

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS - MG**

Instituto de Ciências da Natureza

Curso de Geografia Bacharelado

**RAIANE CRISTINA PEREIRA**

**ANÁLISE PRELIMINAR DO COMPORTAMENTO DA  
TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE AQUÁTICA NO LAGO  
TEFÉ-AM COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE  
AMBIENTAL**

**Unifal**  
**Universidade Federal de Alfenas**

Alfenas - MG

2024

**RAIANE CRISTINA PEREIRA**

**ANÁLISE PRELIMINAR DO COMPORTAMENTO DA  
TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE AQUÁTICA NO LAGO  
TEFÉ-AM COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE  
AMBIENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de **Bacharel** em Geografia pelo Instituto de Ciências da Natureza da Universidade Federal de Alfenas- MG, sob orientação do Prof. Dr. Rodrigo José Pisani.

Alfenas – MG  
2024

## Banca Examinadora

---

Titulação, nome completo e instituição do Orientador

---

Titulação, nome completo e instituição do Avaliador 01

---

Titulação, nome completo e instituição do Avaliador 02

Alfenas (MG), \_\_/\_\_/\_\_\_\_

---

Resultado

## **Epígrafe**

*A natureza deve ser considerada como um todo,  
mas deve ser analisada em detalhe.*

*Mário Bunge*

## Dedicatória

*Aos meus pais e amigos, dedico.*

## **Agradecimentos**

Aos meus pais, Bernadete e Luis, por todo o zelo, ajuda e confiança para que eu pudesse terminar a graduação.

Aos meus padrinhos, Maria Amélia e André Baganha por todas as portas que me abriram para que eu ingressasse na Universidade, minha eterna gratidão a vocês.

Aos amigos Glauco, Elisabeth e Sebastião de Assis (*in memoriam*) por todo apoio e incentivo para que eu conseguisse atingir o ensino superior.

Aos amigos e amigas que “deram” e “foram” casa durante a graduação, em especial Eduardo Ananias, Arthur Ouro Preto, Mariana Vasconcelos, Pedro Freitas, Luan Nascimento, Guilherme Albuquerque e Gabriel Tonelotti. Minha eterna gratidão a vocês.

Aos queridos da República Masmorra, da Pensão, Casinha, República Maracutaia e República dos Cupins, por toda a vivência e aprendizado. Vocês tornaram meus dias muito mais leves.

À equipe de geoprocessamento da Cooxupé, pelo aprendizado, confiança e pela oportunidade de estágio.

À equipe da Brigada, pela amizade e inúmeros aprendizados na minha passagem pelo Sesc Pantanal.

Ao corpo docente do Instituto de Ciências da Natureza, por todo o aprendizado, em especial aos professores Marcelo de Oliveira Latuf, Rodrigo José Pisani e a professora Maria José dos Santos Wisniewski, por toda paciência e por todo o conhecimento repassado ao longo da graduação, meu muito obrigado!

## Resumo

O Lago Tefé vêm se tornado um exemplo emblemático dos impactos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas lênticos na Amazônia. A intensificação de eventos extremos regionais, como secas severas e cheias históricas, tem alterado drasticamente a dinâmica hidrológica do Lago, reduzindo sua conectividade com áreas alagáveis, além de estar associado ao superaquecimento sua temperatura. Esses desafios evidenciam a necessidade de estratégias integradas de conservação e mitigação dos impactos climáticos na Amazônia. Porém, devido à sua localização remota, a descontinuidade de redes de monitoramento é comum, necessitando de modelos alternativos para a proposição de diagnósticos ambientais. Nesse sentido, o sensoriamento remoto vem apresentando importantes contribuições. No presente estudo, utilizando-se produtos Landsat 8, e da metodologia de Ermida et al. (2020) para a recuperação de temperatura de superfície, foram processadas em nuvem onze imagens na região do lago Tefé, com o intuito de analisar a variação de temperatura e de área alagada entre 2014 e 2024. Como resultado, obteve-se que a menor área alagada da série correspondeu ao ano de 2023 (51 km<sup>2</sup>) e a maior área alagada em 2015 (280 km<sup>2</sup>). Quanto a valores de temperatura, o maior valor registrado correspondeu ao ano de 2020, e a menor temperatura em setembro de 2022. Quanto à averiguação estatística, a regressão linear entre os valores obtidos de área alagada e temperatura de superfície não apresentaram resultados satisfatórios, indicando que não existe uma boa correlação entre as variáveis. Constatou-se que a ausência de dados secundários dificulta a validação robusta da metodologia, mas os resultados fornecem um diagnóstico preliminar sobre as alterações no lago ao longo do tempo. O estudo reforça a importância do monitoramento contínuo e do uso de tecnologias inovadoras para compreender e mitigar os efeitos das mudanças climáticas na região.

**Palavra-chave:** Sensoriamento Remoto Termal; Limnologia; Processamento em nuvem; Amazônia; Mudanças climáticas.

## Abstract

Lake Tefé serves as a critical case study of the impacts of climate change on lentic ecosystems in the Amazon. The increasing frequency and intensity of extreme climatic events, such as severe droughts and unprecedented floods, have substantially disrupted the hydrological dynamics of the lake. These changes have led to a reduction in its connectivity with adjacent floodplains and have been associated with rising surface water temperatures. Such disturbances pose significant challenges to biodiversity conservation and the livelihoods of local communities, highlighting the urgent need for integrated strategies to mitigate climate impacts in the region. However, the remote location of Lake Tefé often results in discontinuous monitoring efforts, necessitating the application of alternative methodologies for environmental assessment. In this study, remote sensing techniques played a pivotal role. Landsat 8 imagery and the surface temperature retrieval method proposed by Ermida et al. (2020) were employed to process 11 cloud-based datasets from the Lake Tefé region, spanning the period from 2014 to 2024. The findings revealed that the smallest recorded flooded area occurred in 2023 (51 km<sup>2</sup>), whereas the largest was observed in 2015 (280 km<sup>2</sup>). Surface temperature analysis indicated the highest value in 2020 and the lowest in September 2022. Statistical evaluation through linear regression demonstrated weak correlations between flooded area and surface temperature, suggesting the influence of additional environmental factors. While the absence of secondary data complicates the robust validation of the applied methodology, the results provide a preliminary insight into the temporal evolution of the lake's hydrological behavior. This study underscores the critical importance of continuous monitoring and the adoption of advanced technologies to enhance understanding and inform adaptive management strategies addressing climate change impacts in the Amazon region.

