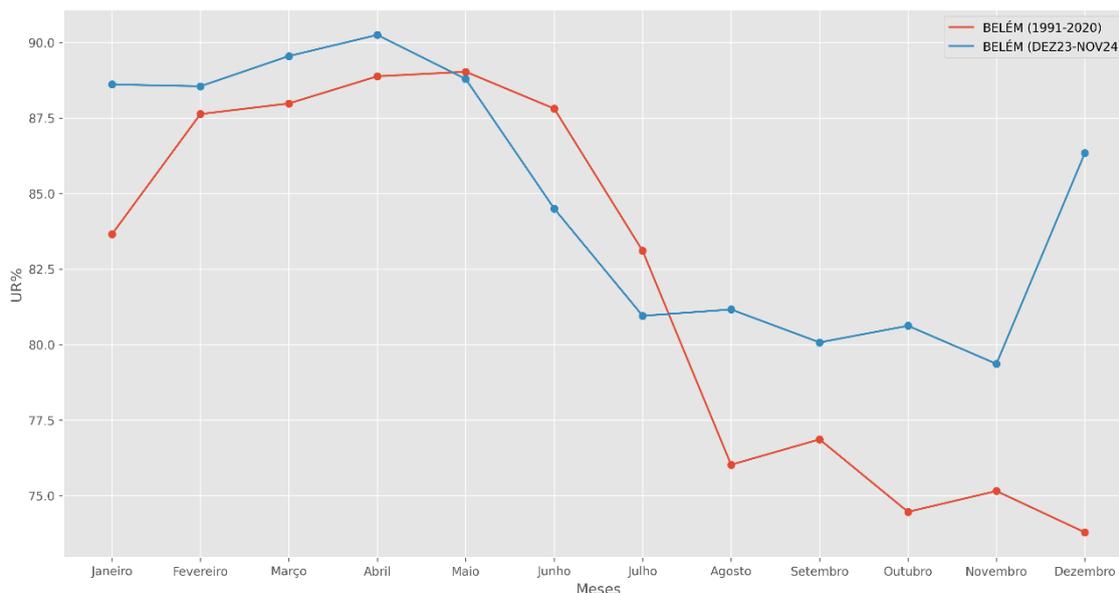


Figura 8 – Comparação entre as médias da umidade relativa do ar da série recente (linha azul) com a normal climatológica da região (linha vermelha).

A análise de regressão linear entre as duas séries mensais apontou uma relação positiva moderada, com equação:  $y = 0,50x + 43,91$  indicando que, a cada aumento de 1% na média histórica da UR, a série recente tende a aumentar em 0,50%. O coeficiente angular (0,50) mostra uma tendência de resposta proporcional moderada da umidade atual em relação à média de longo prazo, enquanto o intercepto de 43,91 representa o valor estimado de umidade quando a média histórica é zero (Figura 9).

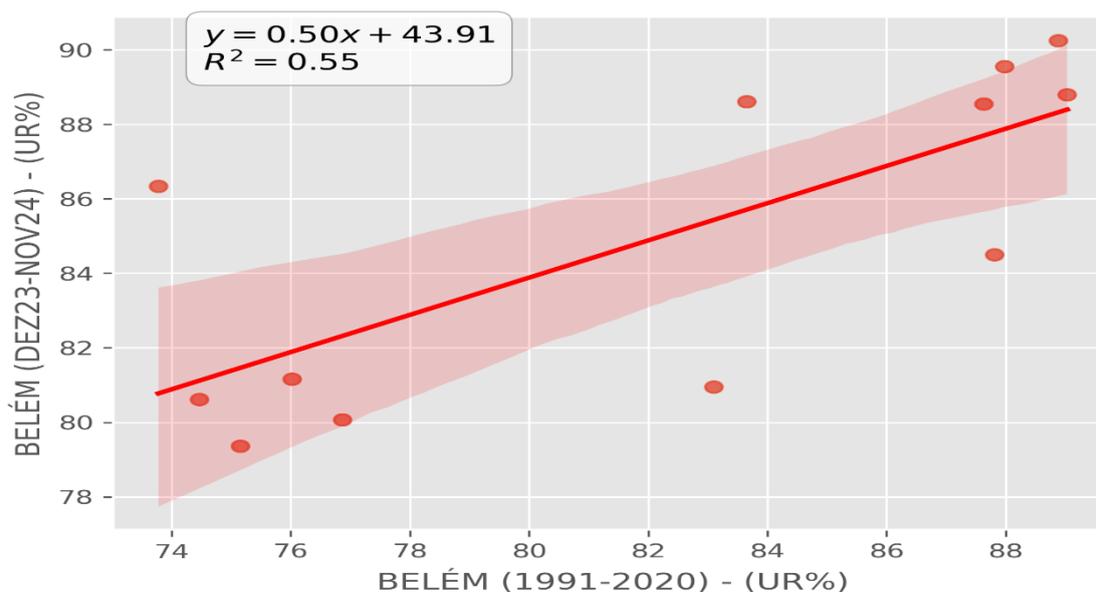


Figura 9 – correlação e regressão linear da série recente com a normal climatológica para o parâmetro de umidade relativa do ar.

O coeficiente de determinação  $R^2 = 0,55$  revela que 55% da variação recente pode ser

explicada pelos dados históricos. Esse valor indica um ajuste moderado do modelo, sugerindo que a regressão linear explica boa parte da variabilidade observada nos dados, mas ainda existem outros fatores não considerados que influenciam os resultados. O coeficiente de correlação de Pearson pode ser estimado a partir de  $r \approx \sqrt{0.55} \approx 0.74$ , o que indica uma correlação positiva moderada a forte entre as variáveis.

## PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

A precipitação pluviométrica apresentou inconsistências ao longo do período de coleta, especialmente entre a segunda quinzena de janeiro e a primeira quinzena de março. Nesses meses, uma ave construiu um ninho no interior do pluviômetro, bloqueando o escoamento da água e comprometendo o registro adequado dos volumes acumulados. Em fevereiro, fragmentos de outro ninho obstruíram novamente o orifício da balança, ocasionando acúmulo de água e crescimento de limo no recipiente. Esses eventos afetaram a confiabilidade dos dados até 20 de março de 2024.

Além disso, a manutenção do equipamento sofreu um atraso significativo devido à presença de um ninho de marimbondos sob o painel solar. Como o local era de difícil acesso, a remoção dos insetos exigiu o suporte do corpo de bombeiros, o que prolongou ainda mais a indisponibilidade de dados.

A Figura 10 apresenta a precipitação mensal acumulada entre dezembro de 2023 e novembro de 2024, totalizando 1.873,2 mm. Os meses de março a maio foram os mais chuvosos do ano, com destaque para abril, que registrou uma precipitação média de aproximadamente 15,33 mm/dia. A partir de maio, observou-se uma redução nos índices pluviométricos, marcando a transição para o período menos chuvoso da região amazônica. Entre junho e novembro, a precipitação acumulada mensal variou entre 28,8 mm e 155,8 mm, sendo julho o mês com menor volume de chuva.

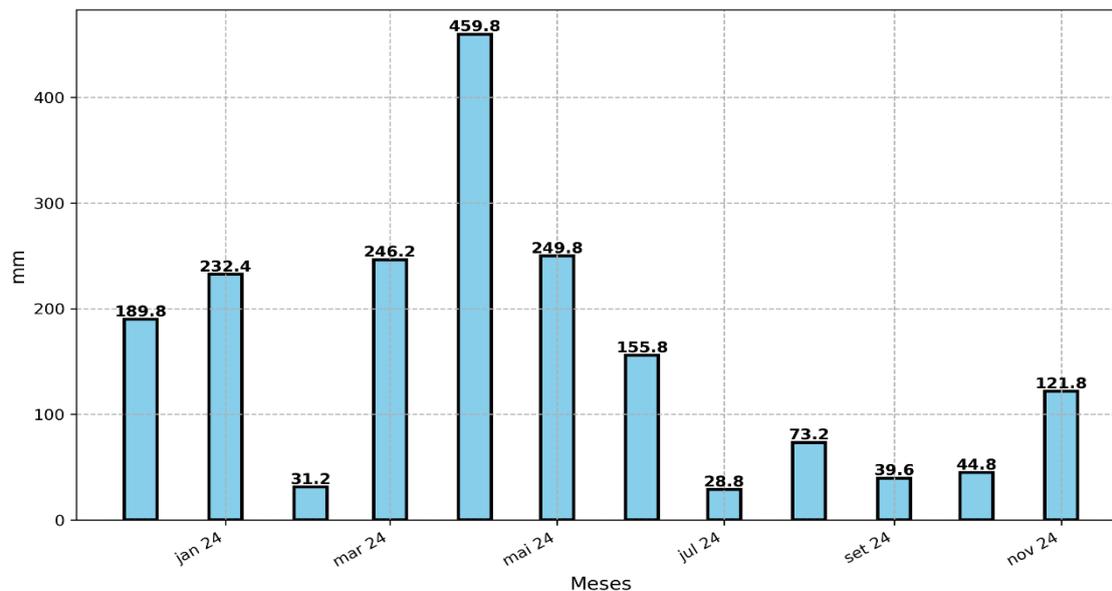


Figura 10 – Precipitação acumulada mensal para o período de dezembro de 2023 a novembro de 2024. Os meses de janeiro a março estão com valores divergentes, não apresentando o valor real acumulado.

Desde dezembro de 2023 até o final do primeiro semestre de 2024, todos os meses registraram mais de 18 dias com precipitação acumulada ( $\geq 1,00$  mm/dia), com exceção de fevereiro, afetado por falhas no registro. Março destacou-se como o mês com maior número de dias chuvosos, totalizando 28 dias de precipitação.

No segundo semestre de 2024, houve uma mudança no regime de chuvas, com uma redução na frequência do fenômeno e um aumento nos dias secos. Entre julho e novembro, registraram-se 127 dias sem chuva e apenas 38 com precipitação. Essa tendência foi mais evidente em julho, que teve apenas 5 dias de chuva e 26 dias secos. Nos meses seguintes, a quantidade de dias sem precipitação permaneceu elevada, sempre acima de 19 dias sem chuva (Figura 11).

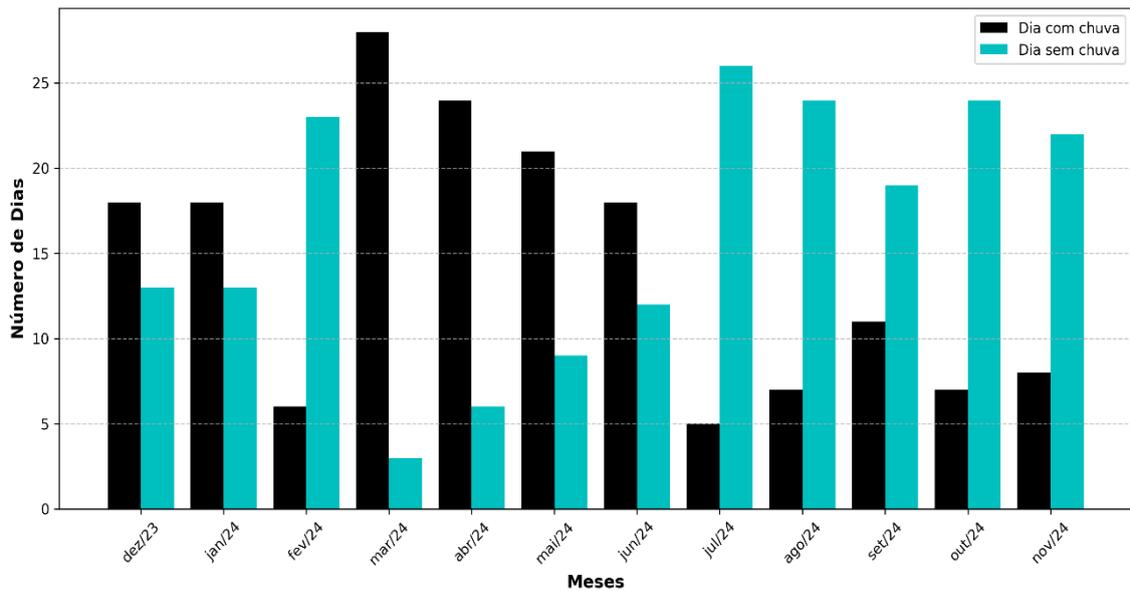


Figura 11 – Distribuição mensal do número de dias sem chuva (ciano) e com chuva (preto) para cada mês no intervalo de dezembro de 2023 a novembro de 2024.

A comparação entre a série recente e a normal climatológica revela que os totais mensais de precipitação ficaram abaixo da média histórica em quase todo o período. O mês de julho se destacou pela forte anomalia negativa, registrando menos de 50 mm, frente a uma média climatológica próxima de 150 mm (Figura 12).

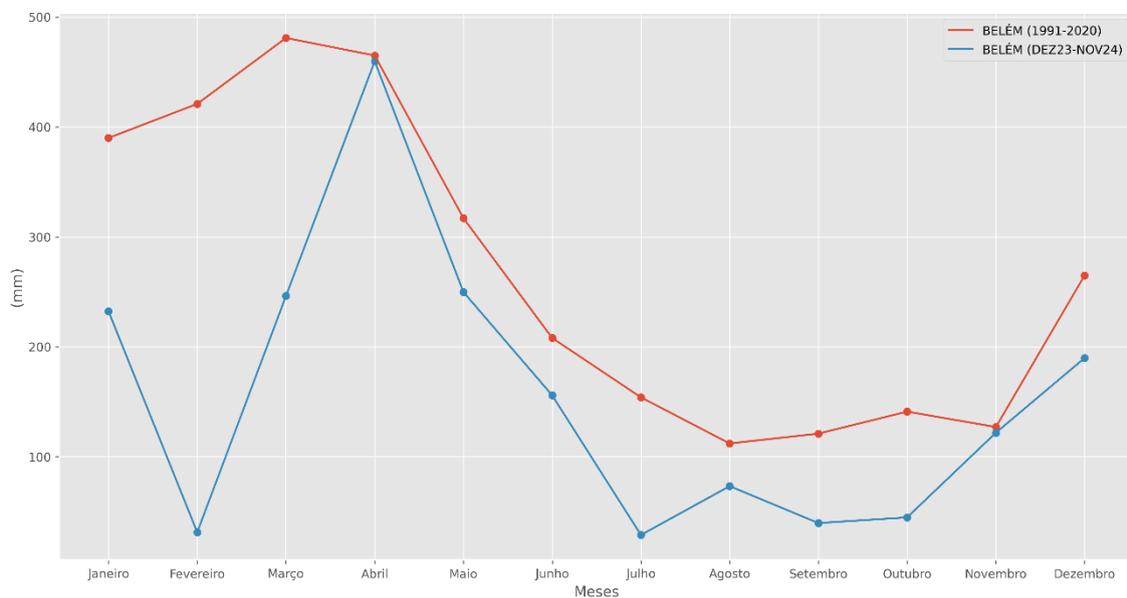


Figura 12 – Comparação entre as médias do acumulado mensal da precipitação pluviométrica da série recente (linha azul) com a normal climatológica da região (linha vermelha).

É importante ressaltar que os dados dos meses de janeiro a março estão incompletos, o que pode gerar inconsistências nos resultados. Em abril, que marca o fim do período chuvoso, houve um pico de precipitação, embora ainda abaixo da média histórica. Durante a estação seca,

a escassez de chuvas foi ainda mais acentuada, especialmente no segundo semestre de 2024, quando a ausência de precipitação foi mais evidente.

No mês de julho, os índices caíram para menos de 50 mm, enquanto a média histórica gira em torno de 150 mm. No final do ano, a precipitação começou a se recuperar, aproximando-se da normal climatológica. Em novembro de 2024, os volumes ainda estavam ligeiramente abaixo da média, mas já mais próximos do esperado.

A Figura 13 apresenta o gráfico de correlação e regressão linear. Com base na equação  $y = 0,61x + -7,85$ , observa-se que, para cada aumento de 1 mm na precipitação no período histórico, espera-se um incremento médio de aproximadamente 0,75 mm na precipitação média de longo prazo. O coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,46$ ) revela que 46% da variação na precipitação atual pode ser explicada pela variação na série de referência.

O coeficiente de correlação de Pearson pode ser estimado a partir de  $R^2$ , sendo aproximadamente  $r \approx \sqrt{0,46} \approx 0,68$ , o que indica uma correlação positiva moderada entre as variáveis. Isso significa que há uma tendência de que anos com maior precipitação no período analisado também apresentem uma maior precipitação acumulada no longo prazo.

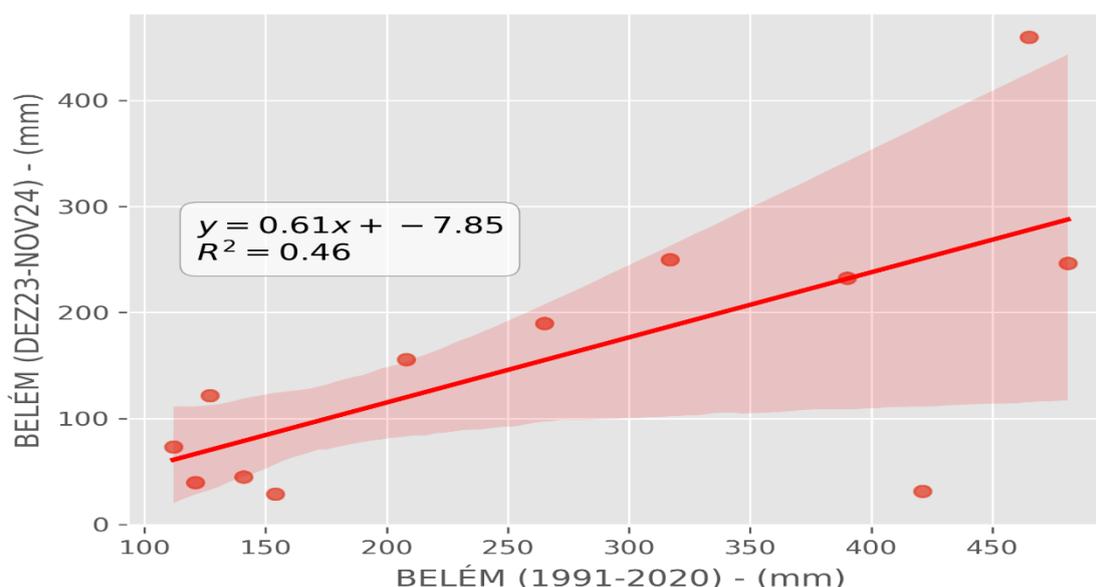


Figura 13 – Correlação e regressão linear entre a precipitação mensal (mm) da série recente (dezembro/2023 – novembro/2024) e a normal climatológica (1991–2020) em Belém.

## VENTO

A velocidade média do vento na região foi de 1,34 m/s, com um desvio padrão de  $\pm 0,90$  m/s. A maior parte dos registros situou-se entre 1,0 e 3,1 m/s, conforme representado pelas cores azul e verde na Rosa dos Ventos (Figura 14). Velocidades superiores a 4,2 m/s foram menos frequentes, sendo 5,2 m/s o valor máximo observado. A direção predominante dos ventos foi norte (N) e nordeste (NE), com maior concentração no setor nor-nordeste (NNE).

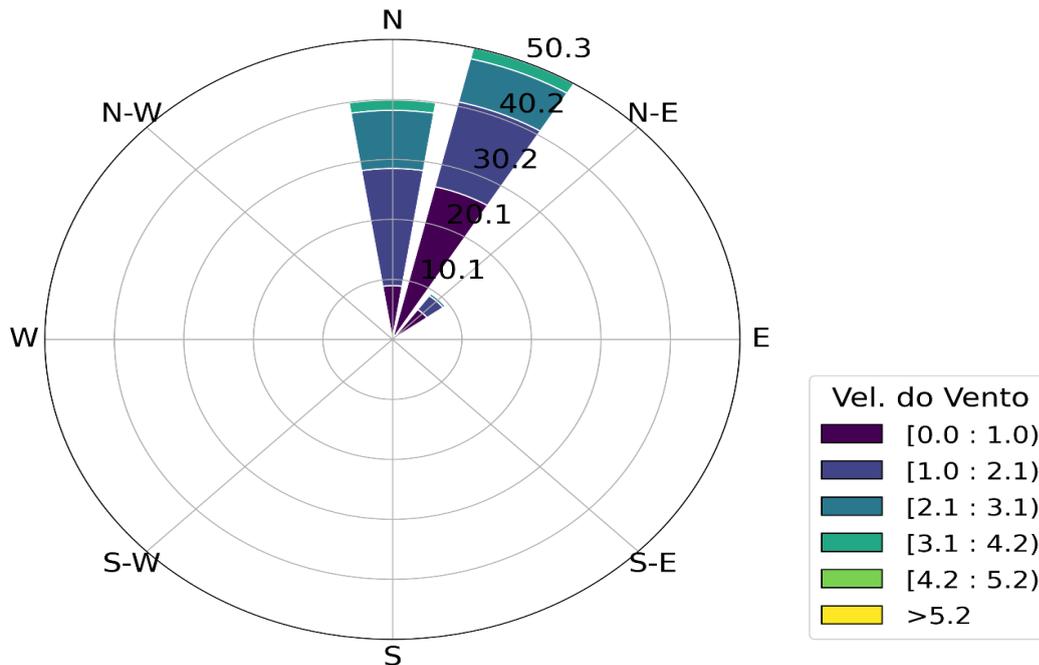


Figura 14 – Rosa dos ventos representando a distribuição direcional e intensidade média dos ventos (em m/s) entre dezembro/2023 e novembro/2024.

A Figura 15 apresenta quatro rosas dos ventos, cada uma representando a distribuição da direção e velocidade do vento ao longo de diferentes períodos:

- Dezembro - Janeiro: Transicional seco-chuvoso
- Fevereiro - Março - Abril: Período chuvoso
- Maio - Junho - Julho: transicional chuvoso-seco
- Agosto - Setembro - Outubro: Período menos chuvoso

O mês de novembro foi excluído dessa visualização por representar o início de um novo ciclo e ter sido o último mês da série analisada.

Em todos os períodos, os ventos predominaram nas direção Norte (N) e Nordeste (NE). A frequência dos ventos diminui gradativamente para outras direções, sendo muito baixa para o quadrante sul (S, SW e SE). As cores representam diferentes faixas de velocidade do vento, variando de 0-1 m/s (tons mais escuros) até valores acima de 4,8 m/s (tons mais claros/amarelos). A maior parte dos ventos apresentou velocidades baixas a moderadas, com poucos eventos de vento forte. Os meses com maiores velocidades médias foram setembro ( $1,89 \pm 0,87$  m/s) e outubro ( $1,79 \pm 0,89$  m/s). Por outro lado, abril ( $0,74 \pm 0,68$  m/s) e maio ( $0,91 \pm 0,80$  m/s) registraram os menores valores, refletindo o padrão sazonal.