**Keywords ou Palabra-clave:** Thermal Remote Sensing; Limnology; Cloud processing; Amazon; Climate change.

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> - Fatores envolvidos na dinâmica de sistemas aquáticos continentais.....	21
<b>Figura 2</b> - Principais etapas do ciclo hidrológico.....	22
<b>Figura 3</b> - Estratificação térmica de sistemas lênticos (zonação).....	24
<b>Figura 4</b> - Modelo de inundação de matas de várzea na Amazônia.....	24
<b>Figura 5</b> - Dinâmica de fluxo de calor e energia em sistemas lênticos.....	27
<b>Figura 6</b> - Representação do espectro eletromagnético.....	32
<b>Figura 7</b> - Representação da geometria de aquisição formada pelo ângulo sólido.....	33
<b>Figura 8</b> - Representação do comportamento da radiação solar no sistema aquático.....	34
<b>Figura 9</b> - Localização da área de estudo.....	39
<b>Figura 10</b> - Diagrama metodológico.....	43
<b>Figura 11</b> - Dinâmica espaço-temporal da área alagada.....	46
<b>Figura 12</b> - Demonstrativo da área alagada a partir da escolha do índice.....	47
<b>Figura 13</b> - Relação cotas x pluviosidade segundo dados da estação 12900001.....	49
<b>Figura 14</b> - Variação do comportamento de temperatura da superfície do Lago Tefé.....	54
<b>Figura 15</b> - Regressão estatística considerando área alagada e temperatura de superfície.....	57

## Lista de quadros

<b>Quadro 1</b> - Seleção das passagens do Satélite Landsat 8.....	41
<b>Quadro 2</b> - Correlação entre índices utilizados em cada passagem e valor de área alagada obtida.....	45

## **Lista de siglas**

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento

AWEI - Automated Water Straction

ENOS - El Niño-Oscilação Sul

GEE - Google Earth Engine

IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Renováveis

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

Landsat 8 – Satélite Nasa

MNDWI- Modified Normalized Difference Water Index

NDWI- Normalized Difference Water Index

OMA- Oscilação Multidecenal do Atlântico

SMAS - Sistema de Monções da América do Sul

USGS – United States Geological Survey

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>14</b>
<b>3 OBJETIVO.....</b>	<b>18</b>
3.1 Objetivo geral.....	18
3.2 Objetivos específicos.....	18
<b>4 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>19</b>
4.1 Dinâmica aquática em sistemas lênticos.....	19
4.1.1 Dinâmica externa: percepção do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica.....	20
4.1.2 Dinâmica interna: considerações físicas, químicas e biológicas no sistema lêntico.....	22
4.2 Fenômenos climáticos e a alteração no meio aquático: contexto geral e amazônico.....	28
4.4 Sensoriamento Remoto Aquático e Termal.....	31
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
5.1 Área de estudo.....	39
5.2 Procedimentos metodológicos.....	41
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>58</b>
<b>8 ANEXOS.....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os efeitos da crise climática sobre a disponibilidade hídrica vêm destacando temáticas relacionadas ao monitoramento da temperatura superficial e seu potencial na projeção e diagnóstico da condição ambiental em amplitudes multiescalares. No contexto Amazônico, essa abordagem tem se mostrado particularmente relevante, considerando a vulnerabilidade dos sistemas aquáticos e a complexidade de sua hidrodinâmica.

O aumento da temperatura das águas e a redução das áreas alagáveis, frequentemente associados a eventos extremos como o El Niño, têm afetado diretamente o equilíbrio ecológico de corpos hídricos como o Lago Tefé. Como resultado, perdas ecossistêmicas e socioeconômicas são cada vez mais recorrentes.

Frente a tais extremos climáticos, o aumento da demanda por redes de monitoramento eficazes capazes de oferecer dados em larga escala e de maneira contínua, vem tornado o sensoriamento remoto uma ferramenta eficaz na análise e obtenção de diagnósticos ambientais. Estudos baseados em sensoriamento remoto demonstram que as anomalias de temperatura superficial podem servir como indicadores sensíveis de alterações na dinâmica hidrológica e nos padrões de precipitação, possibilitando uma compreensão mais detalhada das respostas ambientais às mudanças climáticas globais.

Na região de Tefé, como ainda são incipientes os levantamentos das características físicas do Lago, o presente estudo propõe, via sensoriamento remoto e processamento em nuvem, obter dados preliminares sobre a variação espaço temporal da água alagada e da temperatura de superfície aquática do corpo hídrico. Com os dados obtidos, espera-se traçar o perfil de comportamento da água no Lago Tefé no período de vinte anos (2014-2024), apontando dados secundários importantes referentes à aplicação de metodologias de obtenção de dados sobre as variáveis supracitadas, usabilidade de produtos Landsat 8 para esse fim na área de interesse e levantar informações para divulgação científica e aplicação de políticas públicas frente à extremos climáticos na região amazônica.

## 2 JUSTIFICATIVA

Mudanças climáticas marcaram a história evolutiva do planeta: eras glaciais, secas severas e intensos eventos de chuva são relatados em pesquisas paleontológicas (Eerola, 2003; Azevedo; Marques, 2008). Eventos estes, remontam da evolução da atmosfera terrestre, na qual variações de oxigênio, dióxido de carbono e radiação se fizeram presentes. Nos dois últimos séculos, com a abundante emissão de dióxido de carbono e ademais gases de efeito estufa, alterações nos padrões atmosféricos vêm sendo observados de forma acelerada, refletindo no aumento das temperaturas médias mundiais e na intensificação de fenômenos climáticos extremos (Marengo et al., 2018; IPCC, 2021).

Dentre os fenômenos climáticos intensificados, têm-se o El Niño e La Niña. Reconhecidos como uma anomalia de temperatura no Oceano Pacífico Equatorial, estes, possuem como característica principal a influência no padrão de circulação atmosférica em maior parte do continente Americano, Regiões Centrais da África e Sudeste Asiático. No Brasil, a influência dos fenômenos concentra-se na intensificação de comportamentos associados aos Sistema de Monções da América do Sul (SMAS) e à Oscilação Multidecenal do Atlântico (OMA), responsáveis pelo regime de distribuição de chuvas em todo país (Ambrizzi et al., 2013; Marengo, 2008; Nobre; Sampaio; Salazar, 2007; Conti, 2005; Nobre; Reid; Veiga, 2012).

A efeitos de exemplo, nos últimos 20 anos, a Amazônia tem experimentado uma perda significativa de água e volumes de precipitação, apresentando impactos críticos na biodiversidade e na população. Dados do MapBiomias Água mostram que, desde 1985, a área de cobertura de água na região amazônica tem se reduzido drasticamente, intensificando-se a partir de 2000. Esta, decorrente de uma combinação de fatores como desmatamento e o aumento de eventos climáticos extremos, como as secas e inundações (MapBiomias, 2023).

Em 2023, a região enfrentou uma das piores secas já registradas, afetando mais de meio milhão de pessoas. Esse evento ilustra um novo padrão de seca mais frequente e duradoura na Amazônia, interrompendo as tradicionais dinâmicas hídricas e dificultando a navegação e o acesso à água para as comunidades locais (MapBiomias, 2024). Nesse contexto, também se enquadra a região de Tefé, Estado do Amazonas, que possui o Lago Tefé como importante recurso hídrico (G1, 2024; Jornal da Unesp, 2024).

Frente à problemática, a demanda por redes de monitoramento contínuas se torna uma prioridade, uma vez que direciona diagnósticos na aplicação de políticas públicas voltadas a contornar o estado crítico atual (ICMBio, 2024; IBAMA, 2024). Apesar da existência de uma

rede de monitoramento nacional voltada ao acompanhamento de variáveis meteorológicas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e de variáveis quali quantitativas de recursos hídricos pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a remotividade da área torna os custeios de acesso e manutenção de estações elevados (DCD, 2024), havendo descontinuidade de grande parte dos postos e lacunas de dados que impossibilitam o monitoramento contínuo (Duarte; Cunha; Lima, 2006; Fiquem Sabendo, 2021).

Como alternativa, cada vez mais o levantamento de informações espaço-temporais de origem remota vêm sendo adotados para a mitigação do problema. Estudos como Maciel (2019), Alsdorf (2010), Mongabay (2020), confirmam a aplicabilidade de técnicas de Sensoriamento Remoto para o monitoramento de características aquáticas. Quali e quantitativamente, obtiveram importantes resultados para a ampliação de dados ambientais em diversas escalas espaço temporais e vem sendo importante ferramenta de tomada de decisões, visto que direciona ações de manejo.

Devido ao elevado volume de dados que o processamento de imagens em séries históricas demanda, o processamento em nuvem vem facilitando a portabilidade e otimização de obtenção de dados sobre a superfície. Como afirmado em especulações de Brito (2022) e Novo (2007), a incipiente informação sobre dados de qualidade da água em larga escala no Brasil tem aberto espaço para a aplicação de diversas metodologias e ferramentas de obtenção de dados via satélite.

Dentre as ferramentas, a plataforma de processamento em nuvem *Google Earth Engine*, vem apresentando importante desempenho na manipulação de *big data* e no processamento de variáveis hidrológicas em larga escala (Righi, 2024). Em muitos casos, metodologias já validadas estão sendo reaplicadas várias localidades utilizando novas calibrações na tentativa de melhoria da acurácia dos dados obtidos e assim, tornar o monitoramento total ou parcialmente remoto por meio de *deep learning* (Santos, 2020).

Como apontado por Barbosa et al (2019), alguns dos grandes desafios nesse tipo de abordagem, também remete à escolha dos produtos a serem utilizados para esse fim. No acompanhamento de características hidrológicas em águas interiores, a escala de abordagem deve ser considerada, para tanto, sensores com resolução espacial inferior à 100m são mais indicados, pois permitem com maior precisão a identificação de mudanças na cobertura hídrica ao longo do tempo (Oliveira et al., 2020).

Entre as variáveis hidrológicas aptas a serem analisadas pelos métodos supracitados, estão a temperatura de superfície aquática e a superfície ou área alagada. A primeira variável é responsável pela manutenção da dinâmica de estratificação térmica e fatores associados ao fenômeno. Sua obtenção via produtos orbitais vem sendo explorados com sensores a bordo do satélite MODIS possuindo cobertura diária e resolução espacial de 1km (La et al., 2022), e para estudos mais detalhados, toda a série do satélite Landsat têm sido explorada, possuindo cobertura a cada 16 dias e resolução espacial de 100m para as bandas termais (Maciel, 2019).

Quanto à superfície alagada, em específico nos sistemas lênticos, caracterizados por serem altamente suscetíveis a mudanças sazonais e climáticas que afetam sua extensão (como pulsos de inundação e seca), o uso de imagens de satélite facilita a observação contínua e abrangente dessas mudanças. Dentre os satélites comumente utilizados para monitoramento de águas interiores, destacam-se as missões Landsat (principalmente Landsat 8 e 9) e Sentinel-2 que possuem produtos satelitais com imagens de alta resolução espacial e temporal (Melo; Schmidt; Gonçalves, 2020; Lima et al., 2019).

Para extrair informações sobre a extensão da área alagada, são amplamente empregados índices espectrais como o NDWI (*Normalized Difference Water Index*), MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) e AWEI (*Automated Water Extraction Index*). A efeitos de exemplo, o NDWI é usado para realçar corpos d'água com base na combinação das bandas verde e do infravermelho próximo, ajudando a diferenciar a água de áreas vegetadas. O MNDWI, uma variação do NDWI que substitui o infravermelho próximo pelo infravermelho médio, é eficaz para minimizar o efeito de objetos urbanos em áreas alagadas. Já o AWEI, desenvolvido para aumentar a precisão em áreas de sombra e em ambientes com mistura de solo e água, é particularmente útil em áreas complexas, como regiões pantanosas e com vegetação densa, condição observada na área de estudo (Mustafa et al., 2017).

Por outro lado, a aplicação de metodologias avançadas, como a recuperação de temperatura por imagens satelitais, tem oferecido insights valiosos sobre os impactos das mudanças climáticas em escalas regionais. Essas iniciativas reforçam a importância do uso de tecnologias inovadoras para compreender as interações climáticas e hidrológicas, informando políticas públicas para mitigar os efeitos adversos sobre a disponibilidade hídrica e a sustentabilidade ambiental na Amazônia.

Dentre as metodologias de recuperação de temperatura de superfície, a preposição de Ermida et al. (2020) representa um avanço significativo no processamento de imagens termais. Essa técnica envolve a conversão de medições de radiância do sensor para

temperaturas de superfície, utilizando algoritmos que corrigem efeitos atmosféricos e emissividade. O modelo emprega dados auxiliares, como perfis atmosféricos e condições de emissividade da superfície, para gerar estimativas de temperatura mais precisas. Esta, tem demonstrado potencial na detecção de anomalias térmicas associadas a eventos climáticos extremos, como secas severas ou períodos de intensa precipitação, sendo uma ferramenta estratégica para estudos de hidrologia e gestão ambiental, e será utilizada no presente trabalho.

Dessa maneira, o presente estudo possibilita o acompanhamento espaço temporal de dinâmicas ambientais utilizando o sensoriamento remoto como ferramenta. Os dados obtidos possuem potencial de interpretação sobre os efeitos das mudanças climáticas em ambientes sensíveis ecologicamente, como no caso do Lago Tefé. Frente à crise enfrentada regionalmente, o presente trabalho poderá vir a compor um banco de dados sobre as características físicas do Lago frente à incipiência de dados e de trabalhos de temperatura de superfície aquática na região, auxiliando a aplicação de políticas públicas na mitigação de problemas oriundos de mudanças climáticas.