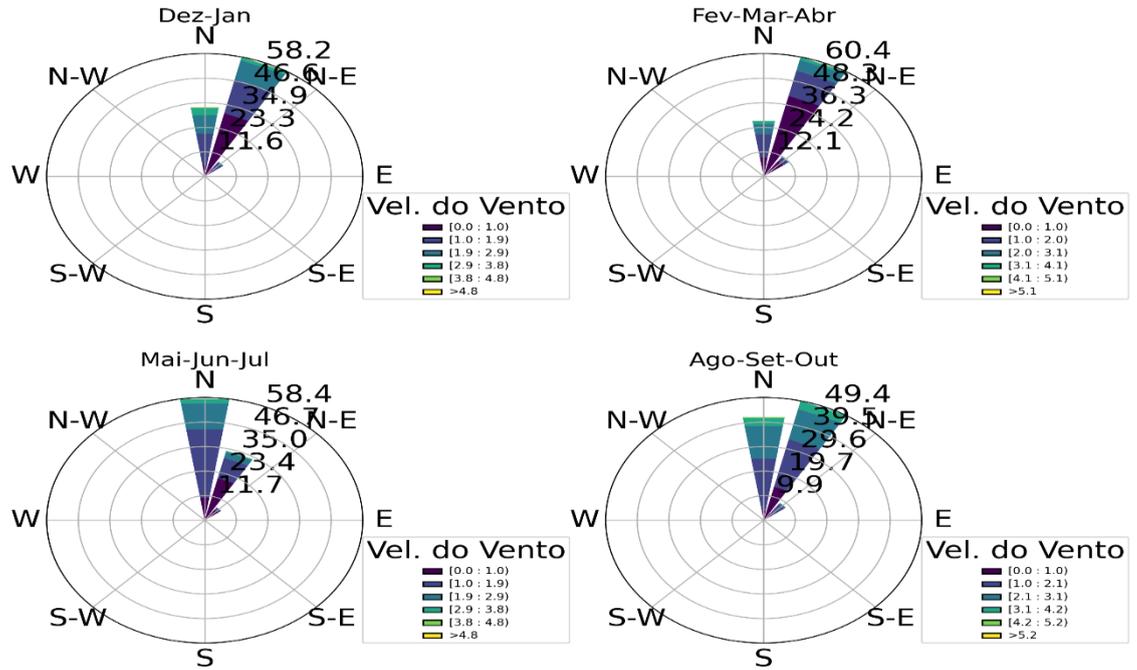


Figura 15 – Quatro rosas dos ventos representando a distribuição direcional e intensidade da velocidade média do vento (em m/s) em diferentes períodos entre dezembro de 2023 e novembro de 2024. Cada rosa corresponde a um intervalo sazonal, com barras coloridas indicando a frequência relativa do vento por direção cardinal e faixas de velocidade (escala variável por período).

Ao analisar o histograma da figura 16, é possível observar a distribuição da velocidade do vento (m/s) ao longo do ano, segmentada também em quatro períodos. Em todos os períodos analisados, observa-se que a distribuição da velocidade do vento segue um padrão assimétrico à direita, indicando que a maioria das medições de vento ocorre em baixas velocidades, com valores mais altos sendo menos frequentes. O intervalo de velocidades do vento geralmente varia entre 0 e 5 m/s, com a maior parte das observações concentradas entre 0 e 2 m/s. A frequência mais alta ocorre para velocidades baixas, próximas de 0 m/s, sugerindo que períodos de calmaria são comuns.

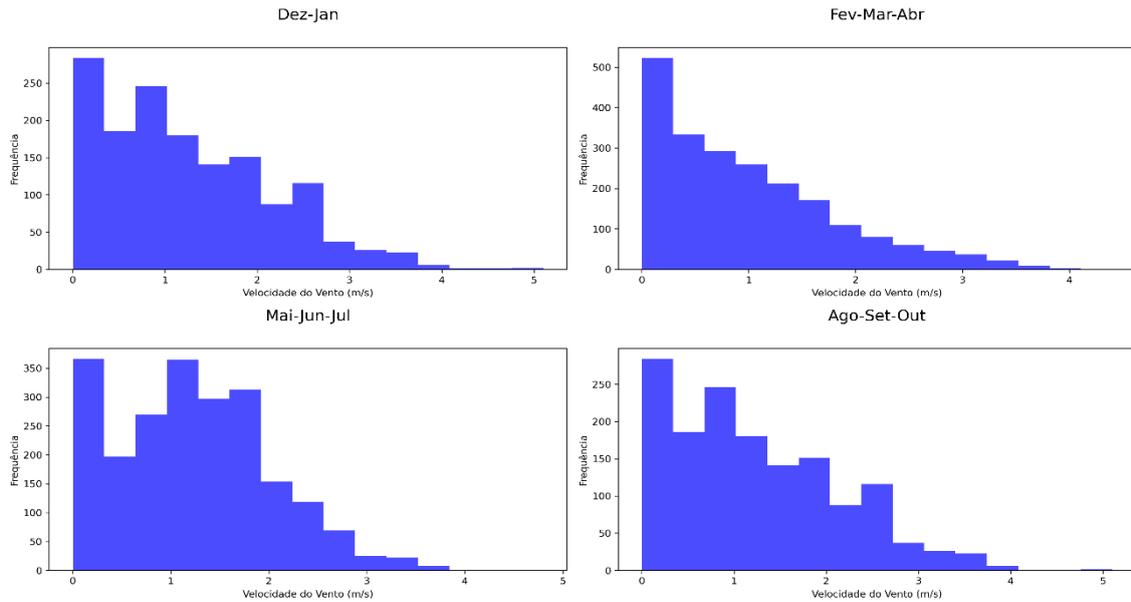


Figura 16 – Histogramas da frequência da velocidade média do vento (m/s) em Belém, distribuídas por períodos: Dez-Jan, Fev-Mar-Abr, Mai-Jun-Jul e Ago-Set-Out. As barras representam a frequência de ocorrência de diferentes faixas de velocidade.

A Figura 17 compara a velocidade média do vento da série recente com a normal climatológica (1991–2020). Entre março e maio, os valores observados foram significativamente inferiores aos históricos. Em fevereiro, no entanto, houve leve exceção, com ventos ligeiramente mais intensos. A partir de junho, observou-se recuperação nas velocidades, com tendência de alta até setembro, embora ainda abaixo da média histórica. Em outubro, os valores se aproximaram da climatologia, mas voltaram a cair em novembro.

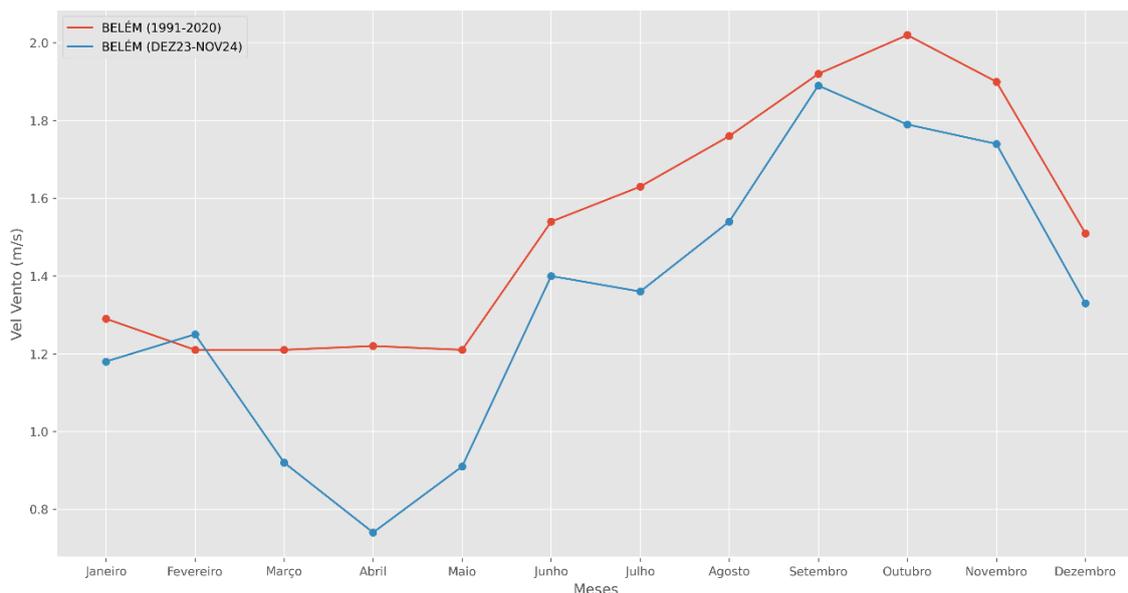


Figura 17 – Comparação mensal da velocidade média do vento (em m/s) entre a série histórica (linha vermelha) e a série recente (linha azul) em Belém. As linhas representam os valores médios para cada mês, destacando anomalias da série recente em relação à climatologia. Padrões sazonais e desvios significativos são evidenciados.

A regressão linear entre as duas séries resultou na equação  $y = 1.10x + -0.35$  e isso

significa que, para cada aumento de 1 m/s na velocidade média do vento na série histórica, a velocidade média do período recente tende a aumentar em aproximadamente 0,79 m/s (Figura 18). O coeficiente de determinação  $R^2 = 0,87$  indica que 87% da variação na velocidade média do vento no longo prazo pode ser explicada pelos valores do período específico analisado.

O coeficiente de correlação de Pearson pode ser estimado como  $r \approx \sqrt{0.87} \approx 0.93$ , o que indica uma correlação muito forte e positiva entre as variáveis. Isso significa que há uma relação direta bem definida: anos com ventos mais fortes no período analisado tendem a ter velocidades médias de vento maiores no longo prazo.

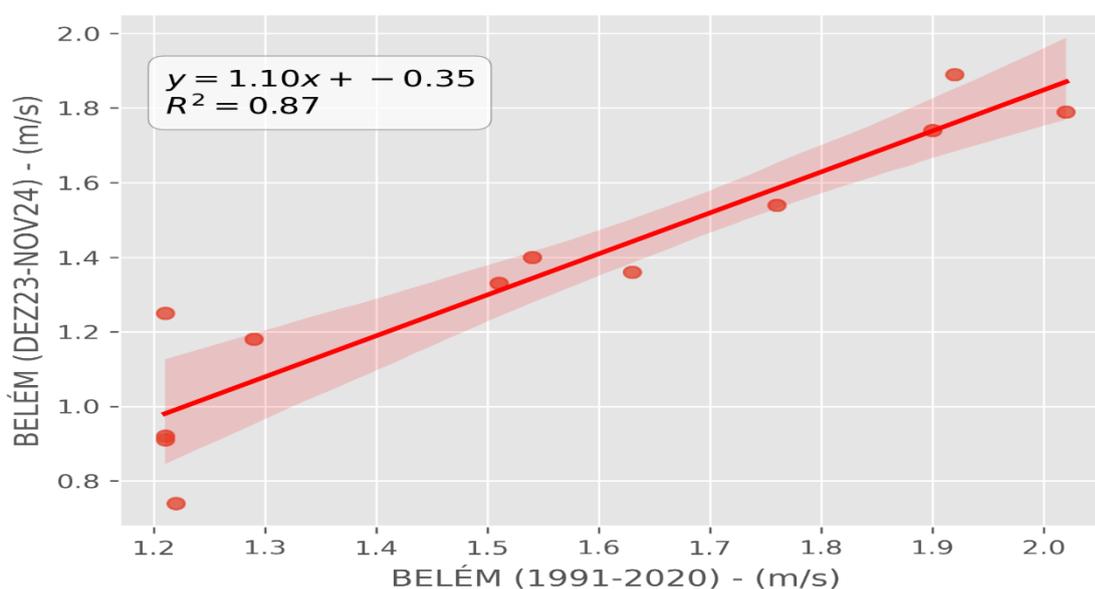


Figura 18 – Correlação e regressão linear entre a velocidade média do vento (m/s) de uma série recente (dezembro/2023 a novembro/2024) e a normal climatológica em Belém. A linha de tendência (vermelha) segue a equação indicando uma forte relação positiva. Os pontos representam os pares de dados (série recente vs. climatologia), e a dispersão evidencia a consistência do ajuste.

## RAJADA

A média da velocidade das rajadas de vento na área de estudo foi de 2,70 m/s, com desvio padrão de  $\pm 1,57$  m/s e variação entre 0,00 m/s e 14,82 m/s (Figura 19). A direção predominante das rajadas foi nordeste (NE), seguida por leste-nordeste (ENE) e, em menor frequência, leste (E). Também foram registradas rajadas vindas de outras direções, como sul (S) e oeste (O), embora com ocorrência reduzida.

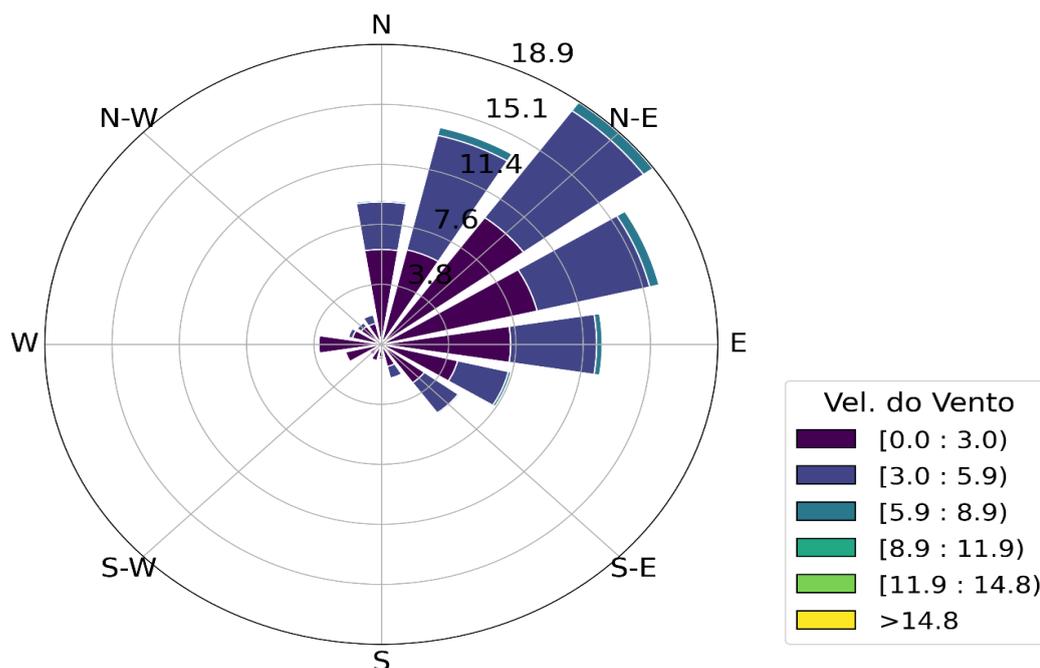


Figura 19 – Rosa dos ventos representando a distribuição direcional e intensidade das rajadas de vento (em m/s) entre dezembro de 2023 e novembro de 2024. As barras coloridas indicam a frequência relativa das rajadas por direção cardinal, com cores correspondentes às faixas de velocidade.

A distribuição da intensidade mostra que a maioria das rajadas concentrou-se entre 3,0 e 8,9 m/s. Rajadas acima de 8,9 m/s foram menos comuns, e valores superiores a 11,9 m/s foram raros. Rajadas superiores a 14,8 m/s, representadas na rosa dos ventos por faixas amarelas, não foram observadas no período, sugerindo um regime predominantemente de ventos moderados.

A Figura 20 apresenta quatro rosas das rajadas de vento, divididas por períodos sazonais:

- Dezembro–janeiro: transição seco-chuvoso
- Fevereiro–abril: estação chuvosa
- Maio–julho: transição chuvoso-seco
- Agosto–outubro: estação menos chuvosa

Em todos os períodos, os ventos predominam na direção NE, com variações sazonais. No bimestre dezembro–janeiro, observou-se maior concentração de rajadas entre 2,7 e 7,0 m/s, com alguns eventos acima de 9,2 m/s. Entre fevereiro e abril, houve diminuição na intensidade média, com a maioria das rajadas variando entre 2,3 e 6,9 m/s — padrão compatível com o aumento da umidade e enfraquecimento de sistemas atmosféricos de grande escala.

De maio a julho, notou-se leve intensificação das rajadas, concentradas entre 2,0 e 8,1 m/s, associadas à transição para o período seco. Entre agosto e outubro, ocorreram as rajadas mais intensas do ano, com registros pontuais acima de 12,5 m/s, refletindo o predomínio de

padrões atmosféricos mais secos e maior contraste térmico entre superfícies.

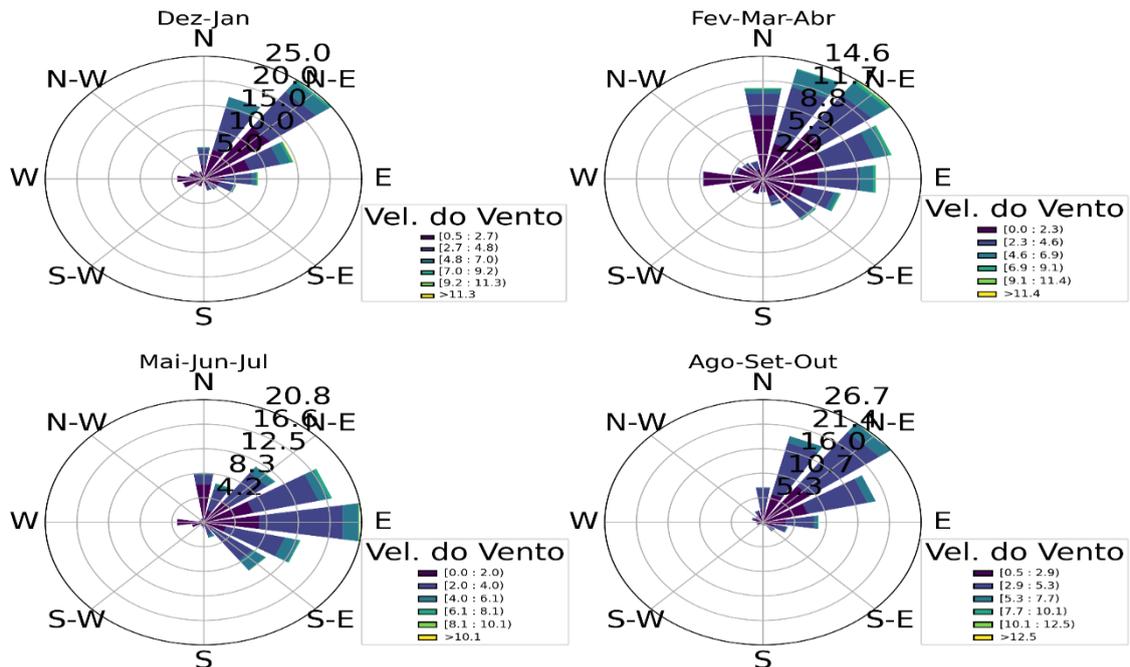


Figura 20 – Quatro rosas dos ventos representando a distribuição direcional e intensidade das rajadas de vento (em m/s) em diferentes períodos entre dezembro de 2023 e novembro de 2024. Cada rosa corresponde a um intervalo sazonal, com barras coloridas indicando a frequência relativa das rajadas por direção cardinal e faixas de velocidade (escala variável por período)

O histograma apresenta a distribuição da velocidade do vento (m/s) ao longo de quatro períodos distintos do ano (Figura 21). Observa-se que, em todas as estações, a distribuição da velocidade do vento segue um padrão assimétrico à direita, com a maioria das ocorrências concentradas em velocidades mais baixas (entre 0 e 4 m/s), enquanto valores mais altos ocorrem com menor frequência. No trimestre de maio a julho, a frequência de velocidades médias de vento é ligeiramente maior, o que pode estar associado ao período de transição para a estação menos chuvosa, caracterizado por uma maior influência dos sistemas meteorológicos que favorecem o aumento da intensidade dos ventos.

Nos meses de fevereiro a abril, há um maior número de ocorrências de velocidades de vento mais elevadas em comparação com os demais períodos, sugerindo que essa fase do ano pode estar associada a padrões atmosféricos que favorecem o aumento das rajadas. Nos demais trimestres, embora a distribuição geral se mantenha semelhante, nota-se uma leve redução nas velocidades máximas registradas. Esses padrões indicam uma sazonalidade na intensidade do vento, possivelmente relacionada à variabilidade dos sistemas meteorológicos que atuam na região ao longo do ano.

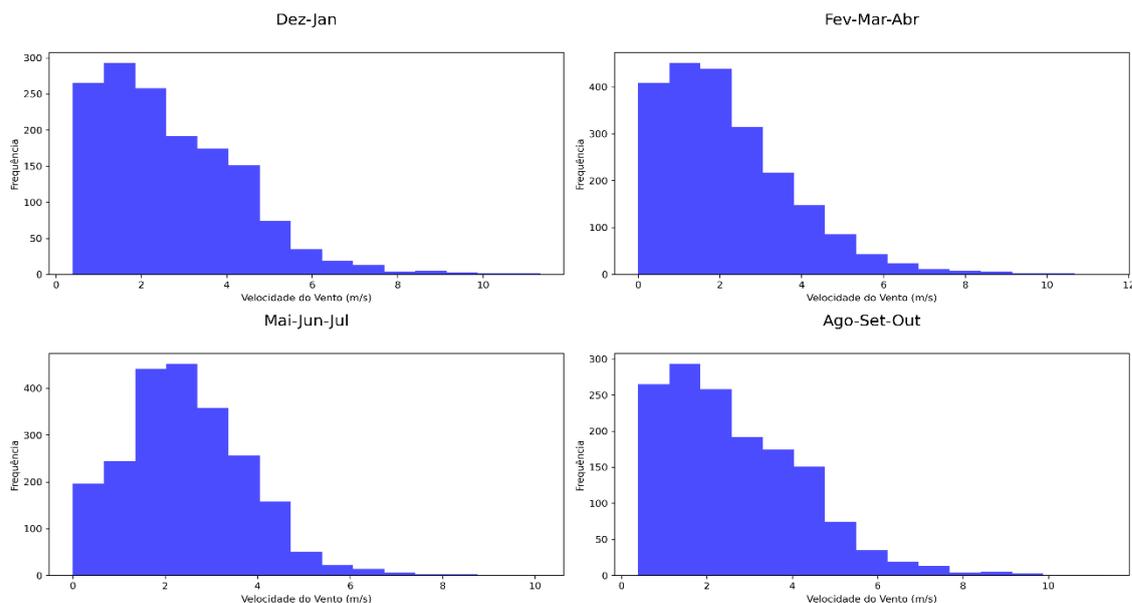


Figura 21 – Histogramas da frequência das rajadas de vento (m/s) em Belém, distribuídas por períodos: Dez-Jan, Fev-Mar-Abr, Mai-Jun-Jul e Ago-Set-Out. As barras representam a frequência de ocorrência de diferentes faixas de velocidade.

A Figura 22 compara a velocidade média das rajadas com a normal climatológica (1991–2020). A série recente apresentou valores consistentemente inferiores à média histórica, com diferenças mais acentuadas entre março e maio — período em que as rajadas ficaram abaixo de 2,0 m/s, frente a médias históricas entre 3,5 e 3,8 m/s. Em junho, observou-se leve recuperação, embora os valores ainda permanecessem até 2,0 m/s abaixo da climatologia.

Na normal climatológica, os meses de setembro e outubro registram as rajadas mais intensas do ano 5,5 m/s. Na série recente, as rajadas também aumentam nesse período, mas permanecem mais fracas 3,5 m/s. O gráfico mostra um declínio das rajadas a partir de novembro, voltando a valores mais baixos 2,8 m/s em dezembro, contrastando com a normal climatológica 5,2 m/s.