### **3 OBJETIVO**

#### **3.1 Objetivo geral**

Avaliar o comportamento da Temperatura Superficial da Água no Lago Tefé, com base na metodologia de recuperação proposta por Ermida et al. (2020) e produtos Landsat 8 processados em plataforma em nuvem.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Dentre os objetivos específicos, têm-se:

- i) Desenvolver e adaptar um script na plataforma *Google Earth Engine* para o processamento matricial;
- ii) Estatisticamente, averiguar a correlação entre as variáveis temperatura de superfície vs área alagada, com base na série histórica do Landsat 8 (2014-2024) para a estação seca do Bioma Amazônico;
- iii) Analisar espaço-temporalmente as variações de área alagada e temperatura de superfície no corpo hídrico via Sistema de Informação Geográfica;

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Dinâmica aquática em sistemas lênticos

De acordo com Meneses et al (2019),

“Todo sistema aquático pode ser descrito por suas propriedades físicas (temperatura, densidade, velocidade do fluxo, campo de luz), químicas (nutrientes, saturação de oxigênio, alcalinidade) e biológicas (produtividade, biodiversidade). Essas propriedades variam no tempo e no espaço em função das condições no contorno, tais como substrato geológico e o uso e a ocupação da terra nas imediações do corpo d’água, e das características geométricas e da localização geográfica do sistema aquático” (Meneses et al., 2019, p.229)

Segundo esse parâmetro de classificação, quanto à localização geográfica, sistemas aquáticos são organizados entre marinhos e aquáticos continentais. Dentre os continentes, outra subdivisão adotada, segue critérios quanto ao fluxo de água no sistema: para ambientes com fluxo contínuo e tempo de permanência (tempo necessário para que a água do sistema seja substituída) menor, têm-se ambientes fluviais ou lóticos, como os rios. Por outro lado, ambientes com menor fluxo contínuo e tempo de permanência maior da água em seu percurso, caracterizam os sistemas lênticos ou lacustres, a exemplos de lagos e reservatórios (Menezes et al, 2019; Tundisi, 2008).

Nos ambientes lóticos, a água está em constante movimento, influenciando diretamente os processos de oxigenação e transporte de sedimentos. Nele, os organismos são adaptados às correntes, necessitando de estratégias para resistir ao fluxo ou tirar proveito da correnteza para alimentação e dispersão (Allan; Castillo, 2007).

Já sistemas lênticos, caracterizam-se pela estratificação térmica e pela presença de uma coluna d’água relativamente estável, na qual a água tende a aquecer-se e resfriar lentamente, influenciando o desenvolvimento de ecossistemas com pouca movimentação (Wetzel, 2001). Nesse meio, a vida aquática tende a adaptar-se a condições de baixa renovação de nutrientes e oxigênio, além de apresentar uma menor variabilidade nas condições abióticas ao longo do tempo (Margalef, 1983).

Tanto as características físicas como as bioquímicas dos sistemas aquáticos continentais são diretamente influenciadas pela bacia hidrográfica em que estão inseridos, sendo diretamente suscetíveis à mudanças naturais e humanas. Isto pois, o fluxo hídrico que nela atua e é transportado aos corpos hídricos, é direcionado segundo sua própria hidrodinâmica (Christofolletti, 1981; Tundisi, 2008).

De forma geral, fatores externos atuantes, como, condições meteorológicas (temperatura do ar e da água), radiação solar (troca de calor), umidade relativa, velocidade e direcionamento do vento, localização (latitude, longitude e altitude) também são influentes sobre o comportamento morfodinâmico da própria bacia e da natureza de fluxo que chega ao sistema. Em decorrência, a dinâmica interna do corpo hídrico se adequa às condições externas impostas, na tentativa de manter o equilíbrio de sua estratificação, mistura vertical, densidade e fluxo, garantidores estes da manutenção da vida aquática associada (Christofoletti, 1981; Tundisi, 2008).

#### **4.1.1 Dinâmica externa: percepção do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica**

Em estudos ambientais, a incorporação de elementos naturais como constituintes de sistemas complexos interrelacionados, os tornam objeto analítico abrangente à multidisciplinaridade e multiescalaridade. Sob esta ótica, a Teoria Geral dos Sistemas, apresenta importantes contribuições no que tange a compreensão das dinâmicas naturais e de suas interações com os mais diversos componentes coexistentes da paisagem (Bertalanffy, 1975; Rodrigues, 2001).

A teoria parte do princípio de que os sistemas são conjuntos de elementos interdependentes que interagem entre si e com o ambiente, formando uma estrutura organizada. Ao invés de analisar cada componente isoladamente, a Teoria Geral dos Sistemas considera que as propriedades e comportamentos emergentes de um sistema não podem ser reduzidos à soma de suas partes.

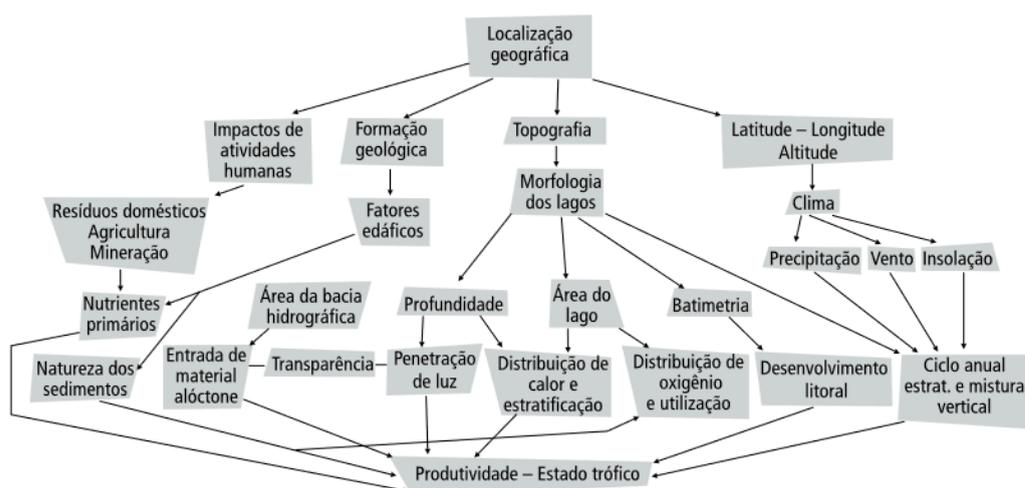
Christofoletti (1981) aponta que os maiores desafios nesse nível de abordagem consiste na identificação dos elementos, atribuições, relações e abrangência desse sistema que correspondem às alternâncias de componentes e processos. Segundo o autor, os componentes e processos correspondem à matéria (elemento a ser mobilizado), à energia (forças físicas que proporcionam o funcionamento do sistema pela capacidade de realizar trabalho) e a estrutura (conjunto dos elementos e suas relações).

Um lago, apesar de ser um sistema em si só, também é constituinte de sistemas maiores, como o ciclo hidrológico e a bacia hidrográfica. O ciclo hidrológico como um sistema, traz consigo o entendimento da circulação, ocorrência e distribuição da água ao longo das mudanças de seu estado físico (expressos via precipitações, escoamentos subterrâneos e superficiais e pela evapotranspiração), e ao entendimento da dinâmica de meios associados (solo-planta-atmosfera-sociedade) (Klaus, 2016; Garcez e Alvarez, 1988; Tucci, 2012).

Para efeitos escalares, a delimitação do ciclo hidrológico em sua fase terrestre, em suma, traz a bacia hidrográfica como elemento fundamental de análise (Santos et al., 2001). Esta é compreendida como uma área de captação delimitada por fronteiras naturais, na qual a movimentação de água e matéria ao decorrer de sua estrutura, possui o escoamento direcionado a pontos de drenagem específicos, como rios e lagos.

Como unidade territorial, permite tanto a visão integrada dos processos hidrológicos nela atuantes (como escoamento, infiltração e armazenamento de água no solo) como também o entendimento de como suas características físico-químicas e seu uso e ocupação determinam a quantidade e qualidade dos sedimentos, nutrientes e poluentes transportados para os corpos d'água, como consta na Figura 1.

**Figura 1** - Fatores envolvidos na dinâmica de sistemas aquáticos continentais.

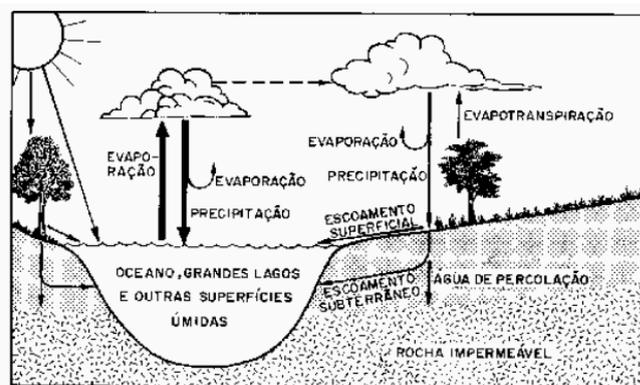


Fonte: Tundisi (2008).

No decorrer de toda essa dinâmica, a radiação solar desempenha um papel essencial, fornecendo energia para processos de evaporação, transpiração e aquecimento de corpos d'água. No contexto das bacias hidrográficas, a radiação inicia o ciclo de evapotranspiração, onde a água é transferida para a atmosfera, promovendo a formação de nuvens e precipitação. Esse fluxo energético constante impacta diretamente a disponibilidade de água em rios, lagos e aquíferos. Sob a influência da radiação, também ocorrem variações de temperatura que, em conjunto com a precipitação, regulam a distribuição sazonal de água nas bacias, afetando o escoamento superficial e o armazenamento hídrico (Christofoletti, 1981). Esse fenômeno é especialmente importante em regiões de clima tropical, onde a radiação intensa acelera o ciclo

de renovação das águas superficiais e contribui para a recarga dos sistemas aquíferos (Christopherson; George, 2020; Tucci, 2012).

**Figura 2** - Principais etapas do ciclo hidrológico.



Fonte: Esteves (1998)

Nos sistemas lânticos, a radiação solar impacta diretamente a natural dinâmica térmica, causando aquecimento da camada superficial da água e estabelecendo gradientes de temperatura ao longo da coluna d'água. Esse aquecimento cria a chamada estratificação térmica, na qual a radiação aquece as camadas superficiais, tornando-as menos densas que as camadas mais profundas e frias, impedindo assim a mistura vertical. Esse fenômeno limita a redistribuição de oxigênio e nutrientes ao longo da coluna d'água, podendo afetar a biota aquática e desencadear zonas de hipoxia nas profundezas do lago, além de desencadear processos fotossintéticos nas zonas mais iluminadas que favorecem o crescimento de fitoplâncton e macrófitas, que, a longo prazo, modificam a composição química da água e as condições ecológicas do ecossistema em questão (Wetzel, 2001; Thomas et al., 2021).

#### **4.1.2 Dinâmica interna: considerações físicas, químicas e biológicas no sistema lântico**

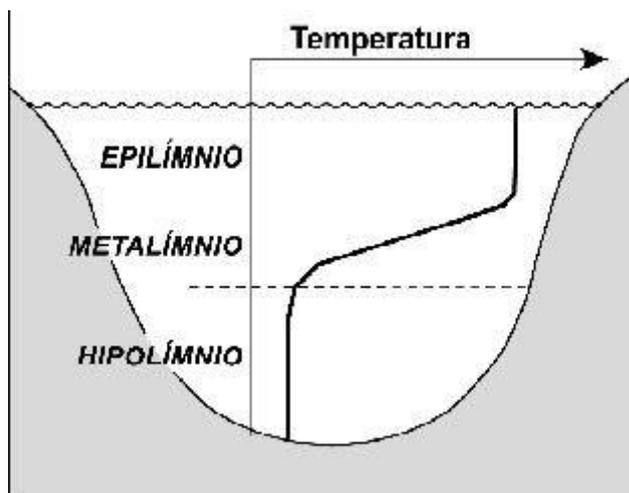
As características físico-químicas da água exercem influência direta sobre a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas aquáticos, especialmente em lagos, uma vez que definem processos hidrodinâmicos e biogeoquímicos nesses ambientes (Esteves, 1998). Entre elas, destaca-se a alta capacidade calorífica, que permite à água absorver e liberar grandes quantidades de energia térmica sem variações significativas de temperatura. Essa característica é possível graças às ligações de hidrogênio que mantêm as moléculas unidas, conferindo estabilidade térmica ao ambiente aquático (Wetzel, 1983). Apesar da estabilidade

térmica, a radiação que alcança esses sistemas hídricos dinamizam o meio através de seu comportamento energético. Assim, compreender a relação entre a temperatura e as características da água e do meio em que está inserida torna-se essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos e para a preservação do equilíbrio ecológico (Esteves, 1998).

Além do calor específico, a água possui outras propriedades intrínsecas como a densidade, viscosidade, a tensão superficial e o pH. A densidade da água é um parâmetro físico que varia com a temperatura, pressão e concentração de substâncias dissolvidas, como sais. É responsável por fenômenos importantes, como a flutuação do gelo, que mantém as camadas inferiores em estado líquido, garantindo a sobrevivência de organismos durante o inverno em regiões temperadas (Esteves, 1998; Tundisi, 2008; Wetzel, 1993). Em lagos tropicais, como os amazônicos, a densidade está intrinsecamente ligada à estratificação térmica, que regula a circulação de nutrientes e oxigênio na coluna d'água (Horne; Goldman, 1994). Isto ocorre devido ao modo de circulação que se torna propício pela dispersão e “transporte causado pelo movimento vertical da água decorrente de diferenças de densidade ao longo da coluna de água.” (Barbosa et al., 2019, p.14).

A estratificação térmica, um fenômeno comum em lagos tropicais, é caracterizada pela formação de três zonas térmicas distintas: o epilímnio (camada superficial aquecida), o metalímnio (camada de transição) e o hipolímnio (camada fria e profunda). Essa separação é mantida por diferenças de densidade associadas às variações de temperatura, criando barreiras físicas que dificultam a troca de nutrientes e oxigênio entre as camadas. Em lagos amazônicos, por exemplo, a estratificação é mais pronunciada durante os períodos de menor pluviosidade, quando a estabilidade térmica é menos perturbada pelas correntes de convecção geradas por chuvas intensas ou ventos (Esteves, 1998; Tundisi, 2008).