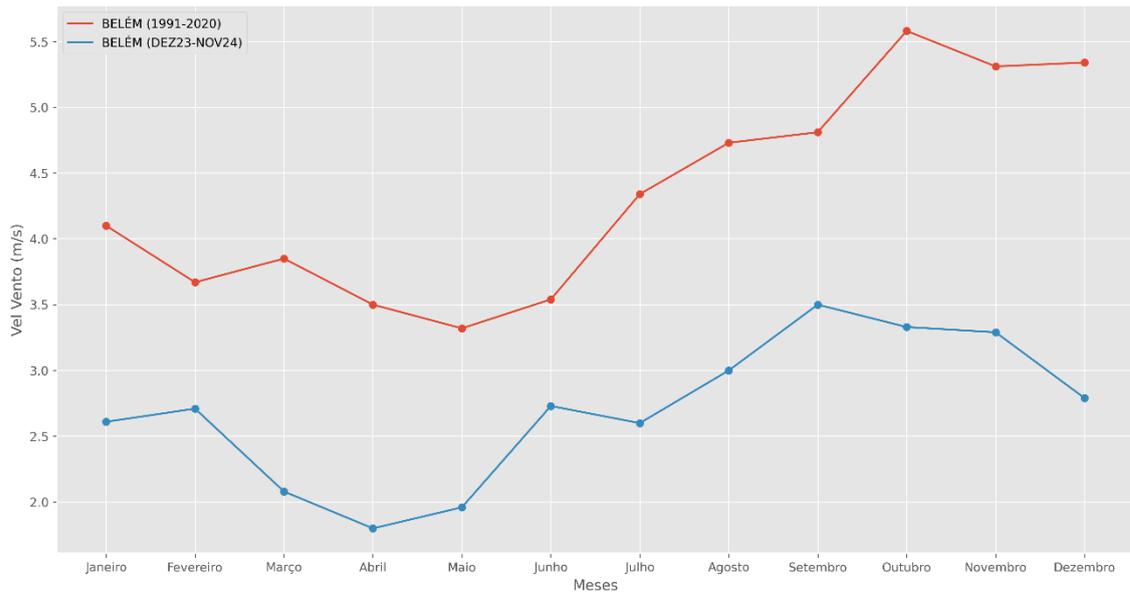


Figura 22 - Comparação mensal da velocidade de rajada do vento (em m/s) entre a série histórica (linha vermelha) e a série recente (linha azul) em Belém. As linhas representam os valores médios para cada mês, destacando anomalias da série recente em relação à climatologia. Padrões sazonais e desvios significativos são evidenciados.

A correlação e a regressão linear entre os dois parâmetros (Figura 23) gerou o seguinte valor da equação –  $y = 0.54x + 0.37$  e isso indica uma relação positiva entre as variáveis: para cada aumento de 1 m/s na velocidade da série recente, espera-se um aumento de 1,15 m/s na velocidade da série histórica. O coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,62$ ) sugere que 62% da variação das rajadas recentes pode ser explicada pela climatologia. A correlação de Pearson confirma essa associação como moderadamente forte e positiva.

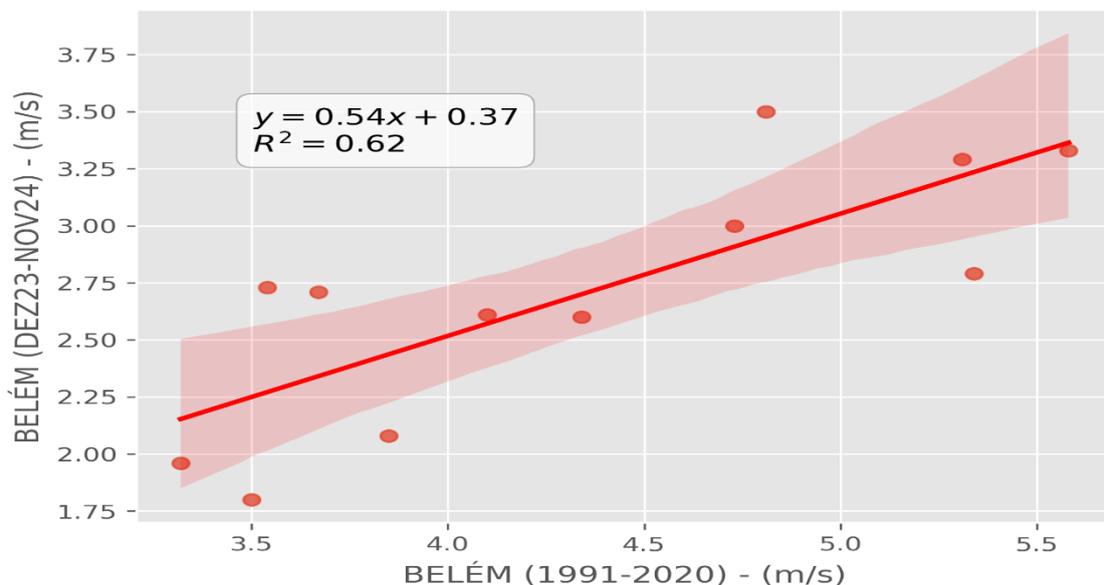


Figura 23 – Correlação e regressão linear entre a velocidade média do vento (m/s) de uma série recente (dezembro/2023 a novembro/2024) e a normal climatológica em Belém. A linha de tendência (vermelha) segue a equação indicando uma forte relação positiva. Os pontos representam os pares de dados (série recente vs. climatologia), e a dispersão evidencia a consistência do ajuste.

Ao longo do período analisado, os dados meteorológicos revelaram padrões

significativos de variação sazonal e interanual. A temperatura média do ar apresentou tendência de aumento gradual, principalmente nos meses mais quentes, evidenciando um possível sinal de aquecimento local. A umidade relativa do ar, por outro lado, manteve-se elevada na maior parte do período, o que é característico da região amazônica, mas com uma leve redução nos meses de estiagem.

Alves (2019) ressalta que a variabilidade da temperatura do ar é um indicador crucial na percepção das mudanças climáticas. Nesse contexto, a temperatura média do ar observada foi de  $27,75 \pm 2,61$  °C, valor compatível com os resultados encontrados por Oliveira *et al.* (2020); Santos *et al.* (2021) e Pará (2021). Em função da proximidade da linha equatorial as temperaturas médias também têm pouca variação entre os meses e a amplitude térmica da região se dá de forma sutil. Contudo, nota-se uma tendência de aumento desse parâmetro quando comparado a estudos anteriores, como os de Souza *et al.* (2004) e Santos *et al.* (2015), o que reforça evidências de aquecimento gradual ao longo dos anos.

De acordo com Fialho *et al.* (2021), o processo de urbanização exerce impactos significativos sobre o clima local, principalmente por elevar as temperaturas do ar e intensificar o desconforto térmico, o que contribui para a redução da qualidade de vida nas áreas urbanas. Silva Romero (2020) destaca que o crescimento urbano, aliado ao aumento populacional, introduz novos elementos físicos e químicos na atmosfera, modificando as condições naturais originais e dando origem ao chamado clima urbano.

Apesar das limitações associadas às medições do pluviômetro, foi possível estimar um total acumulado de precipitação de 1.873,2 mm no período de 12 meses. Esse valor ficou significativamente abaixo do registrado pela estação automática do INMET (A201), que apresentou um total de 2.998,6 mm, resultando em uma diferença de 1.125,4 mm. Segundo Rao & Hada (1990) e Reboita *et al.* (2010), a região apresenta o máximos de precipitação no primeiro semestre do ano, sendo a ZCIT o sistema meteorológico de grande escala mais importante para a precipitação da região, então como esse período de registro foi afetado, justificar a discrepância observada entre os dados das duas estações.

Embora o microclima urbano de Belém, especialmente em função da formação de ilhas de calor, contribua para variações locais nos padrões meteorológicos, a distância aproximada de 3 km entre a estação utilizada neste estudo e a estação do INMET permite uma comparação razoável entre os dados. No entanto, é importante considerar que essa proximidade não elimina completamente as influências de fatores microclimáticos, os quais podem acentuar as diferenças nas medições, sobretudo em áreas com distintas coberturas de solo e uso do território.

O mês de julho apresentou um comportamento atípico na região, registrando apenas 15% da precipitação esperada, segundo dados da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (2024). De acordo com o órgão, esse foi o mês com o maior número de dias consecutivos sem ocorrência de precipitação. Tal anomalia está associada a fatores climatológicos, com destaque para a influência do fenômeno ENOS (El Niño–Oscilação Sul). O período analisado corresponde à fase de transição do El Niño para o La Niña, o que favoreceu a atuação de um bloqueio atmosférico. Essa redução significativa das chuvas pode ser um reflexo da intensidade do El Niño nos meses anteriores, como indicado na tabela a seguir, com base nos dados do NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Tabela 4 - Tabela trimestral do Índice Oceânico Niño (ONI) de 2020 a 2024, conforme dados do NOAA. Valores representam anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico Tropical

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	1.3	1.6	1.8	1.9	2.0
2024	1.8	1.5	1.1	0.7	0.4	0.2	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5

A dinâmica dos ventos predominantes na região, em termos de velocidade e direção, é fortemente influenciada por fatores como cobertura do solo, uso da terra e características topográficas locais. De acordo com El-Robrini *et al.* (2006), os ventos na faixa costeira da Amazônia, situada próxima à linha do Equador, estão relacionados à atuação dos ventos alísios. Esse padrão é claramente observado no município de Belém, onde a direção predominante dos ventos ocorre a partir do norte-nordeste durante a maior parte do ano (Germano *et al.* 2017).

A análise dos dados de intensidade dos ventos revela que os valores mais elevados tendem a ocorrer com maior frequência durante os meses de menor precipitação ou nos períodos em que se registram temperaturas médias mais elevadas. Segundo Pereira *et al.* (2012), esse comportamento está associado ao maior aquecimento diferencial da superfície terrestre. Conforme explica Ribeiro (2001), o aumento da temperatura intensifica o gradiente de pressão atmosférica devido ao maior contraste térmico entre o oceano e o continente. Esse diferencial promove uma maior movimentação das massas de ar, resultando em ventos mais intensos.

## CONCLUSÃO

A análise dos dados meteorológicos ao longo do período estudado evidenciou importantes tendências e variações nos parâmetros climáticos da Região Metropolitana de Belém. Os principais resultados apontam para um aumento gradual da temperatura média do

ar, irregularidades na distribuição das chuvas e enfraquecimento da intensidade dos ventos — sinais consistentes de alterações climáticas em escala local.

A comparação com a normal climatológica (1991–2020) reforçou a presença de anomalias significativas, com destaque para o aumento das temperaturas e a redução das precipitações e rajadas de vento. Tais mudanças podem estar associadas a fatores globais, como o fenômeno ENOS (El Niño–Oscilação Sul), e a processos locais, como o avanço da urbanização e o desmatamento.

A discrepância observada nos dados de precipitação, em especial nos meses iniciais da série, deve-se parcialmente a falhas no equipamento (pluviômetro), como a obstrução por ninhos de aves e a presença de marimbondos. Ainda assim, os valores analisados mostram uma tendência clara de redução da pluviosidade em relação ao esperado para a região.

A dinâmica dos ventos também refletiu padrões alterados: a predominância de ventos fracos e a redução nas rajadas durante o ano podem ter implicações na dispersão de poluentes, na sensação térmica e na circulação atmosférica local. A forte correlação observada entre as séries recentes e a climatologia, especialmente para temperatura e vento, sugere que as alterações detectadas têm fundamentos estatísticos robustos.

Os resultados reforçam a importância do monitoramento climático contínuo em áreas urbanas da Amazônia. O Parque Estadual do Utinga, além de sua função ecológica e hídrica, mostra-se como um espaço estratégico para a geração de dados científicos que subsidiam políticas públicas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

## REFERÊNCIAS

Alves E. D. L. 2019. Análise das influências geourbanas no clima urbano da cidade de Iporá-Goias. *Boletim de Geografia*, **37** (2): 267-268.

Borges L. S. *et al.* 2023. Construção de um novo perfil de radiação solar e temperatura do ar a partir de padrões climáticos conhecidos para a cidade de Belém-PA. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, **9** (2): e15352-01. DOI: 10.18540/jcecv19iss2pp15352-01e.

Borma L. D. S. *et al.* 2013. Impactos dos eventos extremos de seca e cheia sobre os recursos hídricos amazônicos e ações da defesa civil. *Secas na Amazônia: causas e consequências*. São Paulo, Oficina de Textos, p. 305-337.

Brasil N. M. Q. X. *et al.* 2011. Análise multitemporal da cobertura do solo do Parque Estadual do Utinga, Belém, Pará. *Brazilian Journal of Development*, **7**(4): p. 36109-36118. Disponível em: DOI: 10.34117/bjdv7n4-193.

Clarke B. *et al.* 2022. Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective. *Environmental Research: Climate*, **1**(1): e 012001.

- Coelho C. A. S. 2001. *Anomalias de precipitação sobre a América do Sul e suas relações com a temperatura da superfície do mar do Pacífico e Atlântico durante eventos extremos de El Niño: Oscilação Sul*. MS Dissertation, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 144p.
- El-Robrini, M. *et al.* 2006. Erosão e progradação do litoral brasileiro. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. p. 41-87. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa\\_sigercom/\\_arquivos/pa\\_erosao.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_arquivos/pa_erosao.pdf). Acesso em: 30 jun. 2023.
- Estrada F. P. *et al.* 2023. Anthropogenic influence on extremes and risk hotspots. *Scientific Reports*, **13** (1): e 35.
- Feel M. C. *et al.* 2007. Updated world map of the Köppen Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, **11**(5): p. 1633-1644.
- Fenzl N. *et al.* 2010. *A sustentabilidade do sistema de abastecimento de água: da captação ao consumo da água em Belém*. Belém, NUMA/ITEC/UFPA.
- Fialho E. S. *et al.* 2021. Análise do (des) conforto térmico da cidade de Viçosa (MG) no ano de 2014. *Geografia Ensino & Pesquisa*, **25**, e23, Disponível em: <https://doi.org/105902/14146509446846>. Acesso em: 8 jun. 2022.
- Germano M. F. *et al.* 2017. Analysis of the breeze circulations in Eastern Amazon: an observational study. *Atmospheric Science Letters*, **18**, p. 67-75. doi: 10.1002/asl.726.
- Lopes M. N. G. *et al.* 2013. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. *Revista Brasileira de Climatologia*, **12**, p. 84-102.
- Machado L. A. & Assis W. L. 2018. Comparação entre métodos de preenchimento de falhas em séries de dados meteorológicos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas (MG). *Revista Geografias*, **14**(1): p. 73-90.
- Menezes L. B. C. *et al.* 2013. Parques urbanos de Belém (PA): situação atual e problemáticas socio-ambientais. *Experiências Empíricas: Projeto Ipiranga-NUP*, **1**(1): p. 53-65.
- Oliveira, J. V. de *et al.* 2020. Urban climate and environmental perception about climate change in Belém, Pará, Brazil. *Urban Climate*, **31**, e100579.
- Painel Intergovernamental Sobre Mudança do Clima-IPCC. 2023. *Mudança do clima 2023: relatório síntese*. Genebra, Suíça, IPCC. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 2 nov. 2024.
- Pará. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade. 2021. *Boletim informativo: zoneamento agroecológico do Estado do Pará – cultura da mandioca*. Belém, SEMAS, out. 8 p 21.
- Pereira L. C. C. *et al.* 2012. Seasonal changes in oceanographic processes at equatorial macrotidal beach in northern Brazil. *Continental Shelf Research*, **43**(1): p. 95–106.
- Rao V. B. & Hada K. 1990. Characteristics of rainfall over Brazil: annual variations and connections with the Southern Oscillation. *Theoretical and Applied Climatology*, **42**, p. 81-91.

- Reboita M. S. *et al.* 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **25**(2): p. 185-204.
- Ribeiro J. B. M. 2001. Micrometeorologia do manguezal e o impacto do desmatamento em Bragança, PA. 2001. Orientador: Arthur Mattos, PhD Theses, Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 146.
- Romero C. W. da S. *et al.* 2020. Relação entre as ilhas de calor e uso e ocupação do solo em centros urbanos de pequeno porte utilizando o sensoriamento remoto. *Geociências*, **39**(1): p. 253-268.
- Santos E. B. *et al.* 2015. Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon. *Atmospheric Science Letters*, **16**, p. 185–192. DOI: 10.1002/asl2.535.
- Santos T. O. dos *et al.* 2021. Caracterização e variabilidade climática baseada em séries de temperatura e precipitação nos municípios de Manaus (AM) e Belém (PA). *ENTRE-LUGAR*, **12**(24): e321-345.
- Silva J. D. A. J. *et al.* 2012. Análise da distribuição espacial do conforto térmico da cidade de Belém, PA no período menos chuvoso. *Revista Brasileira de Geografia Física*. **5**(2): p. 218-232.
- Silva J. A. J. *et al.* 2011. Estudo do conforto térmico e o fenômeno da ilha de calor na cidade de Belém-PA durante o ano de 2010. In: *IV Simpósio Internacional de Climatologia*, João Pessoa, ANAIS-IV SIC.
- Sodré S. S. V. Hidroquímica dos lagos Bolonha e Água Preta, mananciais de Belém-Pará. 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Belém, 2007.
- Souza C. B. G. 2020. Conflitos territoriais na gestão de parques urbanos na Amazônia: o caso do Parque Estadual do Utinga–Belém/PA. *Brazilian Journal of Development*, **6**(1): e1377-1394.
- Souza E. B. *et al.* 2004. The regional precipitation over the eastern Amazon /Northeast Brazil modulated by tropical Pacific and Atlantic Sst anomalies on weekly timescale. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **19**, p. 113–122.
- Velloso L. P. L. *et al.* 2024. Utinga State Park: producing ecosystem services and mitigating climate change. *Revista de Gestão Social e Ambiental*. **18**(10): e19.
- Vianna L. F. N. 2017. Bancos de dados meteorológicos: análise dos metadados das Estações Meteorológicas no Estado de Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **32**, p. 53-64.

## 5.2 HIDRODINÂMICA DE UM AMBIENTE LÊNITICO RASO EM UMA REGIÃO METROPOLITANA AMAZÔNICA

### RESUMO

Este estudo analisou a dinâmica hidrodinâmica e térmica do Lago Água Preta, um sistema lântico raso essencial para o abastecimento hídrico da região metropolitana de Belém. Através de campanhas de campo realizadas entre 2023 e 2024, foram coletados dados utilizando correntômetros, ADCP, CTD e sensores de pressão, abrangendo períodos sazonais distintos. Os resultados revelaram um sistema complexo, onde processos naturais e antrópicos interagem de forma dinâmica. A circulação da água mostrou-se influenciada principalmente por dois fatores: o vento, que gera correntes superficiais com velocidades de até 6,15 cm/s, e o bombeamento de água do rio Guamá, responsável por fluxos mais intensos (até 20,47 cm/s) nas áreas próximas à adutora. A análise de cross wavelet demonstrou forte correlação entre vento e correntes superficiais, com resposta imediata nas escalas de 2-6 horas. Já nas camadas mais profundas, observou-se um padrão de fluxo reverso, característico de sistemas rasos sujeitos a múltiplas forçantes. A temperatura da água apresentou variação sazonal moderada (26-36°C), com estratificação diurna fraca (diferenças de até 1°C) e homogeneização noturna. O nível do lago oscilou em até 3,5 cm, refletindo tanto a operação das bombas quanto o regime pluviométrico regional. Esses padrões hidrodinâmicos e térmicos influenciam diretamente a distribuição de sedimentos e nutrientes, criando zonas distintas no lago: áreas mais turbulentas próximas às bombas e regiões mais estáveis em locais distantes. Os resultados destacam a importância de uma gestão integrada que considere tanto os processos naturais quanto os impactos das atividades humanas. O estudo sugere que o monitoramento contínuo e a otimização das operações de bombeamento podem contribuir para a conservação deste importante manancial urbano, servindo como modelo para outros sistemas lânticos em regiões tropicais sujeitas a pressões antrópicas crescentes.

**Palavras-chave:** hidrodinâmica, lago urbano, qualidade da água, gestão de recursos hídricos, Amazônia.

### INTRODUÇÃO

Os ecossistemas aquáticos têm sido cada vez mais afetados por atividades humanas que comprometem sua integridade ecológica. Em escala global, fatores como a urbanização acelerada, a poluição industrial e o desmatamento alteram significativamente os padrões hidrodinâmicos dos corpos d'água, promovendo desequilíbrios nos ecossistemas lânticos

(Macedo *et al.* 2024). A remoção da vegetação ripária, o lançamento de efluentes e a modificação do regime hidrológico são alguns dos principais agentes da degradação, resultando na redução da biodiversidade aquática e na perda de serviços ecossistêmicos essenciais, como a regulação climática e a qualidade da água (Rebouças *et al.* 2006; Peixoto *et al.* 2022).

A eutrofização de lagos tem se tornado uma preocupação crescente, especialmente na região Amazônica, onde o avanço desordenado das cidades e a intensificação das atividades humanas afetam diretamente os corpos hídricos (Moore *et al.* 2003, Cruz *et al.* 2015, Weber *et al.* 2020, Pu *et al.* 2021). O lançamento excessivo de nutrientes, principalmente provenientes de esgoto doméstico e atividades agropecuárias, acelera o processo de crescimento de algas e cianobactérias, reduzindo os níveis de oxigênio dissolvido e comprometendo a qualidade da água (Vasconcelos 2011). Esse processo afeta não apenas a fauna aquática e o abastecimento público, como também favorece a presença de espécies invasoras e a perda da diversidade biológica.

A hidrodinâmica de ambientes lênticos exerce papel fundamental na regulação de processos ecológicos e físico-químicos. A circulação da água influencia a distribuição de oxigênio e nutrientes, afeta a sedimentação de partículas e interfere na dispersão de poluentes e organismos aquáticos (Tundisi 2001). Compreender esses processos é essencial para a gestão e conservação de ecossistemas aquáticos, auxiliando na implementação de medidas de controle de impactos ambientais e no manejo sustentável dos recursos hídricos.

O Parque Estadual do Utinga Camilo Vianna (PEUt), localizado na região metropolitana de Belém (RMB), representa um exemplo concreto dos desafios enfrentados pelos ecossistemas lênticos em áreas urbanas. O parque abriga os lagos Bolonha e Água Preta, reservatórios essenciais para o abastecimento hídrico da capital paraense e para a manutenção da biodiversidade. Esses sistemas, no entanto, vêm sofrendo pressões crescentes devido à urbanização no entorno, ao lançamento irregular de efluentes e às modificações na dinâmica hidrológica provocadas por ações antrópicas (Lima & Dias 2025).

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo analisar a hidrodinâmica de um ambiente lântico raso, por meio de medições *in situ*, com o uso de correntômetro eletromagnético, perfilador acústico de corrente (ADCP), temperatura da água (CTD e Sonda Multiparâmetros) e do nível da água com sensor de pressão. Os resultados obtidos contribuirão para uma melhor compreensão das dinâmicas físico-químicas desses sistemas e embasar a implementação de medidas de gestão e conservação dos recursos hídricos na região.

## MATERIAIS E METODOS

### ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde ao lago Água Preta, localizado no interior do Parque Estadual do Utinga Camilo Vianna (PEUt), na Região Metropolitana de Belém, Pará (Figura 1). Este lago integra o sistema de mananciais responsável pelo abastecimento de água da capital paraense, juntamente com o lago Bolonha.

O lago tem gênese antrópica e compõem os mananciais responsáveis pelo abastecimento de Belém são estruturas artificiais formadas a partir da construção de barragens na década de 1930. O primeiro represamento ocorreu no rio Catu, envolvendo também os igarapés Buiussuquara e Utinga. Posteriormente, foi represado o rio Água Preta. Com o objetivo de estabilizar o nível hídrico entre os dois corpos d'água, foi implantado um canal de interligação entre os lagos.

Apesar de receber contribuições diretas da drenagem das bacias hidrográficas locais, que somam uma área de aproximadamente 1.825,20 hectares, o principal mecanismo de manutenção do volume hídrico é a transposição de águas do rio Guamá. Esse fluxo é conduzido por uma adutora até o lago Água Preta e controlado pela Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA), com vazão variando entre 3 e 6 m<sup>3</sup>/s, sendo as maiores descargas registradas nos períodos menos chuvosos, a fim de compensar perdas por evaporação e captação (Silva 2003, Brito 2009, Santos 2015).

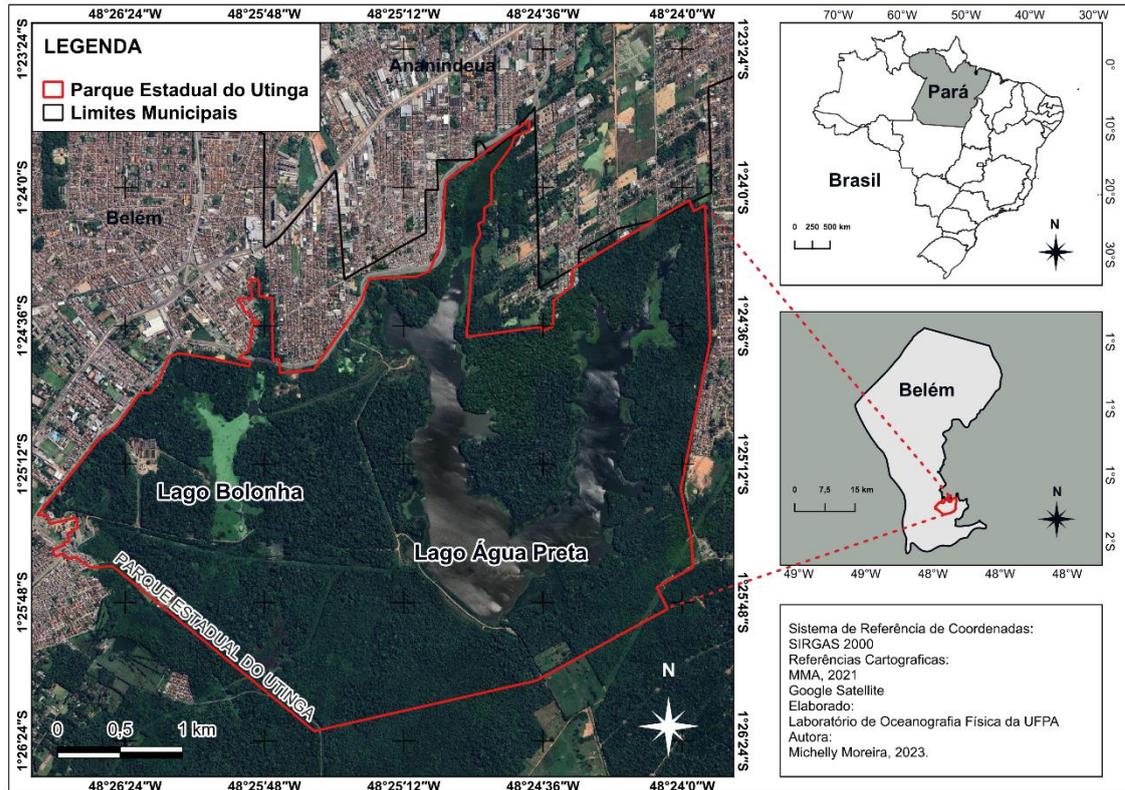


Figura 1 – A localização do Parque Estadual do Utinga (PEUt), situado na Região Metropolitana de Belém, estado do Pará, Brasil. A área do parque está delimitada em linha vermelha, evidenciando seus limites oficiais. Também são apresentados os limites municipais de Belém e Ananindeua, representados em linha preta.

O lago Água Preta possui uma área total de aproximadamente 3.116.860 m<sup>2</sup>, dos quais grande parte encontra-se inseridos nas terras do Utinga, pertencentes à Companhia de Saneamento do Pará (COSANPA) e à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e o manancial possui um volume de aproximadamente 9.905.000 m<sup>3</sup> (CENSA/COSANPA, 1983).

Estudos realizados pelo Laboratório de Pesquisa em Monitoramento Ambiental Marinho (LAPMAR, 2024) indicam uma profundidade média de 2,63 metros, com valores variando entre 0,95 metro (mínimo) e 3,65 metros (máximo) (Figura 2). A análise batimétrica, conduzida em 2024, revelou uma morfometria complexa, com zonas rasas concentradas nas margens e nas porções norte e nordeste do lago, destacadas por tonalidades amarelas e verdes no mapa. As maiores profundidades, representadas pelas cores azul-escuras e púrpuras, ocorrem na porção sudoeste, onde se concentram as principais depressões do leito. O gradiente batimétrico revela uma topografia subaquática irregular, com variações suaves de profundidade ao longo do eixo longitudinal do lago.

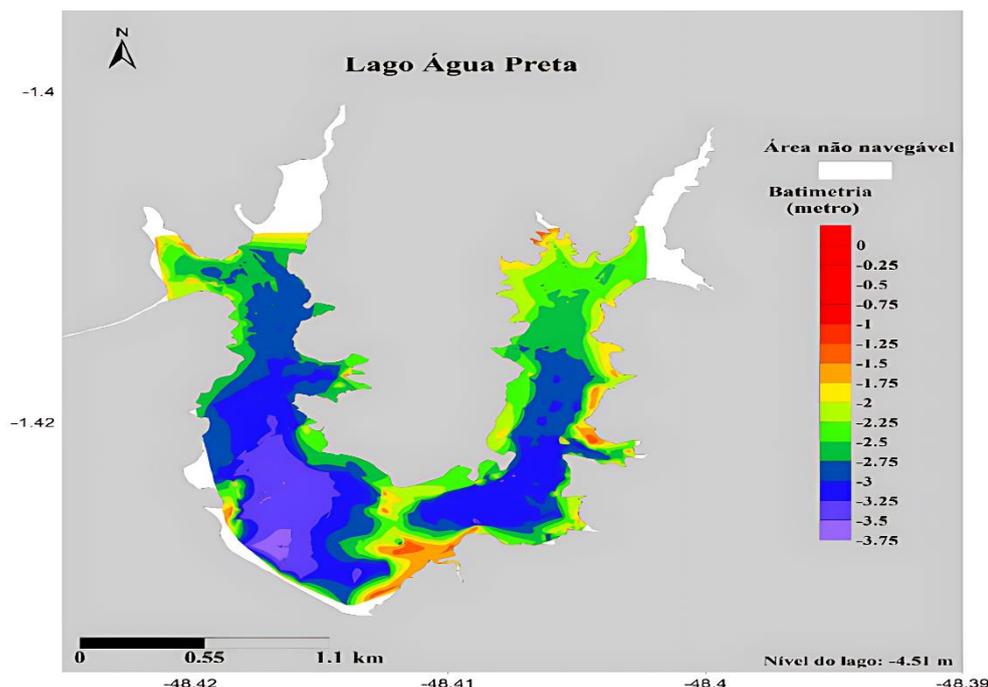


Figura 2 – Mapa batimétrico do lago Água Preta realizado durante o período mais chuvoso da região no ano de 2024. **Fonte:** LAPMAR 2024.

## ASPECTO GEOMORFOLÓGICO

O PEUt está inserido em uma área de transição entre as unidades geomorfológicas da Planície Costeira Amazônica e os terraços fluviais da Bacia Amazônica. A topografia da área é predominantemente plana a suavemente ondulada, composta por depósitos quaternários recentes associados a processos fluviais e lacustres (Oliveira *et al.* 2013).

Segundo Vieira & Santos (1987), os solos predominantes no parque são os Latossolos Amarelos Álicos, seguidos pelos Podzólicos Hidromórficos Álicos. O Latossolo Amarelo é um solo profundo, fortemente intemperizado e com acidez variando entre moderada e elevada (pH entre aproximadamente 4,1 e 5,3). Apresenta boa drenagem e é derivado de sedimentos argilo-arenosos do Grupo Barreiras. Já os Podzólicos Hidromórficos são solos geralmente profundos, de textura arenosa, elevada acidez (pH entre 4,1 e 5,0), baixa fertilidade natural e apresentam horizontes bem diferenciados. Esses solos desenvolvem-se a partir de sedimentos fluviais e marinhos do Quaternário (Farias *et al.* 1992).

O relevo da região exerce influência direta sobre a hidrografia local, incluindo a formação de corpos d'água como o Lago Água Preta. Esse lago é classificado como um ambiente lântico antrópico, formado pelo represamento de águas pluviais e pela contribuição de pequenos cursos d'água e aquíferos superficiais. Geomorfologicamente, o lago ocupa uma depressão em meio à planície de inundação, o que favorece a retenção de água durante todo o

ano, mesmo nos períodos de estiagem (Semas 2021).

A gênese do lago está relacionada à dinâmica de sedimentação e erosão típica da planície amazônica. A baixa declividade do terreno contribui para o acúmulo de sedimentos finos, como argilas e siltes, que favorecem a formação de solos hidromórficos e a manutenção de áreas alagáveis (Castro & Sousa 2007). Essas características influenciam a estabilidade das margens e a morfometria do lago, que apresenta contornos irregulares e profundidade variável.

Além disso, a geomorfologia do entorno do LAP é fortemente influenciada por processos antrópicos históricos, como o uso da terra para atividades extrativistas e a abertura de trilhas. Tais intervenções alteraram a dinâmica de escoamento superficial e favoreceram processos erosivos em algumas áreas do parque (Santos *et al.* 2015).

## ASPECTO CLIMÁTICO

O Parque Estadual do Utinga está situado na região Norte do Brasil, no município de Belém (PA), sob influência do clima equatorial úmido. Esse tipo climático é caracterizado por altas temperaturas durante todo o ano, elevada umidade relativa do ar e regime pluviométrico com chuvas abundantes e bem distribuídas, embora mais concentradas entre os meses de dezembro e maio (Diniz 1986, Oliveira & Souza 1997, Almeida *et al.* 2012).

As temperaturas médias anuais variam entre 26 e 28 °C, com baixa amplitude térmica tanto diária quanto sazonal. A umidade relativa do ar geralmente ultrapassa os 85%, especialmente no período chuvoso. A precipitação média anual gira em torno de 3.000 mm, sendo março o mês mais chuvoso e setembro o mais seco (Vieira & Santos 1987, Santos 1991, Inmet 2020).

As condições climáticas influenciam diretamente a dinâmica ecológica do parque, favorecendo a manutenção da floresta ombrófila densa e dos corpos hídricos presentes na região, como o lago Água Preta. A disponibilidade constante de água proporcionada pelas chuvas contribui para o equilíbrio hidrológico dos ecossistemas lênticos do parque (Nascimento *et al.* 2014).

Durante o chamado "verão amazônico", que corresponde ao período de estiagem relativa entre julho e novembro, ainda ocorrem precipitações, porém em menor quantidade. Nesse período, observa-se uma ligeira diminuição no nível dos lagos e igarapés, embora o clima úmido e a elevada taxa de evapotranspiração continuem a prevalecer (Semas 2021).

## AMOSTRAGEM

As amostragens de direção e intensidade das correntes no lago Água Preta foram realizadas por meio de dois correntômetros eletromagnéticos INFINITY-EM modelo AEM-USB, programados para adquirir dados em intervalos de 60 segundos. As medições ocorreram em duas campanhas distintas: a primeira entre os dias 21 e 28 de novembro de 2023, marcando o final do período menos chuvoso; e a segunda entre 27 e 29 de agosto de 2024, representando o início de um novo período seco. Complementarmente, foi utilizado um perfilador acústico de corrente (ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler), modelo Sontek Argonaut-XR, com o objetivo de registrar a variação vertical da velocidade das correntes. As coletas com o ADCP também foram realizadas em duas ocasiões: a primeira coincidiu com a campanha de novembro de 2023, enquanto a segunda ocorreu entre 26 de janeiro e 5 de fevereiro de 2024.

Para o monitoramento da oscilação do nível da água, foram empregados dois sensores de pressão Solinst Levellogger 5 Junior, instalados em extremidades opostas do lago, realizando registros em intervalos de 10 minutos. As medições de temperatura da água foram obtidas a partir de um CTD (Conductivity, Temperature and Depth), modelo SBE 19plus V2 SeaCAT, operando com taxa amostral de 4 Hz, por meio de perfis verticais contínuos em 19 pontos distribuídos ao longo da área de estudo (Figura 3). Além disso, uma sonda multiparâmetros da Aquaread foi instalada em um ponto fixo nas margens do lago (latitude -1.426077, longitude -48.418844), coletando dados a cada 60 minutos durante um período contínuo de 12 meses, entre dezembro de 2023 e novembro de 2024.

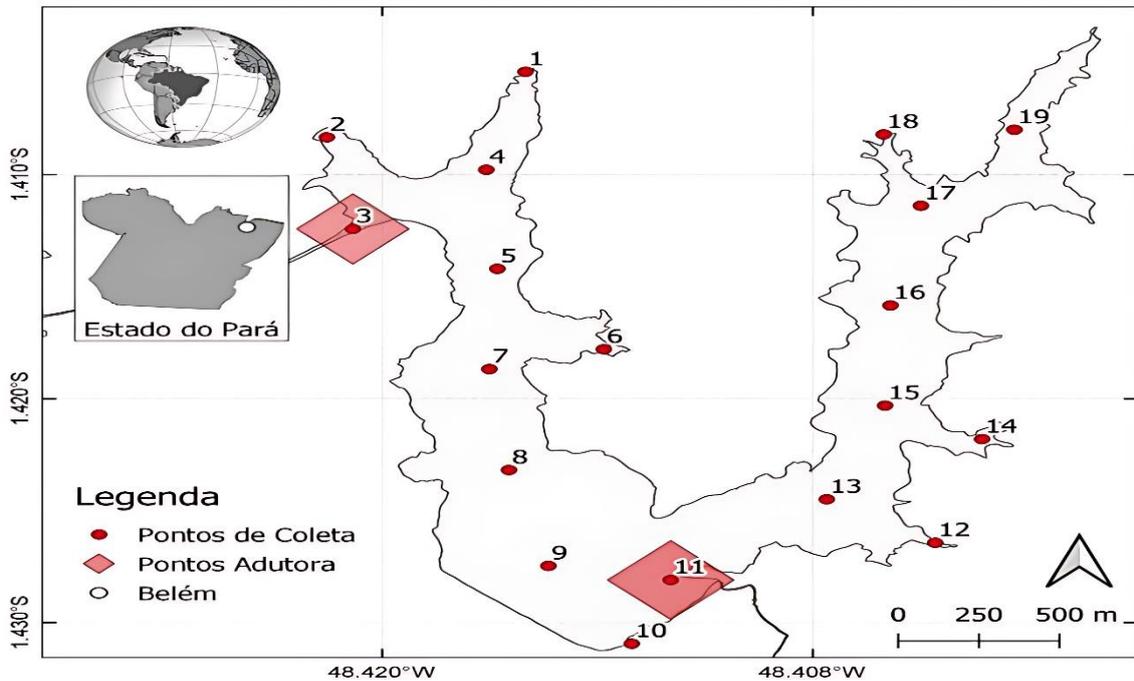


Figura 3 – Mapa da distribuição espacial de 20 pontos de coleta de dados do (CTD - Conductivity, Temperature, Depth) realizados no Lago Água Preta, localizado no Estado do Pará, Brasil.

Durante a primeira campanha em novembro de 2023, um dos correntômetros foi fundeado próximo à entrada de abastecimento de água do rio Guamá para o lago Água Preta, no ponto C01 (latitude -1.4280, longitude -48.4116), enquanto o segundo foi instalado na saída de água do lago Água Preta para o lago Bolonha, no ponto C02 (latitude -1.4125, longitude -48.4210). Para essa mesma campanha, representativa do final do período menos chuvoso, o ADCP foi posicionado sobre uma estrutura de base e fundeado na região central do lago, no ponto (-1.4264, -48.4163).

Durante a campanha correspondente ao início do período chuvoso, realizada entre janeiro e fevereiro de 2024, os sensores de pressão foram instalados em extremidades opostas do lago: o sensor M01 foi posicionado no ponto (-1.4105, -48.4047), e o sensor M02 no ponto (-1.4124, -48.4214). O ADCP foi novamente instalado na região central do lago, no mesmo ponto da campanha anterior. A localização espacial dos pontos de coleta pode ser visualizada na Figura 4.

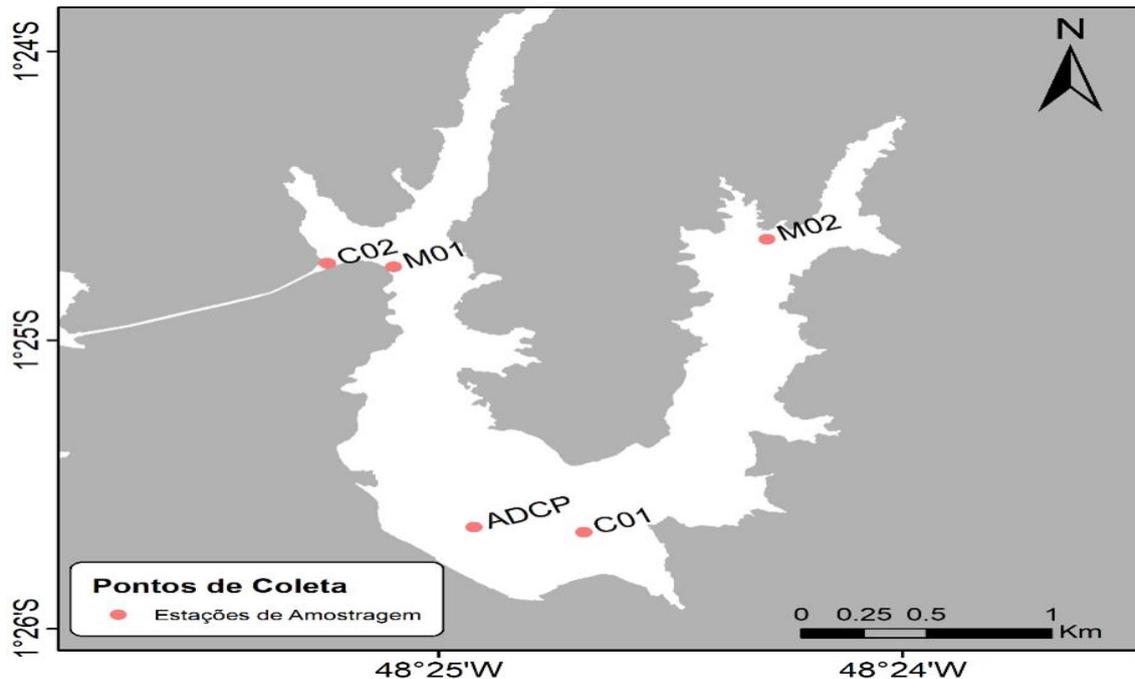


Figura 4 - O mapa apresenta a localização da primeira coleta dos equipamentos de monitoramento hidrológico instalados no Lago Água Preta, Estado do Pará, Brasil. **Símbolos e Elementos do Mapa:** C01 e C02: Correntômetros para medição de velocidade e direção da corrente. M01 e M02: Sensores de nível (pressão) para monitoramento da variação da água. ADCP: Perfilador acústico de correntes (Acoustic Doppler Current Profiler), utilizado para medições verticais de corrente.

Para a segunda campanha de monitoramento com os correntômetros, realizada no período de 27 a 29 de agosto de 2024, os instrumentos foram fundeados nos pontos P8 (latitude -1.42386, longitude -48.41625) e P13 (latitude -1.42555, longitude -48.40882), localizados em regiões estratégicas do lago Água Preta. A escolha desses pontos teve como objetivo abranger tanto a área influenciada pela circulação gerada pela bomba quanto uma zona com menor interferência desse sistema, possibilitando uma compreensão mais abrangente e precisa dos padrões hidrodinâmicos no lago. Os dispositivos foram posicionados de forma a minimizar interferências e garantir medições contínuas e representativas da velocidade e direção das correntes. A distribuição espacial dos pontos de fundeio pode ser visualizada na Figura 5.

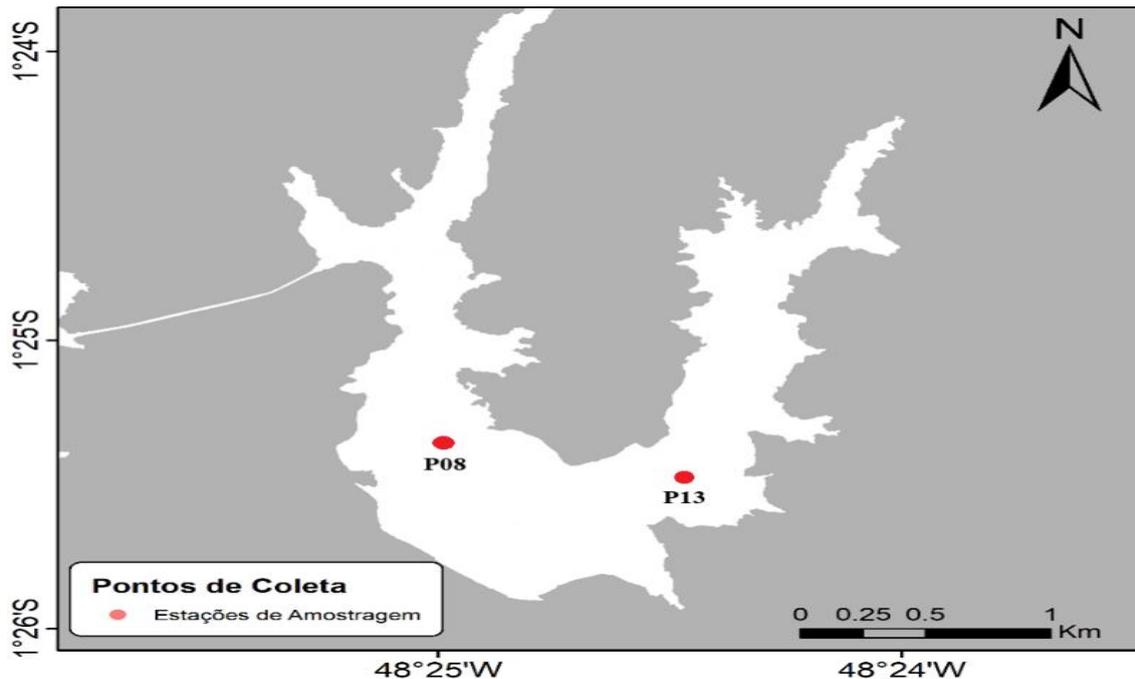


Figura 5 – Localização dos pontos de coleta da segunda campanha de monitoramento hidrodinâmico utilizando correntômetros no Lago Água Preta, Estado do Pará, Brasil.