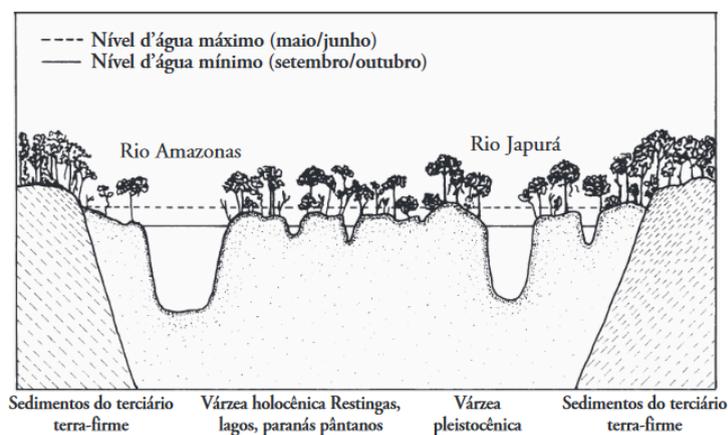
**Figura 3** - Estratificação térmica de sistemas lênticos (zonação).



Fonte: Gonçalves (2001)

Durante a estação chuvosa, a mistura vertical na coluna d'água é promovida por grandes volumes de água que entram no sistema, redistribuindo nutrientes e oxigênio (Tundisi et al, 2002). Essa dinâmica é especialmente importante nos lagos amazônicos, onde as cheias conectam os lagos às planícies de inundação, transportando matéria orgânica e nutrientes das florestas alagadas para o corpo d'água (vide Figura 4). Esse fenômeno, conhecido como pulso de inundação, enriquece a biota aquática e aumenta a produtividade primária, enquanto regula os ciclos de carbono e nutrientes (Junk et al., 1989). Por outro lado, nos períodos de seca, a estratificação térmica e a redução no volume de água podem levar à formação de zonas de hipoxia ou anoxia, especialmente no hipolímnio, prejudicando a biota dependente de oxigênio dissolvido (Sousa et al., 2021).

**Figura 4** - Modelo de inundação de matas de várzea na Amazônia.



Fonte: Ayres (2006).

Outra propriedade física de grande relevância é a viscosidade da água, que diminui com o aumento da temperatura, influencia a sedimentação de partículas suspensas, como sedimentos e organismos planctônicos. Em águas mais quentes, a viscosidade reduzida permite que partículas afundem mais rapidamente, afastando o fitoplâncton das zonas mais iluminadas e diminuindo a eficiência da fotossíntese. Já o elevado calor específico da água, permite a absorção e liberação de grandes quantidades de energia térmica com pequenas variações de temperatura. Essa capacidade térmica atua como um regulador climático e estabilizador do ambiente aquático, protegendo organismos contra mudanças abruptas de temperatura (Esteves, 1998; Tundisi, 2008; Martins, 2013).

A tensão superficial da água, determinada pelas ligações de hidrogênio, também desempenha papel crucial no transporte de gases e na penetração de luz solar. Em lagos amazônicos, por exemplo, onde a turbidez frequentemente é alta devido à carga de sedimentos e matéria orgânica, a transparência da água é um fator limitante para a fotossíntese. Durante os períodos de cheia, a entrada de sedimentos finos aumenta a dispersão e absorção da luz, reduzindo a profundidade da zona eufótica e impactando a produção primária. Por outro lado, em períodos de seca, a menor turbidez favorece a penetração de luz, ampliando a fotossíntese nas camadas superiores da coluna d'água mas a redução do volume de água pode concentrar poluentes e aumentar a vulnerabilidade do ecossistema a impactos externos (Esteves, 1998; Tundisi, 2008; Tundisi et al, 2022; Sousa et al., 2021).

Outro fator relevante é o pH da água, que nos lagos amazônicos pode variar amplamente devido à influência de matéria orgânica alóctone e processos de decomposição. Durante as cheias, a entrada de matéria orgânica ácida pode reduzir o pH da água, afetando a solubilidade de nutrientes e a disponibilidade de metais tóxicos. Por outro lado, em períodos de seca, a redução do volume de água pode aumentar a alcalinidade, alterando os equilíbrios químicos e biológicos (Wetzel, 1983). Estudos indicam que essas mudanças têm implicações diretas na biodiversidade e na resiliência dos ecossistemas aquáticos da Amazônia.

Dado o entendimento das características da água supracitadas, torna-se evidente que a temperatura da água exerce influência direta sobre seus atributos químicos e físicos, podendo também, influenciar a distribuição de espécies e o metabolismo dos organismos desse ecossistema. Quimicamente, o balanço de calor regula a solubilidade de gases, como oxigênio e dióxido de carbono, e afeta diretamente as taxas metabólicas de organismos aquáticos. Em temperaturas mais elevadas, a solubilidade do oxigênio diminui, enquanto as demandas metabólicas dos organismos aumentam, criando um cenário desafiador para a sobrevivência

de muitas espécies em lagos tropicais (Horne; Goldman, 1994). Ademais, a decomposição da matéria orgânica, intensificada pelas altas temperaturas, pode aumentar a concentração de nutrientes, favorecendo processos de eutrofização, alterando drasticamente a qualidade da água e a composição da biota (Martins, 2013).

Como apontado por Wetzel (1983), o balanço de calor em lagos responsável por tal dinâmica é dominado pela interação entre radiação solar, condução térmica e evaporação, que juntos determinam os gradientes térmicos e a dinâmica da coluna d'água.

A radiação solar é a principal fonte de energia nestes sistemas, penetrando nas camadas superficiais e aquecendo a água. A radiação de ondas curtas (visível e ultravioleta) é responsável pelo aquecimento superficial e pela fotossíntese, enquanto as ondas longas (infravermelho) são rapidamente absorvidas, causando um aquecimento localizado nos primeiros centímetros (TUNDISI, 2008; Wetzel, 1983). Em lagos amazônicos, esse processo é intensificado pela alta incidência solar característica da região, promovendo uma estratificação térmica significativa durante os períodos secos (Martins, 2013).

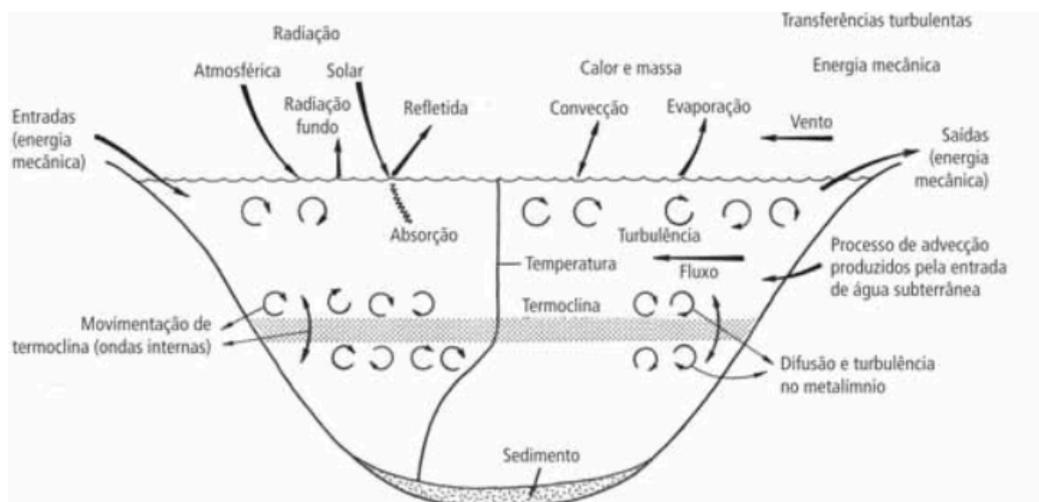
Na condução, o calor é transferido por meio de um meio sólido ou líquido sem a movimentação macroscópica da substância. Nos corpos hídricos, a condução ocorre quando existe uma diferença de temperatura entre a superfície da água e suas camadas mais profundas ou entre a água e o solo subjacente (ou substrato geológico). Devido a excelente condução térmica e capacidade calorífica da água, a transferência de calor ocorre de forma relativamente lenta quando comparada com a radiação e a convecção, mas a torna fundamental para o equilíbrio térmico interno do corpo d'água (Jensen, 2011).