## PROCESSAMENTO DE DADOS

### USO DE CORRENTÔMETRO PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DA CORRENTE

Os dados brutos de velocidade e direção das correntes, foram inicialmente extraídos utilizando o software fornecido pelo fabricante do correntômetro. A programação dos instrumentos foi configurada para registrar medições a cada 60 segundos, gerando séries temporais de alta resolução. Após a exportação dos dados em formato compatível (CSV), os dados foram processados e analisados em ambiente Excel e MATLAB.

O tratamento incluiu a remoção de valores anômalos decorrentes de ruídos eletrônicos, instabilidades momentâneas ou falhas de leitura. Esses pontos foram identificados por inspeção visual das séries temporais e por meio da aplicação de critérios estatísticos simples, como boxplot. Leituras fora do intervalo físico esperado para o ambiente monitorado foram consideradas inválidas e descartadas. As direções das correntes foram normalizadas para o formato azimutal ( $0^{\circ}$ – $360^{\circ}$ ), sendo posteriormente classificadas por quadrantes (N, NE, E, etc.) para facilitar a interpretação dos padrões predominantes. A análise temporal dos dados permitiu identificar oscilações horárias, variações entre dias e comportamentos distintos entre as campanhas realizadas.

## USO DE ADCP PARA MEDIÇÕES DETALHADAS DA VELOCIDADE DA CORRENTE

Durante o pré-processamento, foram aplicados filtros de qualidade para remoção de ruídos e leituras espúrias, com base em critérios como intensidade de sinal acústico, correlação e percentual de boa medição em cada célula da coluna d'água. Leituras com baixa confiabilidade (por exemplo, correlação abaixo de 50% ou amplitude acústica anômala) foram descartadas. Também foram removidas as primeiras e últimas células próximas ao transdutor e ao fundo do lago, onde reflexões e interferências são mais prováveis.

As velocidades das correntes foram analisadas por profundidade (perfil vertical) e ao longo do tempo, possibilitando a visualização da estrutura vertical das correntes. Para isso, foram produzidos gráficos de contorno (plots de tempo versus profundidade), utilizando interpolação linear e suavização com filtros do tipo média móvel para realçar as tendências dominantes sem comprometer a integridade dos dados.

## MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA COM CTD

Os dados foram inicialmente processados no software Sea-Bird Seasoft, utilizado para descarregar, converter e realizar o pré-processamento dos arquivos brutos gerados pelo equipamento. Durante esta etapa, foram aplicadas correções de calibração, compensações de tempo de resposta dos sensores e remoção de valores inconsistentes causados por instabilidades na descida ou subida da sonda. Apenas os dados obtidos durante a descida dos perfis foram utilizados, por apresentarem maior estabilidade.

Em seguida, os dados foram suavizados por meio de um filtro de média móvel e organizados em perfis verticais com interpolação a cada 0,1 metro de profundidade. Para possibilitar comparações entre pontos com diferentes profundidades absolutas, os dados também foram convertidos em profundidade normalizada, utilizando a razão entre a profundidade de cada medição e a profundidade máxima registrada naquele perfil. Esse procedimento permitiu a padronização dos dados em escala relativa (0 a 1), facilitando a análise comparativa dos gradientes térmicos e possíveis estratificações ao longo do tempo e do espaço.

A visualização dos perfis verticais foi realizada em ambiente MATLAB, por meio de gráficos bidimensionais (profundidade x temperatura) e diagramas térmicos, permitindo avaliar as variações espaciais e temporais ao longo das campanhas.

## MONITORAMENTO DO NÍVEL DA ÁGUA COM SENSOR DE PRESSÃO

Os dados dos sensores de pressão foram processados por meio do software Levelogger (Solinst). Os sensores possuem offset fixo de 10 metros, e, nesta análise, não foi utilizado sensor

barométrico, pois o objetivo principal era avaliar variações relativas do nível da água, e não cotas absolutas.

Após a extração, os registros foram exportados para planilhas e analisados no Excel e MATLAB. Foram aplicados filtros simples para remoção de picos abruptos ou leituras inconsistentes, geralmente causadas por bolhas de ar, movimentações externas ou falhas momentâneas do sensor. O resultado consistiu em séries temporais suavizadas, representativas das flutuações médias do nível ao longo do período de monitoramento.

#### ANÁLISE CROSS WAVELET

A relação espectro-temporal entre a velocidade do vento e a velocidade da corrente foi analisada por meio da transformada cross wavelet (XWT), aplicada no ambiente MATLAB, utilizando o pacote desenvolvido por Grinsted et al. (2004). Essa técnica permite identificar regiões de alta correlação e coerência espectral entre duas séries temporais, fornecendo informações sobre periodicidades comuns e defasagens ao longo do tempo.

As séries temporais foram previamente normalizadas e sincronizadas para um intervalo temporal uniforme de 60 minutos. Aplicou-se a transformada wavelet contínua (CWT) com a função wavelet de Morlet ( $\omega_0 = 6$ ), amplamente utilizada em estudos ambientais por sua boa resolução no tempo e na frequência. Em seguida, procedeu-se à aplicação da transformada XWT para detectar padrões conjuntos de variabilidade.

Os resultados foram representados em diagramas tempo-período com escala logarítmica. As regiões de alta energia comum foram destacadas por cores quentes, enquanto as setas indicaram a fase relativa entre os sinais:

- Direita: sinais em fase;
- Esquerda: sinais em oposição;
- Para cima: vento antecede corrente;
- Para baixo: corrente antecede vento.

A significância estatística foi avaliada ao nível de 5% com base em ruído vermelho (modelo AR(1)), delimitando as regiões confiáveis dentro do cone de influência. As análises foram realizadas separadamente para os dados dos pontos P08, P13 e da célula 5 do ADCP (mais próxima da superfície), com dados da segunda campanha de medição.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### TEMPERATURA DA ÁGUA - SONDA MULTIPARÂMETROS

Os dados obtidos pela sonda multiparâmetros indicam que a temperatura da água no lago variou entre aproximadamente 26 e 36 °C ao longo do período monitorado (Figura 6). Observa-se uma acentuada oscilação térmica diária nos meses iniciais (dezembro a março), coincidentes com o período chuvoso na região amazônica. Durante essa fase, o lago apresentava níveis d'água abaixo da média, o que comprometeu parcialmente o posicionamento da sonda, deixando-a por vezes exposta ao ar. Além disso, por estar fixada a uma estrutura metálica, houve transmissão de calor por condução, o que influenciou artificialmente os registros, resultando em elevações anômalas nos valores de temperatura.

A partir de abril, com a elevação gradual do nível do lago, notou-se uma atenuação das variações térmicas e uma estabilização dos registros, concentrando-se entre 29 e 31 °C. Essa estabilidade persiste até o final do ano, indicando menor influência de eventos climáticos extremos e maior constância nas condições ambientais da massa d'água.

A tendência linear positiva, com coeficiente angular de aproximadamente 0,0019 °C/dia, sugere um leve aumento da temperatura média ao longo do tempo, totalizando um incremento de cerca de 0,7 °C entre o início e o fim da série. Esse comportamento pode estar associado ao processo de aquecimento gradual do epilímnio, típico em ambientes de águas rasas tropicais sujeitos a radiação solar constante e baixa estratificação térmica.

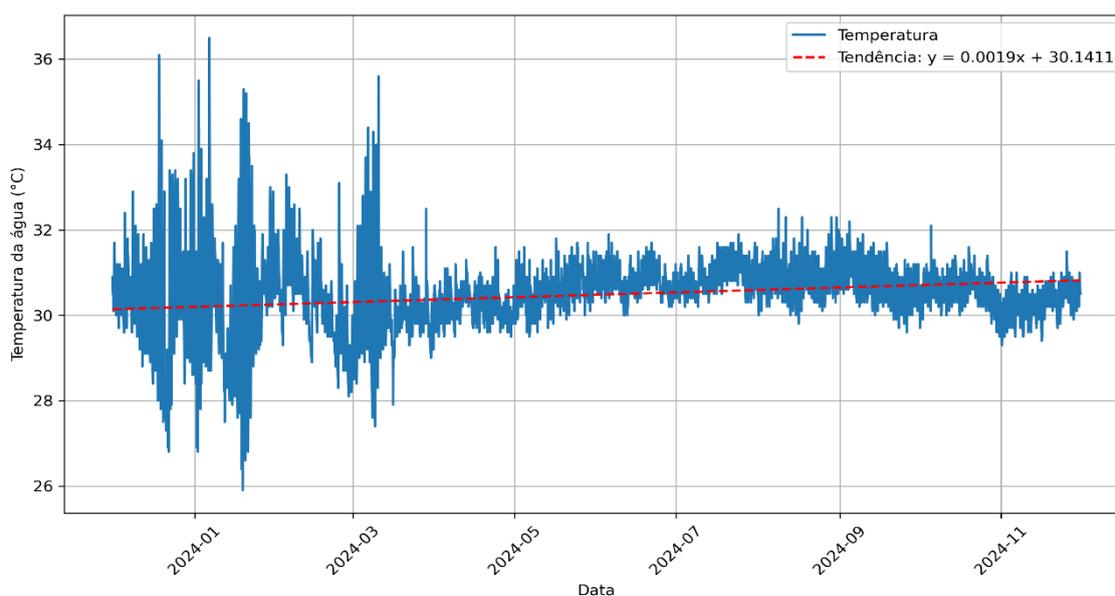


Figura 6 – Variação da temperatura superficial da água no lago Água Preta ao longo de 12 meses, medida por sonda multiparâmetros (aquaread) instalada na margem do lago Água Preta.

Com base nos dados médios mensais (Figura 7), observa-se um comportamento sazonal

característico da região amazônica. Durante o período chuvoso (dezembro a março), as médias térmicas se mantêm relativamente baixas, oscilando entre 30 e 30,3 °C. A partir de abril, ocorre um aquecimento progressivo da massa d'água, com os valores mais elevados registrados entre julho e setembro, quando a temperatura média atinge picos em torno de 30,9 °C. Apesar dessa oscilação ao longo do ano, a amplitude térmica observada foi inferior a 1 °C, evidenciando uma relativa estabilidade térmica anual, típica de ambientes lênticos tropicais influenciados por alta insolação e regime hidrológico constante.

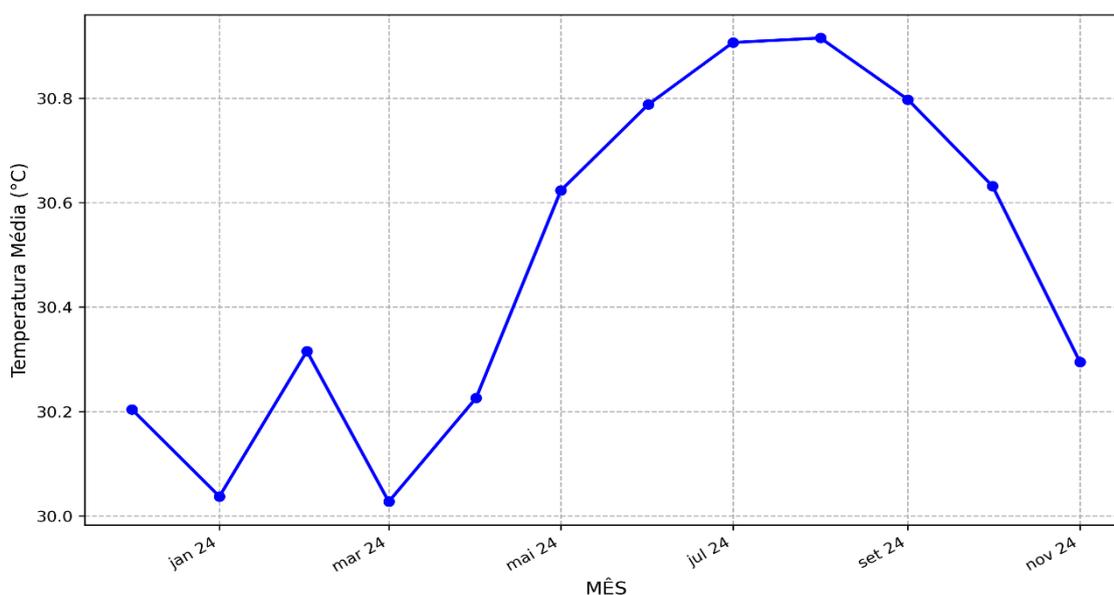


Figura 7 – Variação da temperatura média mensal da água no Lago Água Preta, Belém – PA, registrada por sonda multiparâmetros posicionada na camada superficial (epilímnio), no período de dezembro de 2023 a novembro de 2024.

## CTD

Os dados obtidos com o CTD revelam uma clara variação sazonal na estrutura térmica da coluna d'água (Figura 8). Em março, durante o auge do período chuvoso, a temperatura da água é relativamente mais baixa e homogênea ao longo da coluna, sugerindo intensa mistura vertical e um sistema bem circulado, com fraca ou inexistente estratificação térmica. Padrão semelhante foi observado em dezembro, embora com temperaturas ligeiramente mais elevadas.

Em junho, já no período de transição para a estação seca, nota-se uma leve estratificação térmica, com águas superficiais mais aquecidas e um gradiente de temperatura mais acentuado ao longo da profundidade, especialmente em pontos centrais do lago. Já em setembro, no período menos chuvoso e sob maior incidência solar, o lago apresenta temperaturas mais elevadas em toda a coluna d'água, com valores próximos a 31 °C nas camadas superiores.

Essa dinâmica térmica evidencia o papel central das condições climáticas sazonais na estruturação da coluna d'água, interferindo diretamente nos processos físico-químicos e

biológicos do ecossistema aquático.

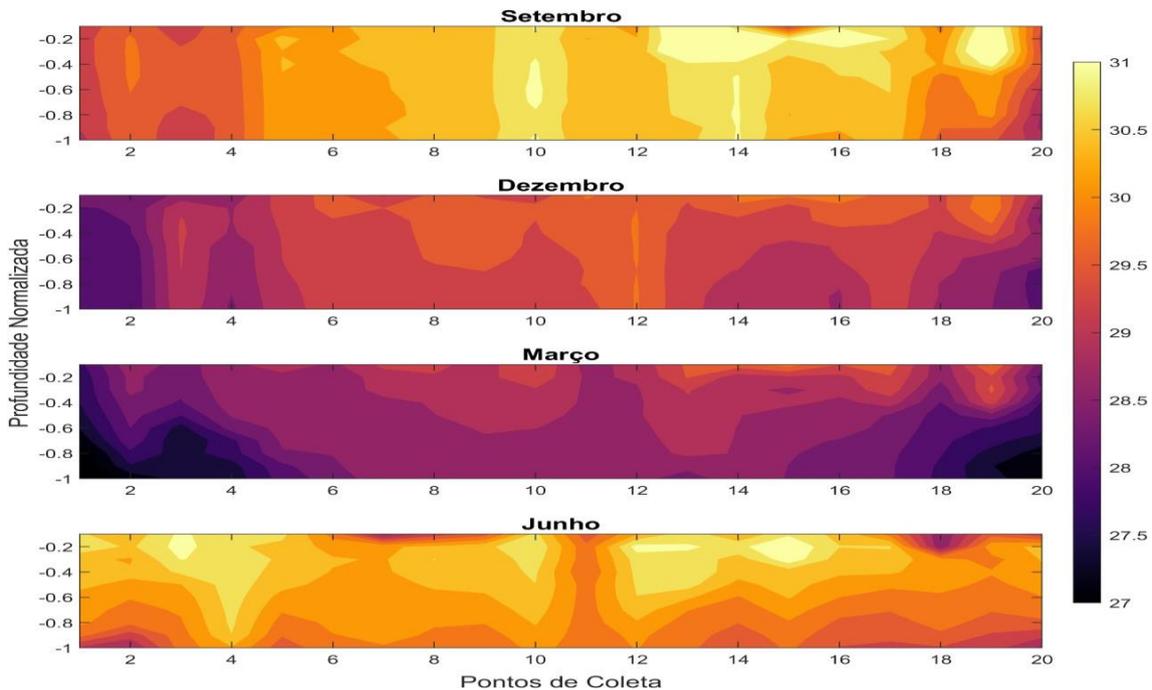


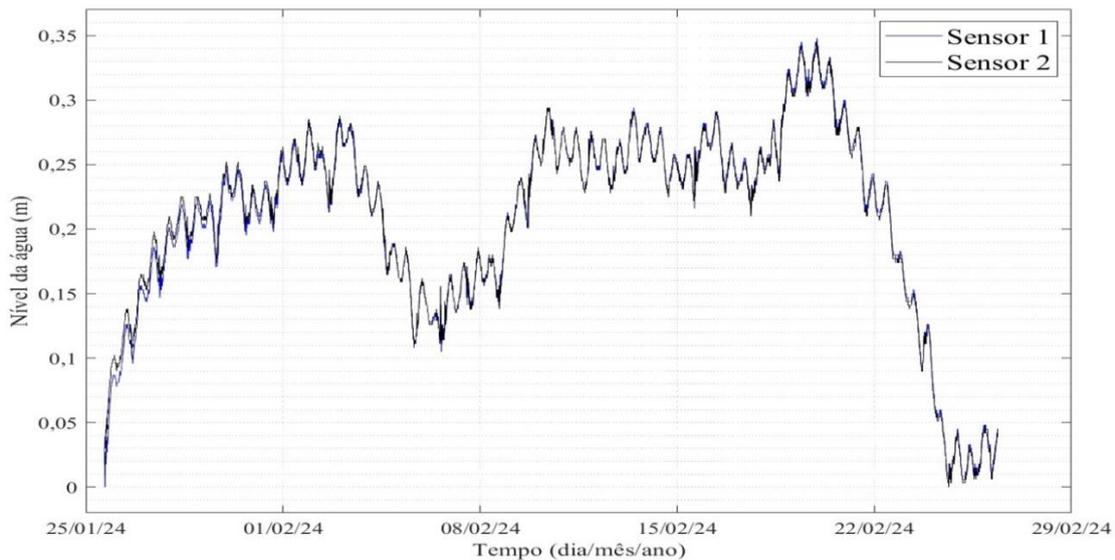
Figura 8 – Perfis verticais de temperatura da água no Lago Água Preta, obtidos por meio de sensor CTD, durante quatro campanhas sazonais realizadas nos meses de setembro/2023, dezembro/2023, março/2024 e junho/2024. A profundidade foi normalizada em relação à coluna d'água, e os dados foram organizados conforme os pontos de coleta ao longo do transecto.

O padrão de estratificação térmica observado no LAP é compatível com o comportamento típico de lagos polimíticos localizados em regiões tropicais e subtropicais, os quais apresentam variações na circulação da coluna d'água ao longo do ano (Tundisi & Tundisi, 2008). Conforme destaca Esteves (2011), mesmo pequenas diferenças de temperatura podem gerar estratificação em ambientes aquáticos, o que justifica a presença de camadas térmicas no lago Água Preta ao longo das campanhas..

#### SENSOR DE PRESSÃO

A análise dos dados obtidos pelos sensores de pressão revelou uma variação máxima de 3,5 cm no nível da água ao longo do período monitorado, com oscilações regulares em escala semanal (Figura 9). Essas flutuações refletem a influência de múltiplas variáveis hidrológicas, especialmente a operação das bombas da adutora e o regime pluviométrico local, que juntos contribuem para o balanço hídrico do lago.

As variações observadas não indicam mudanças abruptas ou descontinuidades significativas no nível do lago, sugerindo um sistema relativamente estável, embora sujeito a intervenções operacionais. A ausência de compensação barométrica nos sensores não comprometeu a análise, uma vez que o objetivo principal era observar a variação relativa do nível, e não a determinação de cotas absolutas.



**Figura 9** – Variação média de dois sensores de pressão instalados em diferente extremidades do lago Água Preta durante o início do período chuvoso.

## CORRENTÔMETRO

Durante a primeira campanha de monitoramento com correntômetros (21 a 28 de novembro de 2023), o ponto C01, localizado nas proximidades da entrada da adutora do rio Guamá, apresentou variações expressivas na velocidade e direção da corrente (Figura 10). Essas oscilações estão diretamente relacionadas ao funcionamento intermitente das bombas da adutora, conforme confirmado pelos registros operacionais da COSANPA.

Com o objetivo de detalhar essas variações, os dados foram segmentados em seis fragmentos (F1 a F6), definidos com base nas mudanças abruptas nos padrões de velocidade e direção da corrente. Para cada fragmento, foram calculadas a velocidade média e a direção preferencial (Tabela 1). A corrente no C1 apresentou velocidades médias variando de 3,21 cm/s (mínima) a 20,47 cm/s (máxima), com direções predominantes entre Sul e Sudoeste, evidenciando o efeito direto da operação da adutora sobre a hidrodinâmica local.

**Tabela 1** – velocidade média e a direção preferencial dos seis fragmentos

<b>Fragmentos</b>	<b>Vel. Média (±DP)</b>	<b>Direção Predominante</b>
<b>F1</b>	20,47cm/s (±10,72)	271° (Oeste)
<b>F2</b>	3,21 cm/s (±0,44)	198° (Sul)
<b>F3</b>	17,94 cm/s (±9,50)	269° (Oeste)
<b>F4</b>	10,61 cm/s (±3,51)	264° (Sudoeste)
<b>F5</b>	3,60 cm/s (±3,32)	213° (Sul)
<b>F6</b>	6,82 cm/s (±3,40)	227° (Sudoeste)

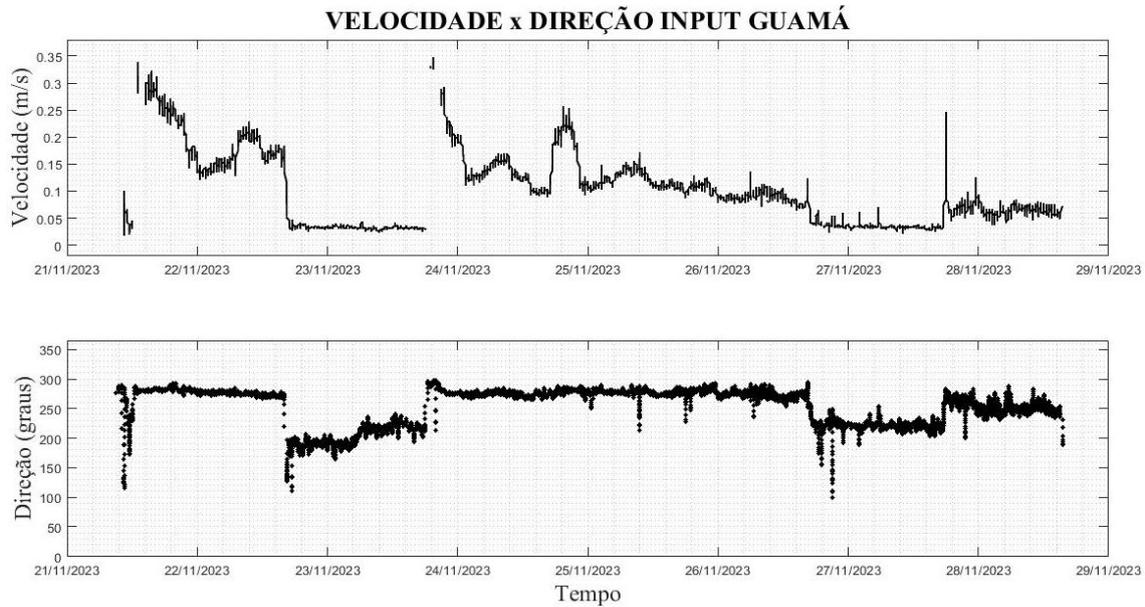


Figura 10 – Variação temporal da velocidade (painel superior) e da direção (painel inferior) da corrente no ponto C01, localizado próximo à entrada de abastecimento de água do rio Guamá para o lago Água Preta, durante o período de 21 a 28 de novembro de 2023.