A efeitos de exemplo, nas regiões mais profundas de um corpo hídrico, o contato entre a água e o substrato terrestre leva à troca de calor por condução. Essa, é mais intensa quando o solo tem uma temperatura significativamente diferente da água, como observado em regiões com variações sazonais marcadas de temperatura. Ademais, a condutividade térmica da água diminui com o aumento da profundidade, como resposta ao menor recebimento da energia radiante (Martins, 2013).

Já na evaporação, as moléculas de água ao ganharem energia térmica suficiente, rompem as ligações de hidrogênio e passam para a fase gasosa, sendo responsável por uma significativa perda de água no sistema, podendo afetar a área alagada e influenciando alterações no ciclo hidrológico. Esse fenômeno é intensamente influenciado pela radiação solar, pela temperatura da água e do ar, pela umidade relativa e pela velocidade do vento,

agentes que configuram o balanço de radiação solar e a capacidade do ar de absorver vapor d'água (Allen et al., 1998), como previsto na Figura 5.

**Figura 5** - Dinâmica de fluxo de calor e energia em sistemas lênticos.



Fonte: Tundisi (2008)

Uma importante contribuição da evaporação para sistemas lênticos é a manutenção da área superficial alagada (Baker et al., 2021). Esta é uma dimensão importante, pois indica a área exposta à radiação solar, conseqüentemente da entrada de calor no sistema. Sua redução compromete habitats aquáticos e terrestres, ameaçando espécies que dependem dessas zonas úmidas e prejudicando a biodiversidade local (Freitas et al., 2018). Além disso, a capacidade do lago de armazenar água e regular o ciclo hidrológico é reduzida, agravando problemas como enchentes e secas em áreas adjacentes (Esteves, 2011). Socialmente, populações ribeirinhas e indígenas, que têm nas áreas alagadas uma base para práticas culturais e de subsistência, enfrentam desafios crescentes, incluindo a perda de segurança hídrica e alimentar e agravantes sob o ponto de vista econômico que dependem diretamente desses ecossistemas (ANA, 2017; Fearnside, 2005).

Por fim, a compreensão detalhada das características físico-químicas da água, do balanço de calor e da dinâmica térmica em lagos é essencial para a conservação e manejo desses ecossistemas. A análise integrada de fatores físicos, químicos e biológicos permite identificar os impactos das mudanças climáticas e da ação antrópica, orientando políticas públicas e estratégias de gestão ambiental que garantam a funcionalidade ecológica e a sustentabilidade desses sistemas.

#### **4.2 Fenômenos climáticos e a alteração no meio aquático: contexto geral e amazônico**

Apesar de abranger uma parcela inferior a 10% da superfície terrestre, lagos e reservatórios são importantes provedores de serviços ecossistêmicos e demandas humanas, como transporte e abastecimento. Com o advento das mudanças climáticas, os impactos sobre esses ecossistemas instauram desafios frente a variações na disponibilidade de água, degradação da qualidade hídrica e intensificação de eventos extremos, como inundações e secas, que comprometem a segurança hídrica em escala global.

O aumento da temperatura global média desde a Revolução Industrial tem sido acompanhado pela intensificação de eventos climáticos extremos e mudanças nos padrões de precipitação. Estudos apontam que flutuações climáticas como essa devem-se à dinâmica da intensidade de radiação solar incidente e o efeito estufa, proporcionado principalmente pela quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Como reflexo, dados do IPCC (2021) indicam que a frequência de secas severas pode dobrar até o final do século XXI, com implicações diretas sobre a segurança hídrica e alimentar.

Na América do Sul, tais alterações vêm impactando de forma significativa os padrões de circulação atmosférica em decorrência de alterações em sistemas de transporte de umidade. A efeitos de exemplo, fenômenos como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) - cruciais para a geração de precipitação nas regiões tropical e subtropical -, têm apresentado deslocamentos latitudinais e flutuações na intensidade, resultando em eventos climáticos extremos, como secas prolongadas a norte do continente e chuvas intensas a sul (Espinoza et al., 2021; Marengo et al., 2022).

A ZCIT, caracterizada por uma faixa de baixa pressão ao longo do equador, é formada pela convergência de ventos alísios dos hemisférios Norte e Sul, resultando em intensa convecção e precipitação. A ZCAS, por sua vez, é uma faixa de nebulosidade e precipitação que se estende do sudoeste da Amazônia ao sudeste do Brasil durante o verão austral, influenciada pelo aquecimento diferencial entre terra e oceano e pela circulação de grande escala, como o sistema de monções sul-americano (Marengo et al., 2012; Nobre et al., 2016). Quanto à ZCIT, observa-se um deslocamento para o norte em algumas áreas, reduzindo a precipitação na Amazônia durante períodos críticos. Já a ZCAS tem se tornado menos estável, contribuindo para a intensificação de secas prolongadas e inundações severas (Espinoza Villar et al., 2011).

O El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é caracterizado como um fenômeno climático de grande escala resultante de interações complexas entre o oceano e a atmosfera no Pacífico Tropical. A variabilidade da temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico Tropical, que regula o ENOS, tem desempenhado um papel central nessas mudanças. Durante o El Niño, há um aquecimento anômalo no Pacífico Tropical, enfraquecendo os ventos alísios e deslocando sistemas de precipitação para o norte. Isso reduz significativamente as chuvas na Amazônia, contribuindo para secas severas, como as registradas em 1997-1998 e 2015-2016 (Espinoza Villar et al., 2011). Por outro lado, La Niña, associada ao resfriamento da TSM, intensifica os ventos alísios e reforça a ZCAS, promovendo chuvas acima da média e eventos de cheia, como os observados em 2011 (Davidson et al., 2012; Forsberg et al., 2012).