Em contraste, o ponto C2, localizado na saída do lago Água Preta em direção ao lago Bolonha (Figura 11), exibiu um comportamento mais estável ao longo do mesmo período. As velocidades da corrente permaneceram próximas de zero, variando entre 0 e 0,3 cm/s, com direção preferencial de 255° (Sudoeste). A baixa variação nesse ponto indica que o regime de circulação é menos influenciado por forçantes externas diretas, como a operação das bombas, e reflete um ambiente de menor dinâmica hidrodinâmica.

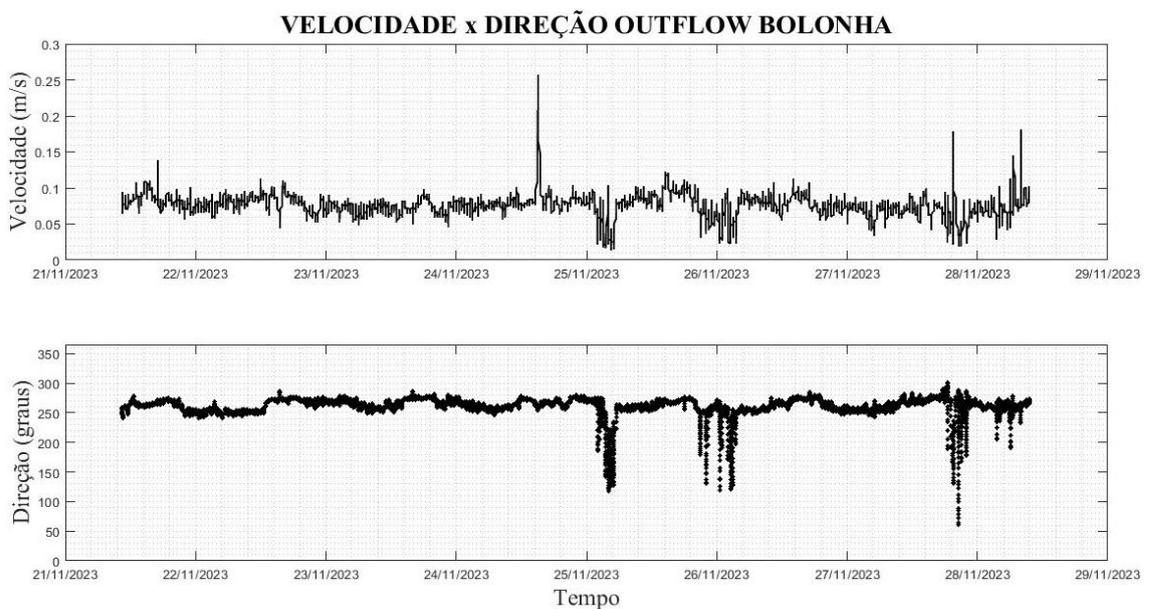


Figura 11 – Variação temporal da velocidade (painel superior) e da direção (painel inferior) da corrente no ponto C02, localizado próximo à conexão de abastecimento de água do Bolonha, durante o período de 21 a 28 de novembro de 2023.

Durante a segunda campanha de monitoramento, realizada entre os dias 27 e 29 de agosto de 2024, foi analisada a variabilidade da direção e da velocidade da corrente em dois pontos distintos do lago Água Preta: P08 e P13 (Figura 12). Os equipamentos foram fundeados às 12h do dia 27/08 e retirados às 12h do dia 29/08, totalizando um período de 48 horas de aquisição contínua de dados. A seleção dos pontos foi feita de forma estratégica, com o objetivo de verificar a influência do input hídrico proveniente do canal de adução do rio Guamá sobre o comportamento da principal ramificação do lago.

#### PONTO P08 (Figuras 12 A, B e E)

Nas componentes Leste (A) e Norte (B) da velocidade da corrente em P08, observa-se um padrão oscilatório leve, com amplitudes predominantemente inferiores a  $\pm 5$  cm/s. A componente Norte apresenta picos mais pronunciados no início da série (27 de agosto), que sugerem episódios pontuais de intensificação da corrente, possivelmente relacionados a variações operacionais da bomba de captação do Guamá. Ao longo do tempo, o sinal tende à estabilização com oscilações de menor magnitude.

A rosa dos vetores de corrente (E) confirma uma predominância da direção de fluxo voltada ao sudoeste (cerca de  $210^\circ$ ), coerente com o posicionamento de P08 próximo à entrada do sistema de abastecimento. A velocidade máxima registrada foi de aproximadamente 6,15 cm/s, com valor médio em torno de 3,08 cm/s, indicando um regime hidrodinâmico de baixa energia, porém direcionado.

#### PONTO P13 (Figuras 12 C, D e F)

No ponto P13, mais afastado da adutora, as componentes Leste e Norte também apresentaram baixa intensidade e menor variabilidade. Os sinais mostraram comportamento suave, sem eventos abruptos, o que indica a predominância de forçantes naturais, como o vento.

A rosa vetorial (F) revela que as correntes em P13 tendem a se orientar entre nordeste e sudeste (em torno de  $60^\circ$  e  $120^\circ$ ), contrastando com o padrão observado em P08. A velocidade máxima registrada foi de aproximadamente 5,03 cm/s, com média em torno de 2,51 cm/s, confirmando um ambiente de circulação mais difusa e influenciado por forçantes naturais como vento e morfologia local.

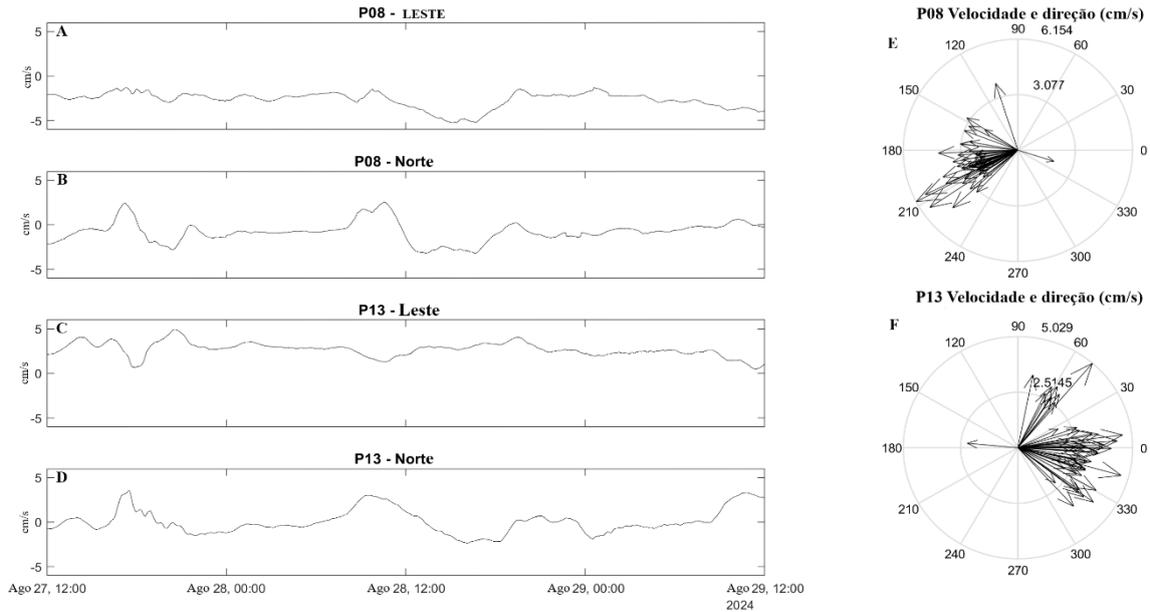


Figura 12 – Componentes vetoriais da corrente (Leste e Norte) e diagramas polares de velocidade e direção nos pontos P08 e P13, referentes à segunda campanha de monitoramento realizada entre 27 e 29 de agosto de 2024 no lago Água Preta. Os gráficos (A) e (B) correspondem às componentes Leste e Norte da corrente em P08, enquanto (C) e (D) representam essas mesmas componentes em P13. Os diagramas polares (E) e (F) ilustram a distribuição angular e a intensidade das correntes nos respectivos pontos, indicando a direção predominante e os picos de velocidade ao longo do período analisado.

A comparação entre os pontos revela dois regimes hidrodinâmicos distintos dentro do lago Água Preta, influenciados principalmente pela proximidade com as estruturas de captação e pela morfologia do corpo hídrico.

No ponto P08, as correntes são mais intensas e direcionadas, com maior variabilidade nas componentes Norte e Leste. Essa característica está associada à influência direta do sistema de bombeamento do rio Guamá, o que provoca uma circulação forçada, com picos de velocidade que podem ultrapassar 6 cm/s. A direção predominante voltada ao sudoeste evidencia que o fluxo tende a ser canalizado em direção à zona de transferência entre os lagos, reforçando a presença de um gradiente hidrodinâmico imposto pela operação da adutora.

Em contrapartida, o ponto P13 apresenta um comportamento mais estável e homogêneo, com velocidades médias menores e menores amplitudes de oscilação. Localizado em uma área com menor interferência mecânica, as correntes nesse ponto parecem responder de forma mais direta a forçantes naturais, como o vento ou pequenas variações de nível. A direção predominante no quadrante nordeste-sudeste sugere uma movimentação lateralizada das massas d'água, típica de zonas mais protegidas ou afastadas de fontes de fluxo artificial.

#### ADCP

Durante a campanha realizada com ADCP entre os dias 22 e 28 de novembro de 2023 (Figura 13), observou-se uma hidrodinâmica predominantemente fraca no lago. As velocidades

das correntes variaram, em sua maioria, entre 5 e 20 cm/s, com ocorrências pontuais de picos superiores a 40 cm/s em camadas intermediárias da coluna d'água, principalmente nos dias 25 e 26.

As maiores velocidades concentradas em região do metalímnio, entre 1,6 m e 2,0 m de profundidade, enquanto o epilímnio apresenta uma camada mais estável. A linha preta no topo do gráfico representa a variação do nível d'água, que permaneceu relativamente constante durante o período. O padrão de velocidade observado sugere um sistema influenciado por forçantes mecânicas e também locais, como os ventos.

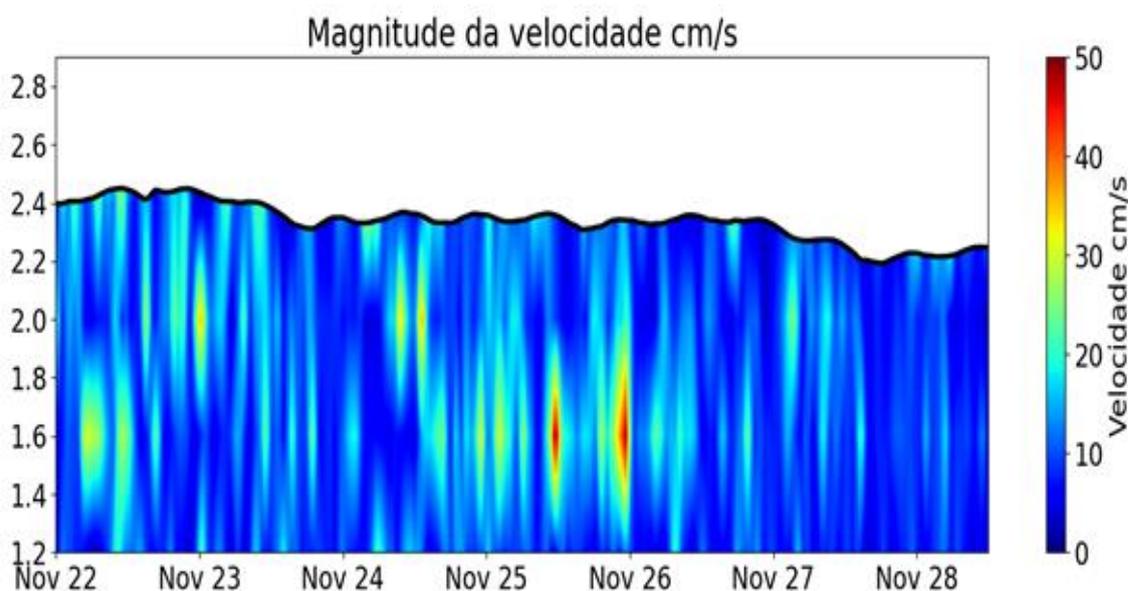


Figura 13 – Perfil vertical da velocidade da corrente ao longo do tempo, obtido por meio de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) durante a primeira campanha de monitoramento realizada no lago Água Preta, entre os dias 22 e 28 de novembro de 2023.

A partir dos dados obtidos pelo ADCP, foi possível construir o perfil vertical da magnitude da velocidade da corrente (Figura 14). O gráfico revela uma variação significativa ao longo da coluna d'água, sugerindo um comportamento de circulação em camadas. No epilímnio (acima de 2,4 metros), observou-se um fluxo positivo, com velocidade máxima próxima de 4,5 cm/s, indicando direção predominante em um sentido. Em contrapartida, entre as profundidades de 1,9 e 2,4 metros (metalímnio), as velocidades foram negativas, chegando a aproximadamente -4,2 cm/s, caracterizando fluxo em direção oposta à da camada superficial. No hipolímnio (em torno de 1,2 metros), as velocidades se aproximam de 0 cm/s, o que pode indicar a presença de uma zona de cisalhamento ou de relativa estagnação.

Esse padrão indica circulação bidirecional, potencialmente induzida pela operação das bombas da adutora, por ação do vento ou por gradientes de densidade. Tal dinâmica tem

implicações importantes na redistribuição de partículas em suspensão, nutrientes e oxigênio, além de interferir nos processos de mistura vertical.

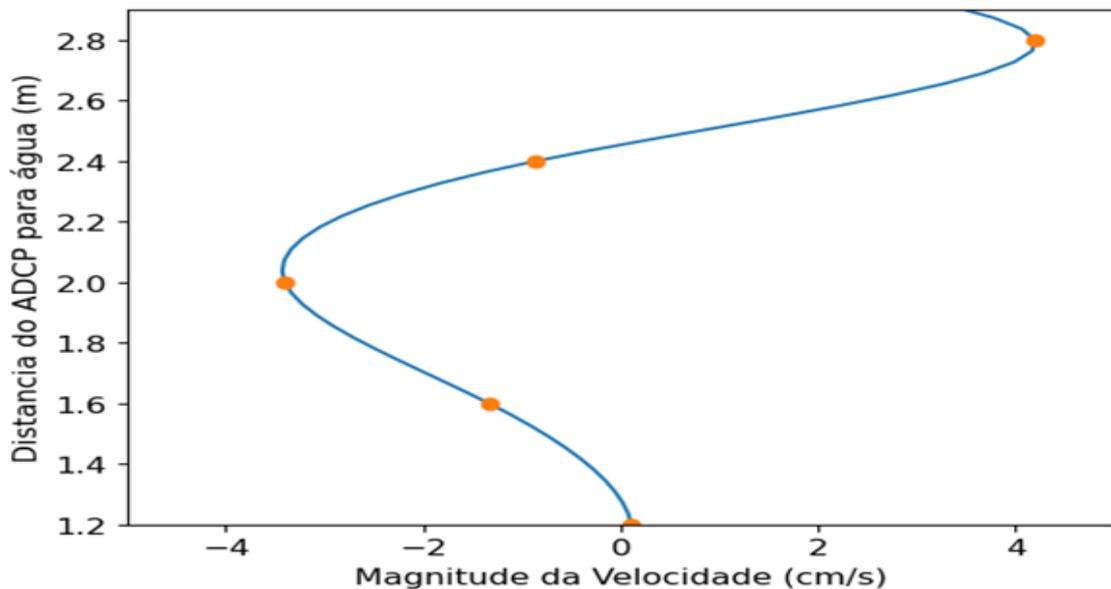


Figura 14 – Perfil vertical da magnitude da velocidade da corrente obtido por meio do ADCP durante a primeira campanha no lago Água Preta. O eixo horizontal representa a velocidade da corrente (cm/s), enquanto o eixo vertical mostra a distância entre o sensor ADCP e a superfície da água (m).

Na segunda campanha com ADCP, realizada entre 26 de janeiro a 5 de fevereiro de 2024, no mesmo ponto do lago, foram registradas condições hidrodinâmicas consideravelmente mais intensas em relação à coleta de novembro (Figura 15). As velocidades da corrente atingiram valores próximos de 50 cm/s, com maior expressividade no epilímnio, indicando um evento de forte dinamismo hidrológico a partir de 29 de janeiro. Esse episódio pode estar associado a forçantes meteorológicas (chuvas intensas ou ventos) ou ao aumento do bombeamento.

Após esse pico, as velocidades permaneceram elevadas por vários dias, sugerindo um evento prolongado e acoplado a uma mudança sazonal. A distribuição vertical das velocidades mostra predomínio da energia na superfície, com perda gradual de intensidade em direção ao fundo, padrão compatível com a ação de forçantes superficiais, como vento ou influxos advectivos.

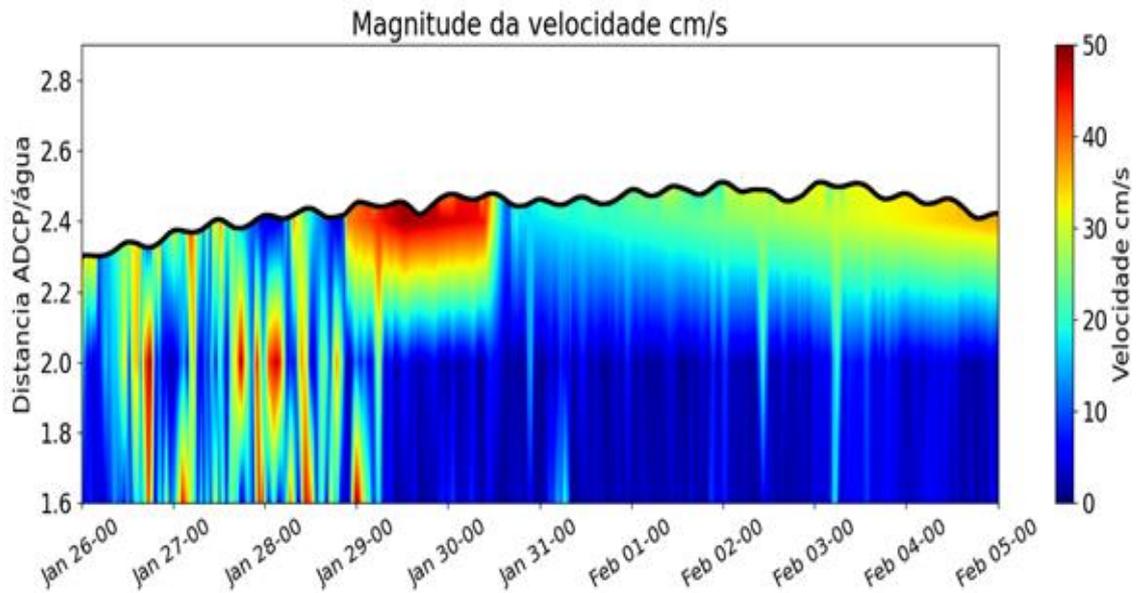


Figura 15 - Perfil vertical da velocidade da corrente ao longo do tempo, obtido por meio de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) durante a segunda campanha de monitoramento realizada no lago Água Preta, entre os dias 26 de janeiro e 05 de fevereiro de 2024.

A magnitude da velocidade atinge valores máximos próximos a 25 cm/s nas camadas superiores, indicando uma forte influência de forçantes externas, possivelmente relacionadas ao acionamento das bombas de captação ou à ação do vento sobre a superfície do lago (Figura 16). À medida que a profundidade aumenta, a velocidade da corrente diminui significativamente, chegando a valores próximos de zero ou até mesmo negativos, o que pode sugerir inversões locais de fluxo ou zonas de recirculação nas camadas mais próximas ao fundo.

Esse comportamento é característico de sistemas com entrada forçada de água, nos quais há um cisalhamento vertical da velocidade devido à diferença de impulso entre as camadas, o que pode gerar zonas de estratificação dinâmica. Em conjunto, os dados sugerem uma estratificação da corrente com alta energia na superfície e relativa estagnação no fundo, evidenciando a importância das forçantes mecânicas superficiais (como bombeamento e vento) na hidrodinâmica do lago durante o período observado.

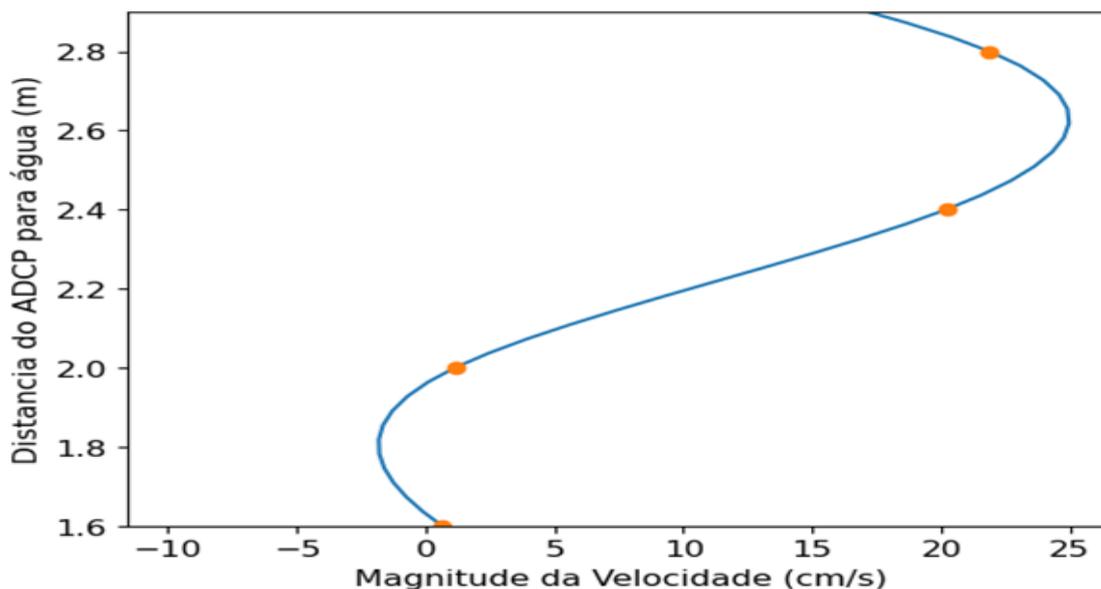


Figura 16 – Perfil vertical da magnitude da velocidade da corrente obtido durante a segunda campanha do ADCP (jan/fev de 2024) no lago Água Preta. O gráfico mostra a variação da velocidade em função da distância entre o sensor ADCP e a superfície da água.

#### CROSS WAVELET P08 x VENTO

A análise de cross wavelet entre a velocidade do vento e a velocidade da corrente de fundo registrada no ponto 8 do Lago Água Preta revela padrões de coerência significativos em escalas subdiurnas, especialmente entre 2 e 8 horas (Figura 17). Embora a medição da corrente tenha sido feita em uma camada inferior da coluna d'água, observa-se sincronização com a variabilidade do vento, indicando que os efeitos da ação eólica superficial se propagam verticalmente, influenciando a dinâmica das camadas mais profundas.

Na parte superior do gráfico, observa-se que, ao longo dos dias 27 a 29 de agosto, há flutuações significativas na velocidade do vento, com picos que ultrapassam 3,5 m/s, e um comportamento mais gradual da corrente, com valores entre 2 e 7 cm/s. Isso sugere uma possível resposta retardada da corrente em relação às variações do vento. A influência da bomba de adução do rio Guamá, situada nas proximidades da região central do lago, intensifica os efeitos da ação anemométrica, mesmo nas camadas inferiores.

A parte inferior, que mostra o espectro de cross wavelet, revela a coerência entre as duas variáveis ao longo do tempo e em diferentes períodos horários. As áreas em vermelho e laranja indicam maior coerência entre as séries, ou seja, maior correlação energética entre vento e corrente em determinados períodos. As setas pretas mostram a fase da interação:

- Setas apontando para a direita indicam que as séries estão em fase (vento e corrente variam simultaneamente);

- Setas para a esquerda indicam que estão fora de fase;
- Setas apontando para cima sugerem que o vento antecede a corrente;
- Setas para baixo indicam que a corrente antecede o vento.

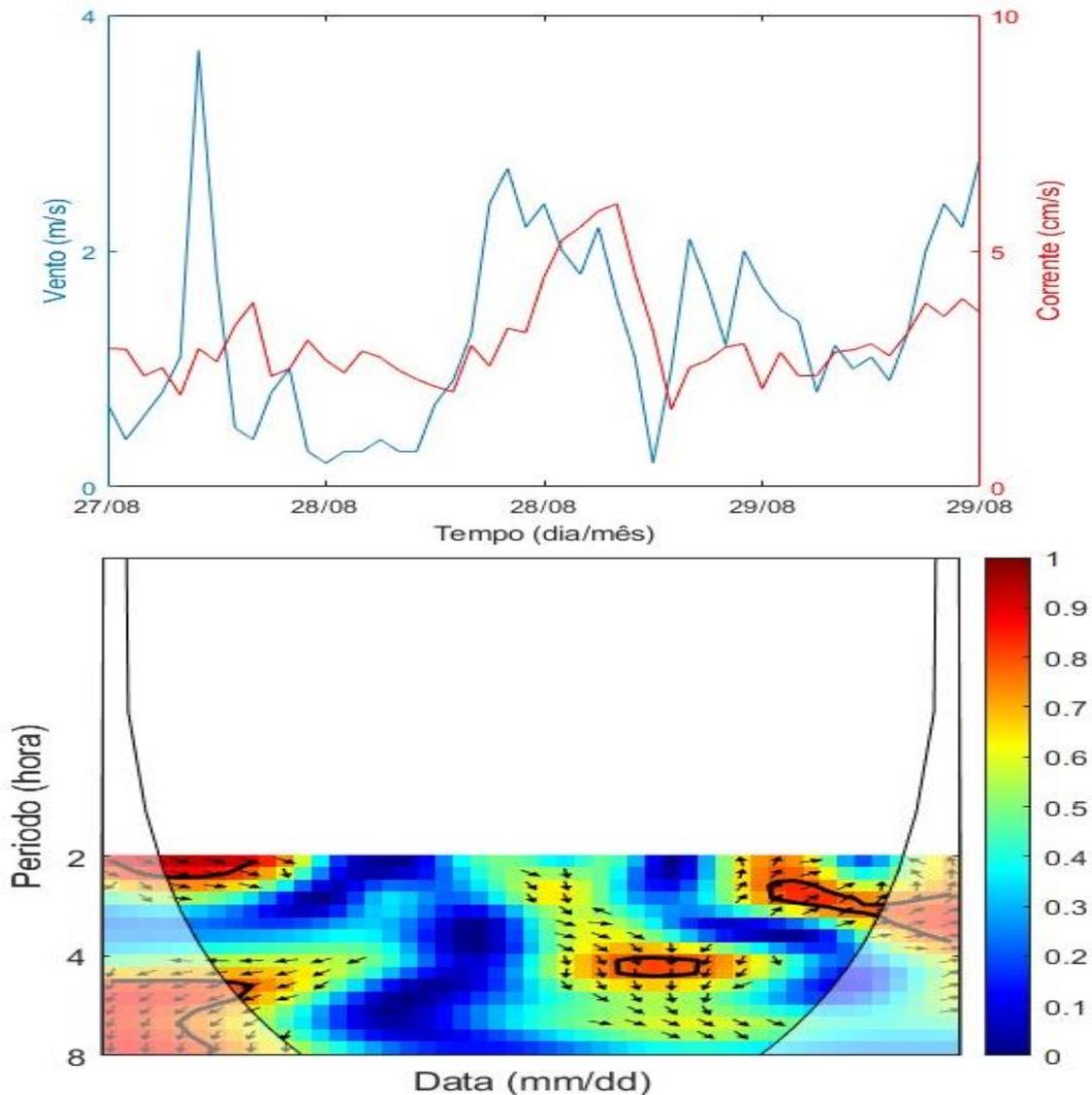


Figura 17 – Análise cross wavelet entre a velocidade do vento (linha azul) e a velocidade da corrente superficial (linha vermelha) no ponto 8, durante o período de 27 a 29 de agosto. O painel inferior apresenta o espectro de coerência cruzada entre as séries temporais, com os períodos em horas no eixo vertical.

Entre os dias 27 e 28 de agosto, a coerência é particularmente forte nas escalas de 2 a 4 horas, com predominância de setas inclinadas para a direita e levemente para cima. Isso indica que as séries estão em fase, com o vento exercendo influência primária e precedendo ligeiramente o deslocamento da água.

Esse acoplamento é consistente com a dinâmica de lagos rasos, nos quais o cisalhamento induzido pelo vento gera movimentações na camada superficial, que, por transferência de momento, se propagam verticalmente e induzem correntes nas camadas mais profundas.

## CROSS WAVELET P13 x VENTO

A análise de coerência entre a velocidade do vento e a corrente registrada no ponto P13 revelou um comportamento distinto daquele observado no ponto P08. A resposta da corrente à ação do vento foi mais fraca, com baixos níveis de coerência espectral e ausência de periodicidades bem definidas ao longo do período analisado (27 a 29 de agosto) (Figura 18).

A série temporal mostra que, apesar de o vento apresentar picos com intensidade próxima aos registrados no ponto anterior (superiores a 3 m/s), a corrente manteve-se com baixa amplitude e variabilidade. Essa estabilidade sugere que, na região onde o ponto P13 está localizado — mais afastada da adutora e de áreas de influência direta da ação antrópica —, a energia transmitida pela força do vento não foi suficiente para induzir movimentações significativas nas camadas inferiores da coluna d'água.

No gráfico espectral (parte inferior da Figura 18), observa-se que as regiões de coerência cruzada entre vento e corrente são esparsas e pouco expressivas. A maior parte do espectro apresenta baixa energia comum (tons frios) e ausência de direção preferencial nas setas de fase, o que indica fraca sincronia entre as séries.

Entre os dias 28 e 29 de agosto, há apenas breves episódios com coerência moderada em escalas entre 6 e 12 horas, mas sem significância estatística robusta. Nesses trechos, as setas sugerem relações ambíguas, alternando entre sinais em fase, fora de fase e com variações de direção. Isso reforça a hipótese de que, nesse ponto do lago, a ação do vento não é o principal motor da circulação sub-superficial.

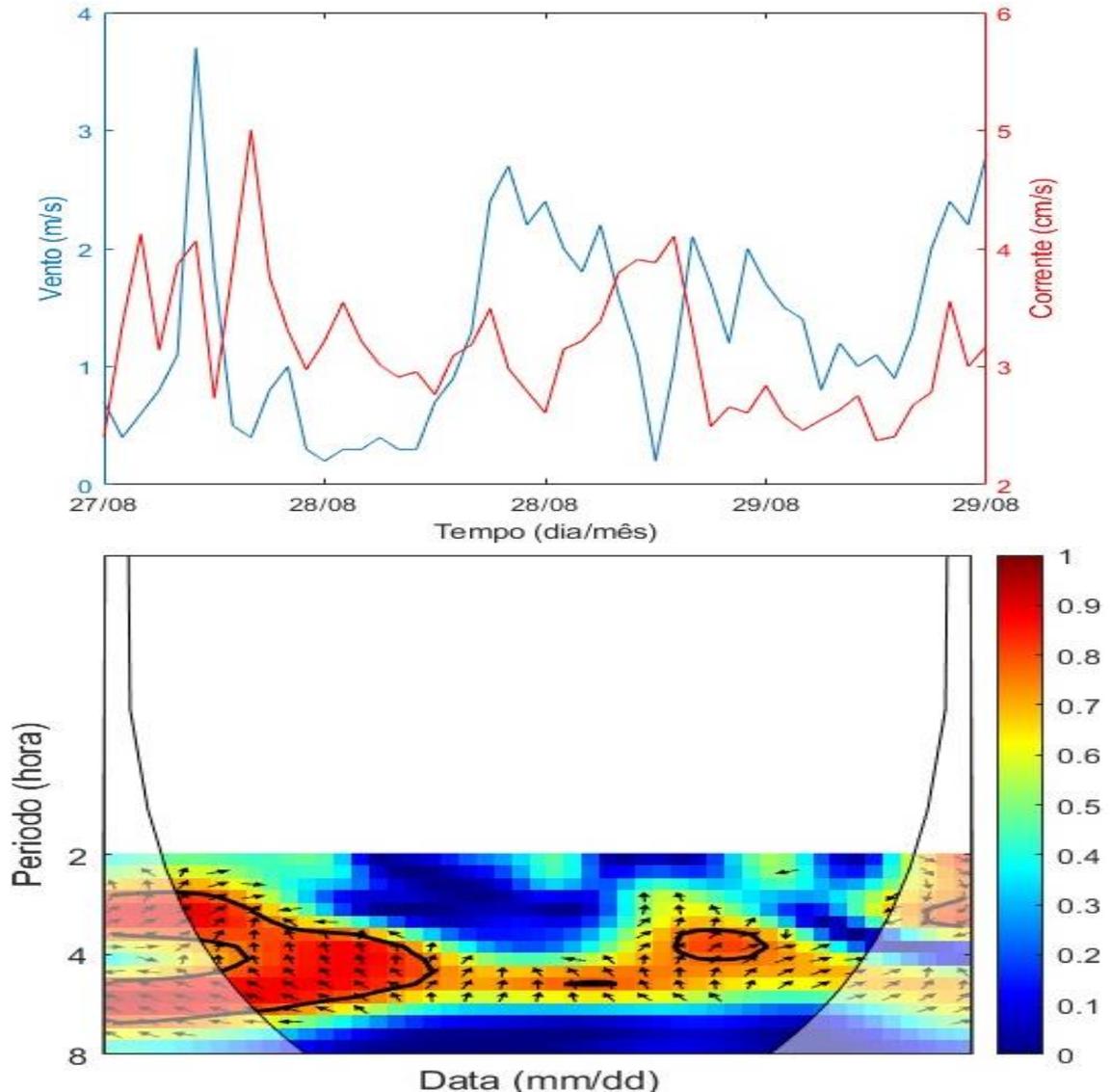


Figura 18 - Cross wavelet entre a velocidade do vento (linha azul) e a corrente superficial (linha vermelha) no ponto 13, entre os dias 27 e 29 de agosto. O espectro inferior mostra a coerência entre os sinais ao longo do tempo e das escalas de período, com maior destaque nas faixas entre 2 e 6 horas. Regiões em tons quentes indicam maior coerência, e as setas apontam a defasagem de fase entre as variáveis.

### CROSS WAVELET ADCP x VENTO

A análise cross wavelet entre a velocidade do vento e a velocidade da corrente superficial obtida a partir da célula 5 do ADCP revela uma coerência em escalas subdiurnas, com destaque para períodos de 2 a 8 horas (Figura 19). Essas escalas são típicas de resposta direta à forçante eólica em ambientes lacustres rasos, onde o atrito do vento sobre a superfície atua como principal mecanismo de geração de correntes. As regiões delimitadas por contornos de significância ao nível de 5% indicam sincronização energética consistente entre os dois sinais, evidenciando que a variabilidade da corrente superficial está fortemente modulada pela intensidade e direção do vento.

A série temporal mostra uma clara correspondência entre os picos de vento e os

aumentos na velocidade da corrente na célula analisada. Destaca-se o evento ocorrido entre os dias 28 e 29 de janeiro, quando a velocidade do vento superou 3,5 m/s e a corrente apresentou resposta imediata, com valores superiores a 20 cm/s. Essa rápida reação sugere uma forte sensibilidade da camada superficial ao cisalhamento eólico.

No espectro de coerência (painel inferior), identificam-se regiões de alta energia comum (tons quentes) distribuídas de forma contínua ao longo do tempo e em diferentes escalas, com predominância nas bandas de 3 a 6 horas. As setas indicam, majoritariamente, sinais em fase ( $\rightarrow$ ) e com o vento antecedendo levemente a corrente ( $\nearrow$ ), confirmando uma relação direta e causal entre as variáveis.

Esse padrão reforça a hipótese de que o vento atua como principal forçante da circulação superficial no lago Água Preta, especialmente em períodos de menor aporte hídrico externo. A presença de coerência persistente e estatisticamente significativa ao longo de todo o período indica que, mesmo em um ambiente tropical raso e com morfologia complexa, o acoplamento vento-corrente é eficiente e predominante nas camadas superiores.

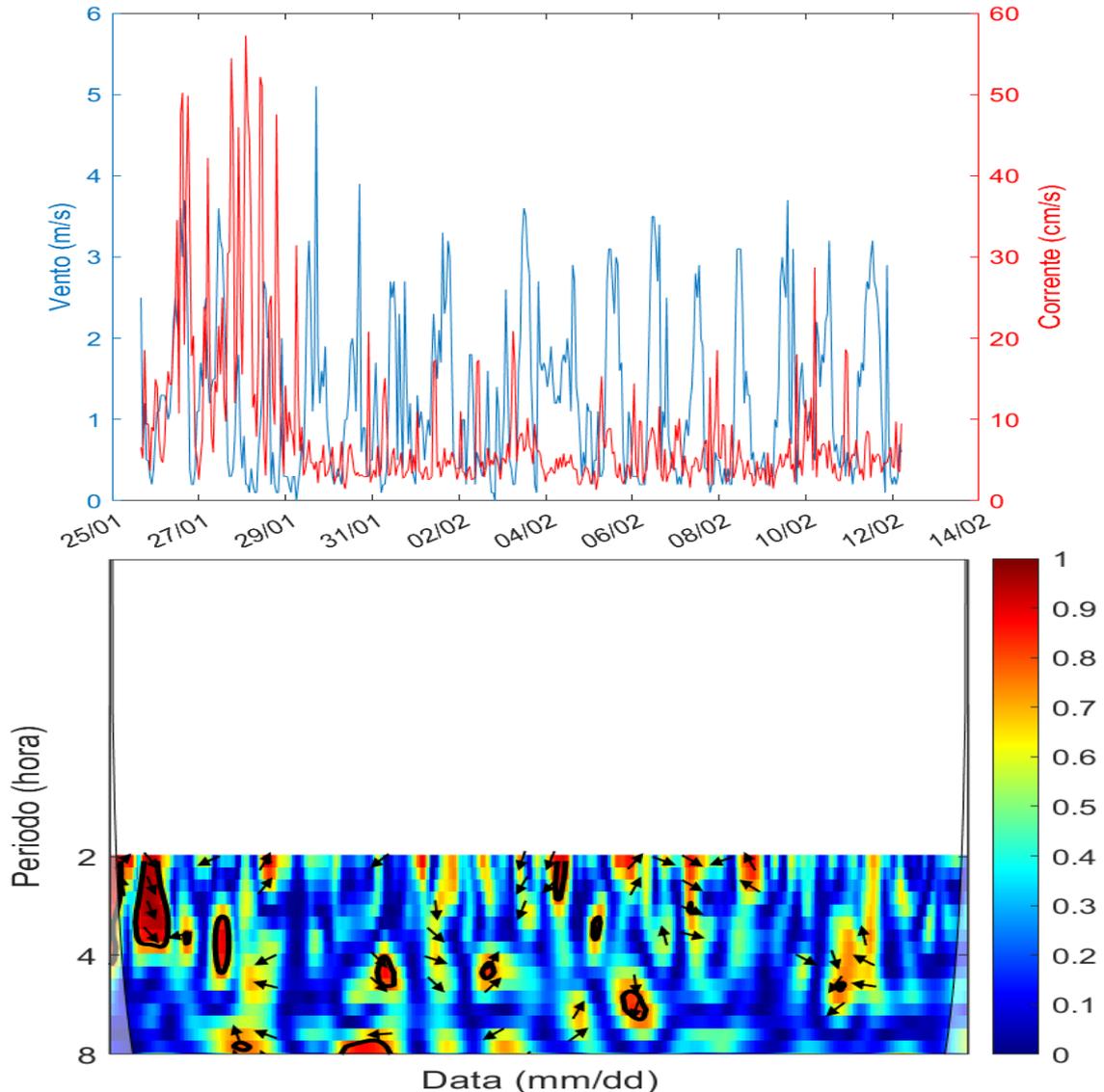


Figura 19 - Espectro de cross wavelet entre a velocidade do vento e a velocidade da corrente (célula 5) registrada pelo ADCP durante a segunda campanha de monitoramento no Lago Água Preta. As áreas coloridas indicam regiões de alta coerência entre as séries temporais ao longo das diferentes escalas de tempo (período, em horas).

O LAP, apresenta hidrodinâmica complexa, modulada por interação entre forçantes naturais, como o vento e a precipitação, e antrópicas, como o bombeamento de água para o sistema de abastecimento. A partir dos dados obtidos com correntômetros, sensores de pressão, ADCP e sonda multiparâmetros, foi possível identificar padrões marcantes de circulação e estrutura térmica da coluna d'água.

Em ambientes lacustres rasos e largos como o lago Água Preta, a circulação é predominantemente controlada pelo vento, que atua como principal forçante da camada superficial (Zhang & Chen 2023). Os dados do ADCP revelaram perfis verticais com duas camadas de máxima velocidade em direções opostas, caracterizando um padrão típico de fluxo reverso. Esse fenômeno, associado ao cisalhamento entre as camadas da coluna d'água, ocorre

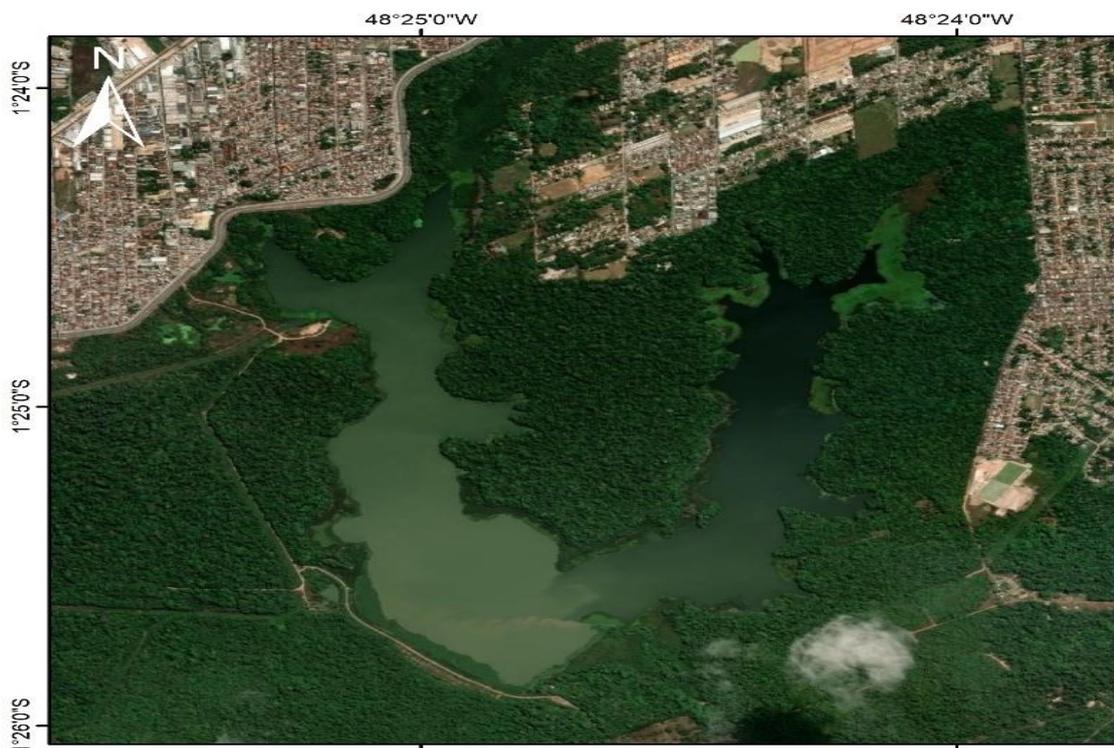
especialmente em sistemas rasos com pouco amortecimento vertical, e foi observado com velocidades de até 4,5 cm/s no período chuvoso, reduzindo levemente no período menos chuvoso. O fluxo reverso pode gerar zonas de velocidade próxima de zero, favorecendo a formação de giros verticais e promovendo intensa mistura vertical (Li *et al.* 2017, Zhang & Chen 2023).

Do ponto de vista térmico, os dados do sensor CTD mostraram variações sazonais pouco expressivas, com médias entre 29,3 °C (chuvoso) e 30,0 °C (menos chuvoso), refletindo uma baixa amplitude térmica típica de sistemas tropicais. O perfil vertical de temperatura indicou estratificação térmica diurna fraca, com diferenças de até 0,5 °C entre a superfície e o fundo, e homogeneização noturna frequente, evidenciando o comportamento polimítico do lago, isto é, com ciclos recorrentes de estratificação e mistura (Esteves 2011). Essa dinâmica é consistente com observações em outros corpos hídricos tropicais (Nunes *et al.* 2006, Cavalcanti 2013).

A atuação das bombas de recalque também influencia diretamente na circulação interna do lago. No ponto 8, localizado próximo à região central e mais exposto ao funcionamento das bombas, observou-se uma maior resposta da corrente de fundo à força do vento, como evidenciado pela análise cross wavelet. Em contraste, no ponto 13, distante da influência direta da bomba e situado próximo à saída da adutora, as correntes de fundo apresentaram menor acoplamento ao forçamento anemométrico. Isso reforça a ideia de que, além da ação superficial do vento, a circulação interna do lago é moldada por inputs mecânicos induzidos pelas bombas, que geram vórtices centrais, aumentando a mistura, a suspensão de sedimentos e a turbidez da água na região esquerda do lago.

Adicionalmente, observou-se um claro contraste limnológico entre as margens esquerda e direita do lago. A margem esquerda apresentou maior eutrofização, turbidez e concentração de macrófitas aquáticas, como consequência da agitação e resuspensão dos sedimentos. Já a margem direita, menos impactada pelas bombas, manteve características mais conservadas, com circulação mais ordenada, menores velocidades de corrente e maior transparência da água (Figura 21).

Portanto, os dados hidrodinâmicos e térmicos integrados indicam que o Lago Água Preta é um sistema altamente dinâmico e heterogêneo, no qual os mecanismos de mistura vertical e circulação horizontal são amplamente controlados por forçantes externas naturais e antrópicas. Esses processos são determinantes para o transporte de nutrientes, sedimentos e possíveis contaminantes, e devem ser considerados em estratégias de monitoramento e gestão ambiental do sistema.



**Figura 21** – Contraste limnológico entre as margens esquerda e direita do lago Água Preta, evidenciando a compartimentalização hidrodinâmica do sistema. A margem esquerda apresenta maior turbidez, concentração de macrófitas aquáticas e resuspensão de sedimentos, associadas à influência direta do bombeamento. A margem direita, menos impactada por forçantes antrópicas, apresenta maior transparência da água e circulação mais ordenada.

## CONCLUSÃO

A dinâmica hidrológica e térmica do lago Água Preta é fortemente condicionada por três variáveis-chave: temperatura da água, nível do lago e a velocidade e direção das correntes. As medições *in situ* revelaram uma baixa variabilidade sazonal tanto na temperatura quanto na intensidade das correntes, indicando um sistema relativamente estável ao longo do ano. A estrutura térmica do lago é marcada por estratificações térmicas diárias com amplitude de até 1 °C entre a superfície e o fundo, o que é típico de ambientes tropicais rasos.

No que diz respeito ao nível do lago, embora o sistema receba contribuição de uma nascente e esteja inserido em uma região com elevada precipitação pluviométrica, esses fatores naturais não são suficientes para manter os níveis hídricos em patamares operacionais. Por esse motivo, o uso contínuo da adutora que conecta o lago ao rio Guamá é essencial para o equilíbrio do sistema.

A análise dos perfis verticais de corrente apontou a ocorrência de fluxo reverso na coluna d'água, um fenômeno comum em lagos rasos e expostos ao vento, no qual camadas de profundidades diferentes apresentam direções opostas de circulação. Esse padrão reforça a atuação do vento como uma das forçante da circulação no lago. Em conjunto, esses aspectos caracterizam o LAP como um sistema polimítico, com sucessivas fases de estratificação e

mistura ao longo do ano, o que influencia diretamente os processos de transporte de calor, nutrientes e sedimentos.

A circulação horizontal apresentou padrões distintos entre os pontos monitorados. Próximo à entrada da adutora, as correntes foram mais intensas e direcionadas, evidenciando o papel do bombeamento no deslocamento da massa d'água. Em pontos mais distantes, observou-se predomínio de correntes fracas, com direções variáveis e comportamento menos influenciado por fatores antrópicos.

As análises verticais realizadas com o ADCP indicaram uma estratificação hidrodinâmica com velocidades maiores na superfície e tendência à estagnação nas camadas inferiores. Esse padrão é típico de ambientes onde a principal forçante é superficial, como o vento, e foi confirmado pelas análises espectrais.

As transformadas cross wavelet revelaram coerência significativa entre o vento e a corrente superficial, principalmente em escalas subdiurnas. Essa sincronia foi mais evidente nas áreas próximas à superfície e em pontos sob influência direta da adutora. Em regiões mais abrigadas, a influência do vento foi menos pronunciada, sugerindo que a morfologia local e a distância das forçantes artificiais desempenham papel relevante na modulação da hidrodinâmica.

Este trabalho contribui para o entendimento dos processos físicos que regem a circulação em sistemas lênticos amazônicos, oferecendo subsídios importantes para a gestão de recursos hídricos e para o planejamento ambiental do Parque Estadual do Utinga. Compreender a dinâmica hidrodinâmica é essencial para o monitoramento de impactos, a previsão de mudanças na qualidade da água e a conservação dos serviços ecossistêmicos prestados por esses ambientes.

## REFERENCIAS

- Almeida R. A. S. *et al.* 2012. O clima da Amazônia: uma abordagem regional. *Revista Brasileira de Climatologia*, **10**, p. 123–140.
- Brito S. K. M. 2010. *Parque Estadual do Utinga (PA): uma gestão ambiental participativa*. MS Dissertation, Núcleo de Meio Ambiente, Universidade Federal do Pará, Belém, 103 p.
- Castro A. A. & Sousa A. S. 2007. Caracterização geomorfológica e hidrológica da Região Metropolitana de Belém. *Revista Geonorte*, **3**(5): p. 45–60.
- Cavalcanti C. L. C. 2013. *Dinâmica de circulação e estrutura térmica em reservatórios tropicais: o caso do Lago Paranoá (DF)*. MS Dissertation. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília, 97 p.

Companhia de Saneamento do Estado do Pará – COSANPA/CENSA. 1983. Diagnóstico do estudo urbanístico de proteção sanitária dos lagos Bolonha e Água Preta. II. Estudo da qualidade de proteção das águas. Belém.

Cruz J. V. *et al.* 2015. Eutrofização dos lagos Sete Cidades e Furnas (São Miguel, Açores): análise de dados de monitoramento de longo prazo e medidas de remediação. *Science of the Total Environment*, **20**, p. 168–186.

Diniz F. D. A. *et al.* 2018. Normais climatológicas do Brasil 1981-2010. *Pesquisa agropecuária brasileira*, **53**, p. 131-143.

Diniz T. D. 1986. Característica climática da Amazônia Oriental. In EMBRAPA, CPATU, GTZ, *Pesquisa sobre utilização e conservação do solo da Amazônia Oriental*, p. 3–13.

Esteves F. A. 2011. Fundamentos de limnologia, 3ª edição. *Interciência*. Rio de Janeiro, 790.

Farias E. dos S. *et al.* 1992. Mapeamento da área Belém-Outeiro (Estágio de campo III – Relatório Final). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará.

Grinsted A. *et al.* 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **11**(5/6), p. 561–566. DOI: 10.5194/npg-11-561-2004.

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. 2020. Normais climatológicas do Brasil (1981–2010). <http://www.inmet.gov.br>.

Li Y. *et al.* 2017. Estrutura vertical das correntes lacustres sob força do vento: mecanismos e implicações. *Journal of Hydrology*, **35**(2): p. 427–438.

Lima F. L. M. & Dias D. M. dos S. 2025. Paradoxo hídrico da cidade: a utilização de parques urbanos para a proteção de mananciais. O caso dos lagos Bolonha e Água Preta. *Revista de Direito da Cidade*, **16**(2): e274–317. DOI: 10.12957/rdc.2024.70630.

Moore J. W. *et al.* 2003. Eutrofização de lagos na periferia urbana, região de Seattle, EUA. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, **32**(1): p. 13–18.

Nascimento H. E. M. *et al.* 2014. Influência do clima nas formações vegetais da Amazônia Oriental. *Acta Amazônica*, **44**(2): p. 133–142.

Nóbrega S. B. N. *et al.* 2016. Qualidade de água de dessedentação de bovinos da fazenda – Escola do IFRN-IPANGUAÇU. *HOLOS*, **3**, p. 52-61.

Nunes A. R. *et al.* 2006. Variabilidade térmica diária e sazonal em um lago urbano raso da região amazônica. *Acta Amazonica*, **36**(3): p. 389–396.

Oliveira M. A. J. de. *et al.* 2013. Geodiversidade do Estado do Pará. CPRM, **3**, p.136.

Oliveira M. C. F. & Souza P. F. 1997. Estudo das possíveis variações e mudanças climáticas em Belém-PA. In *Anais do 10º Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, p. 410–412.

- Pu J. *et al.* 2021. Implicações da compartimentalização do fósforo na interface partícula suspensa-água para eutrofização do maior lago de água doce da China, Lago Poyang. *Chemosphere*, **263**, e12-26.
- Rebouças A. D. C. *et al.* 2002. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. (2ª ed.). Escrituras Editora. São Paulo. 703 p.
- Santos E. C. dos. 1991. Estudo de impacto ambiental do complexo de destino final de resíduos sólidos da Região Metropolitana de Belém. FADESP/SESAN, p. 27.
- Santos M. L. S. *et al.* 2015. Modelagem hidrodinâmica de um reservatório utilizado no abastecimento de água de Belém (Lago Água Preta, Pará, Brasil). *Acta Scientiarum. Technology*, **37**(3): p. 353–359.
- Santos R. A. dos. *et al.* 2015. Impactos antrópicos e conservação ambiental no Parque do Utinga, Belém – PA. *Revista de Estudos Ambientais*, **17**(1): p. 91–102.
- Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade – SEMAS. 2021. Zoneamento ecológico-econômico do Parque Estadual do Utinga: relatório técnico, p. 33.
- Silva V. M. da & Pereira J. A. R. 2003. Evolução do sistema de esgotamento sanitário na Região Metropolitana de Belém. *Saneamento ambiental em áreas urbanas: esgotamento sanitário na Região Metropolitana de Belém*. UFPA, NUMA, EDUFPA, p. 124–141.
- Tundisi J. G. 2001. Planejamento e gerenciamento de lagos e reservatórios: uma abordagem integrada ao problema da eutrofização. UNEP International Environmental Technology Centre. Osaka, Rima.
- UFPA – Laboratório de Pesquisa em Monitoramento Ambiental Marinho – LAPMAR. 2024. 3º Relatório – Diagnóstico dos Lagos: Água Preta e Bolonha para fins de Enquadramento de Corpos D'água, **1**, p 146.
- Vasconcelos V. D. M. M., & Souza C. F. 2011. Caracterização dos parâmetros de qualidade da água do manancial Utinga, Belém, PA, Brasil. *Ambiente & Água: An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, **6**(2): p. 605–624.
- Vieira L. S. & Santos P. C. T. C. dos. 1987. Amazônia: seus solos e outros recursos naturais. Agronômica Ceres. São Paulo. 233 p.
- Weber M. J. *et al.* 2020. Restauração de lagos eutrofizados em Iowa, EUA. *Hydrobiologia*, **847**(21): e4469–4486.
- Zhang Y. & Chen C. 2023. Hidrodinâmica e dinâmica de mistura induzidas pelo vento em lagos rasos: uma perspectiva de modelagem. *Water Research*, **240**, e120-133.

## 6 CONCLUSÃO

A estudo investigou as condições meteorológicas e hidrodinâmicas do Lago Água Preta, um sistema lântico crucial para o abastecimento hídrico da Região Metropolitana de Belém. Os resultados demonstraram que a hidrodinâmica do lago é predominantemente influenciada pela ação mecânica das bombas de captação de água do rio Guamá, enquanto o vento exerce um papel secundário, com velocidades médias menores. A temperatura da água apresentou variações sazonais moderadas, com estratificação térmica fraca e homogeneização noturna, características típicas de ambientes tropicais rasos. Além disso, o nível do lago teve uma baixa oscilação, refletindo a influência combinada da operação das bombas e do regime pluviométrico regional.

Os dados meteorológicos revelaram tendências de aquecimento local, com temperaturas médias do ar superiores à normal climatológica (1991–2020), e diminuição na precipitação, possivelmente associadas a fenômenos climáticos como o ENOS. A umidade relativa do ar manteve-se elevada, mas com leve declínio nos meses menos chuvosos, enquanto os ventos predominaram nas direções norte e nordeste, com baixa intensidade. Esses fatores climáticos, somados às pressões antrópicas, como a urbanização desordenada e o despejo de efluentes, destacam a vulnerabilidade do lago à degradação ambiental e a necessidade de monitoramento contínuo.

Em síntese, este estudo forneceu uma base sólida para a compreensão da dinâmica do Lago Água Preta, destacando a importância da integração entre processos naturais e antrópicos na gestão sustentável de recursos hídricos urbanos. Os resultados ressaltam a urgência de políticas públicas que harmonizem o desenvolvimento urbano com a conservação desse ecossistema, garantindo a segurança hídrica e a biodiversidade da região.

## REFERÊNCIAS

- Albinati R. C. B. 2006. Aquicultura em pequenos açudes no semiárido. *Bahia Agrícola*, 7(2): p. 66–72.
- Alvim A. T. B. *et al.* 2015. A urgência das águas: intervenções urbanas em áreas de mananciais. *Cadernos Metrópole*, 17: 83–107.
- Andreoli C. V., & Carneiro C. (eds.). 2005. *Gestão integrada de mananciais de abastecimento eutrofizados*. Paraná, Sanepar. 500 p.
- Ayoade J. O. 1996. *Introdução à climatologia para os trópicos* (4ª ed.). Bertrand Brasil. 355 p.
- Bordalo C. & Sousa T. 2014. Os impactos socioambientais nos lagos Bolonha e Água Preta: o processo de degradação na Reserva do localizado em Belém do Pará. *In: 7º Congresso Brasileiro de Geógrafos*.
- Bordalo C. A. L. 2006. *O desafio das águas numa metrópole amazônica: uma reflexão das políticas de proteção dos mananciais da região metropolitana de Belém-PA (1984–2004)*. Orientador: David MCGrath, PhD Theses, Universidade Federal do Pará. 282 p.
- Bouffard D. *et al.* 2025. Thermally driven cross-shore flows in stratified basins: A review on the thermal siphon dynamics. *Flow*, 5 e1-44. DOI: 10.1017/flo.2024.31.
- Braga B. P. F. *et al.* 2017. *Gestão de recursos hídricos: lições de São Paulo para o Brasil* (2ª ed.). Oficina de Textos. 325 p.
- Carvalho J. da R. 2015. Água e saúde: bens públicos da humanidade. *Estudos Avançados*, 29(84): 139–149. DOI: 10.1590/s0103-40142015000200009.
- Chapra S. C. 2008. Modelagem de qualidade da água: rios e lagos. Edgard Blücher. 7, p. 33–47.
- Conti J. B. A. 1996. Climatologia e a defesa da natureza. *Boletim Climatológico da FTC/UNESP*, 2, p. 5–9.
- Cunha D. G. & Calijuri M. do C. 2011. Avaliação ecológica de lago urbano com base em indicadores físicos, químicos e biológicos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16(4), p. 57–67.
- El-Robrini, M. *et al.* 2006. Pará. *In: Muehe D. (org.). Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília, DF, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. p. 41-86. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa\\_sigercom/\\_arquivos/pa\\_erosao.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_arquivos/pa_erosao.pdf). Acessado em: 24 de junho de 2023.
- Esteves F. A. 1998. *Fundamentos de limnologia*. 2ª ed. Rio de Janeiro, Interciência. 790p.
- Esteves F. A. 2011. *Fundamentos de limnologia*. 3ª ed. Rio de Janeiro, Interciência. 790p.
- Fenzl N. *et al.* 2010. *A sustentabilidade do sistema de abastecimento de água: da captação ao consumo da água em Belém*. Belém, UFPA/ITEC/NUMA.

- Filippino K. C. *et al.* 2017. The influence of storms on water quality and phytoplankton dynamics in the tidal James River. *Estuaries and Coasts*, **40**(1): p. 80–94. DOI: 10.1007/s12237-016-0145-6
- Fisch G. *et al.* 1998. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazônica*, **28**(2): 101–119.
- Fonseca F. O. & Pfeifer L. L. 2014. Mapeamento de uso do solo e avaliação dos impactos ambientais nas sub-bacias dos lagos Água Preta e Bolonha (Belém/PA). In: 7º Congresso Brasileiro de Geógrafos.
- Fonseca F. O. & Pfeifer L. L. 2015. A utilização do geoprocessamento como instrumento para avaliação dos impactos ambientais nas sub-bacias dos lagos Água Preta e Bolonha, Belém-PA. *Revista Geonorte*, **6**(21): 123–140.
- Franzin B. T. *et al.* 2020. The effect of increased wind speed on the limnological characteristics of a tropical reservoir. *Hydrobiologia*, **47**: 2895–2910. DOI: 10.1007/s10750-020-04232-2.
- Furch K. & Junk W. J. 1997. Physicochemical conditions in the floodplains. In: Aatoria. *The Central Amazon floodplain: ecology of a pulsing system*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 69-108.
- Galvão A. S. da S. & Sousa J. R. 2003. A dinâmica urbana da cidade de Belém e os conflitos pelo uso e ocupação do solo. *Revista Geonorte*, **6**(21): p. 11–25.
- Glibert P. M. & Burkholder J. M. 2022. Eutrophication and oligotrophication. Elsevier *eBooks*. **6** e442-478. DOI: 10.1016/b978-0-12-822562-2.00052-9
- Gunkel G. *et al.* 2006. A review of limnological parameters and water quality assessment of a Brazilian reservoir. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, **34**(4): 292–302.
- Gunkel G. *et al.* 2007. Sistemas lacustres amazônicos: Limnologia e qualidade da água dos lagos de várzea e rios da planície Amazônica. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, **38**(2): 129–142.
- Henry R. *et al.* 2006. Thermal structure of lakes in the Lower Tietê Basin (São Paulo, Brazil). *Acta Limnologica Brasiliensia*, **18**(4): 433–443.
- Henry R. & Nogueira M. G. 1997. Interações entre o compartimento pelágico e a zona litorânea de reservatórios: Processo de transporte e implicações limnológicas. In Henry R. (ed.). *Ecologia de reservatórios: estrutura, função e aspectos sociais*. São Paulo, Fundibio/Fapesp, p. 39–60.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. 2019. *Cidades e estados: Belém – PA*. <https://cidades.ibge.gov.br>. Acesso em: 01 de outubro de 2023.
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. 2023. *Dados meteorológicos históricos da estação Belém (A101)*. <https://bdmep.inmet.gov.br>. Acesso em: 24 de junho de 2023.
- Jakob C. M. *et al.* 2010. Avaliação da qualidade da água em mananciais urbanos. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, **15**(1): 37–46.
- Junk W. *et al.* 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. In: Dodge D. P. (ed.).

*Proceedings of the International Large River Symposium*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, p. 110–127.

Junk W. J. *et al.* 2011. A classification of major natural habitats of Amazonian wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, **19**: 581–596. DOI: 10.1007/s11273-011-9211-8.

Kemp W. M. *et al.* 2005. Eutrophication of Chesapeake Bay: historical trends and ecological interactions. *Marine Ecology Progress Series*, **30**: 1–29.

Kishimoto P. N. & Silva A. M. da. 2017. Análise da qualidade da água na bacia do Lago Água Preta (Belém-PA). *Revista Geonorte*, **8**(31): 127–143.

Lima M. M. 2011. Gestão das águas urbanas: A bacia hidrográfica como unidade de planejamento. *Caderno Prudentino de Geografia*, **42**(1): 140-161.

Lima M. M. & Ferreira R. 2012. A gestão das águas urbanas: O papel das instituições públicas no controle de enchentes e no uso e ocupação do solo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **17**(2): 71–83.

Martins G. M. de S. *et al.* 2018. Avaliação da qualidade da água nos lagos Água Preta e Bolonha, Belém-PA. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **11**(6): 2316–2331.

Martorano L. G. *et al.* 1993. Estudos climáticos do estado do Pará, classificação climática (Köppen) e deficiência hídrica (Thorntwaite, Mather), p. 68.

Matta E. & Rocha C. 2008. Limnologia dos reservatórios de abastecimento público do sistema Cantareira (SP). *Ambiente & Água*, **3**(2): 34–49.

Montoroi J. P. & Jorry S. J. 2021. Assessing the effects of wind-induced hydrodynamics on thermal stratification in a shallow tropical reservoir. *Journal of Hydrology*, **24** e125-143. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125943

Mourão M. J. 2020. A trajetória histórica da legislação ambiental no Brasil. *Revista de Direito Ambiental*, **99**: 107–123.

Motta J. B. M. *et al.* 2018. Estudo do comportamento da pluma de escoamento superficial em reservatório urbano utilizando imagem de drone. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, **23**(3): 455–464. DOI: 10.1590/S1413-41522018162693.

Müller R. A. 2015. *Limnologia: fundamentos e aplicações*. 2ª ed. [S.l.], Interciência.

Neiff J. J. 1990. Ideas para la interpretación ecológica del funcionamiento de los grandes ríos sudamericanos. *Interciencia*, **15**(6): 424–441.

Nogueira M. G. 2008. Phytoplankton assemblages in a reservoir cascade of a large tropical–subtropical river (SE, Brazil). *Brazilian Journal of Biology*, **68**(4):993–1005. DOI: 10.1590/S1519-69842008000500009.

Nogueira M. G., Henry R. & Maricatto F. E. 1999. Spatial and temporal heterogeneity in the Jurumirim Reservoir, São Paulo, Brazil. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, **4**(2): 107–120.

- Oliveira R. R. de. 2010. O uso de imagens do sensor ASTER na identificação de áreas degradadas da bacia do Lago Água Preta (Belém/PA). *Cadernos de Geografia*, **20**(35): 117–128.
- Oliveira S. M. B. 2007. *A degradação da bacia do Lago Água Preta: um estudo sobre o abastecimento de água em Belém do Pará*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Pará, 124 p.
- Panosso R. *et al.* 2011. Avaliação da qualidade da água em mananciais urbanos no município de Maringá–PR. *Ambiência*, **7**(3): 493–506.
- Ramos J. M. 2004. *Hidrologia aplicada*. 3ª ed. [S.l.], UFPB.
- Ribeiro A. F. R. *et al.* 2020. Índices de qualidade da água em reservatório urbano amazônico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **25**: e 10-20. DOI: 10.1590/2318-0331.252020190155
- Rocha M. C. C. 2006. *Limnologia dos lagos Água Preta e Bolonha, mananciais de abastecimento da região Metropolitana de Belém–PA*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Pará, 143 p.
- Rodrigues D. L. 2020. Avaliação da qualidade da água da bacia do Lago Água Preta em Belém/PA. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, **5**(1): 53–68.
- Santos S. B. dos. 2008. Os lagos Bolonha e Água Preta e a crise no abastecimento de água em Belém. In: 4º Congresso Luso-Brasileiro para o Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável.
- Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS). 2020. *Zoneamento ecológico-econômico da região metropolitana de Belém: Boletim 3: Sub-bacia do Lago Água Preta*. Governo do Estado do Pará.
- Souza C. C. M. de. 2011. A bacia hidrográfica do Lago Água Preta e os impactos ambientais provocados pela urbanização. *Revista Geonorte*, **2**(5): 47–56.
- Souza S. I. de. 2016. *Diagnóstico da qualidade da água do Lago Água Preta: subsídios para recuperação ambiental da bacia hidrográfica*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Pará, 115 p.
- Thomaz S. M. & Bini L. M. 2003. Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas em reservatórios. *Revista Brasileira de Biologia*, **63**(4): 783–796.
- Tundisi J. G. 2006. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. *Estudos Avançados*, **20**(58): 7–16.
- Tundisi J. G., Matsumura-Tundisi T. & Abe D. S. 2008. *Limnologia*. São Paulo, Oficina de Textos.
- Vasconcelos V. *et al.* (014). Qualidade da água em reservatórios urbanos: Estudo de caso dos lagos Água Preta e Bolonha em Belém, Pará. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **19**(3): 197–208.

Von Sperling M. 2005. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. [S.l.], UFMG.

Wetzel R. G. 2001. *Limnology: lake and river ecosystems*. 3rd ed. [S.l.], Academic Press.