A efeitos de exemplo, durante eventos de El Niño intensos, como os de 1997-1998 e 2015-2016, houve secas severas na Amazônia, com impactos drásticos sobre a biodiversidade e a conectividade hídrica. Por outro lado, os episódios de La Niña, como o de 2011, foram associados a inundações extremas, especialmente na Bacia Amazônica, impactando comunidades ribeirinhas e ecossistemas frágeis (Davidson et al., 2012; Forsberg et al., 2012).

A Bacia Amazônica, que desempenha um papel vital no ciclo hidrológico global, sofre com mudanças nos regimes de precipitação, agravadas pelo desmatamento e pela conversão de florestas em áreas agrícolas. Esses fenômenos não apenas comprometem a biodiversidade aquática, mas também a subsistência de milhões de pessoas dependentes dos recursos naturais da região (Davidson et al., 2012; Nobre et al., 2016). Como apontado em Barbosa et. al (2019):

“Segundo o relatório de situação dos recursos hídricos do território brasileiro em 2017 (Agência Nacional de Águas, 2017), a disponibilidade hídrica superficial no Brasil encontra-se em torno de 78.600 m<sup>3</sup>/s, o que representa cerca de 30% da vazão média de todos os rios. Contudo, a maior parte dessa disponibilidade (65.617m<sup>3</sup>/s) corresponde à contribuição da bacia Amazônica e está localizada na região norte do país. Esses dados já demonstram por si só, que apesar da imensa disponibilidade de água para o país como um todo, essa riqueza não é distribuída de forma equitativa pelo território brasileiro. Enquanto a bacia Amazônica detém cerca de 70% da produção hídrica brasileira, a bacia do Paraná, a segunda maior bacia hidrográfica brasileira, conta com apenas 6% dessa produção.” (Barbosa et al, 2019, p.11).

Segundo Nobre, Sampaio e Salazar (2007), a Amazônia é um exemplo emblemático de como pressões humanas e mudanças climáticas interagem, exacerbando vulnerabilidades históricas. Relatos arqueológicos apontam diversas anomalias climáticas ao longo dos últimos dois mil anos. Segundo Alves, Marengo e Cavalcanti (2013,p.21), “extremos climáticos de chuva, temperatura e vento”associados a fortes eventos de El Niño, foram responsáveis por

pulsos de seca, seguidas de incêndios florestais de larga escala em diversas porções ao longo dos afluentes do rio Amazonas, rio Negro e na região de San Carlos (Venezuela), enquanto, concomitantemente, eventos extremos de chuva ocorriam no Peru.

Historicamente, a destruição da cobertura florestal afeta o transporte de umidade pela atmosfera, um dos mecanismos-chave que regula o regime hídrico amazônico e mantém a resiliência climática da região. Desde a década de 1970, o avanço do desmatamento e a construção de grandes infraestruturas, como barragens, transformaram a dinâmica hidrológica regional. Modificações como esta, possuem capacidade de intensificar a evapotranspiração e reduzir níveis de precipitação em algumas áreas, com impacto cumulativo sobre a conectividade dos rios e lagos (Brondízio et al., 2019; ANA, 2024). Historicamente, a destruição da cobertura florestal afeta o transporte de umidade pela atmosfera, um dos mecanismos-chave que regula o regime hídrico amazônico e mantém a resiliência climática da região.

Como reflexo, corpos hídricos amazônicos, como o Rio Amazonas e seus tributários, enfrentam múltiplos desafios relacionados às mudanças climáticas, como a redução da vazão em períodos de seca severa. Tais mudanças afetam o transporte de sedimentos, a produtividade pesqueira e a qualidade da água. Lagos amazônicos, por sua vez, apresentam variações extremas no volume, prejudicando tanto os ecossistemas aquáticos quanto às atividades econômicas, como a pesca e o turismo (ANA, 2024; Junk et al., 2011). Esses fenômenos refletem não apenas alterações climáticas globais, mas também intervenções humanas, como o represamento de rios e a exploração mineral, que intensificam os impactos ambientais na região.

Quando se adentra a dinâmica de lagos tropicais, especialmente os amazônicos, encontra-se sistemas altamente dinâmicos e sensíveis às mudanças climáticas. Alterações na temperatura e nos padrões de precipitação influenciam diretamente a estratificação térmica e a oxigenação das águas, comprometendo espécies endêmicas e a produtividade biológica. Estudos indicam que as mudanças nos ciclos hidrológicos podem alterar a composição química dos lagos, aumentando a liberação de gases de efeito estufa, como o metano, de sedimentos anóxicos (Forsberg et al., 2012; ANA, 2024). Esses efeitos repercutem amplamente na degradação da qualidade da água e nos serviços ecossistêmicos, incluindo a regulação climática e a provisão de recursos hídricos.

O impacto da diminuição da disponibilidade e qualidade hídrica, somados à perda de biodiversidade aquática vêm comprometendo a segurança alimentar de populações indígenas

e ribeirinhas amazônicas, que dependem da pesca e da agricultura de subsistência. Paralelamente, à intensificação de eventos extremos, como enchentes e secas, acentua os desafios socioeconômicos, incluindo o deslocamento populacional e a perda de infraestrutura (Marengo et al., 2022; IPCC, 2021). Essa combinação de fatores demanda políticas públicas efetivas para mitigar impactos e promover a resiliência.

Frente à problemática, políticas públicas voltadas à mitigação e adaptação climática na Amazônia têm priorizado ações como o monitoramento hidrológico e a restauração de ecossistemas, muitas vezes, adotando medidas de urgência para atender demandas diversas frente à extremos climáticos como observado. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) propõe medidas "sem arrependimento", que promovem simultaneamente o enfrentamento da variabilidade climática e a adaptação às mudanças futuras. Exemplos incluem sistemas de alerta contra enchentes e o fortalecimento institucional para a gestão integrada de bacias hidrográficas (ANA, 2024; Nobre et al., 2016) e o Sistema de Comando de Incidentes no Ibama (SCI), que vêm promovendo campanhas para o monitoramento dos recursos hídricos e mitigação de problemas relacionados à seca na Amazônia.

Contudo, como apontado por X, os desafios permanecem, especialmente no que tange à necessidade de financiamento e à implementação de estratégias em áreas de alta vulnerabilidade. Isto por conta da lacuna de dados de redes de monitoramento no país, que resultam na deficiência de diagnósticos e prognósticos da situação atual frente aos extremos climáticos. Como apontado pelo Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas:

A avaliação acurada de tendências de temperatura e precipitação na América do Sul em escala decenal a multi-decenal é limitada pela disponibilidade de dados e sua distribuição espacial não homogênea. Além disso, o controle de qualidade de dados e os métodos de medidas aumentam as incertezas nas avaliações. Estas limitações são ainda mais críticas em regiões tropicais como a Amazônia e o Pantanal Matogrossense, onde a escassez de dados é ainda um problema atual. (Ambrizzi et al., 2013)

Como alternativa, dados orbitais complementares referentes à aspectos ambientais cada vez mais têm sido usados para traçar tendências e comportamentos espaço temporais, tornando-se uma ferramenta eficaz de análise ambiental frente aos desafios impostos pela carência de dados e estações geradoras de informações *in situ*.

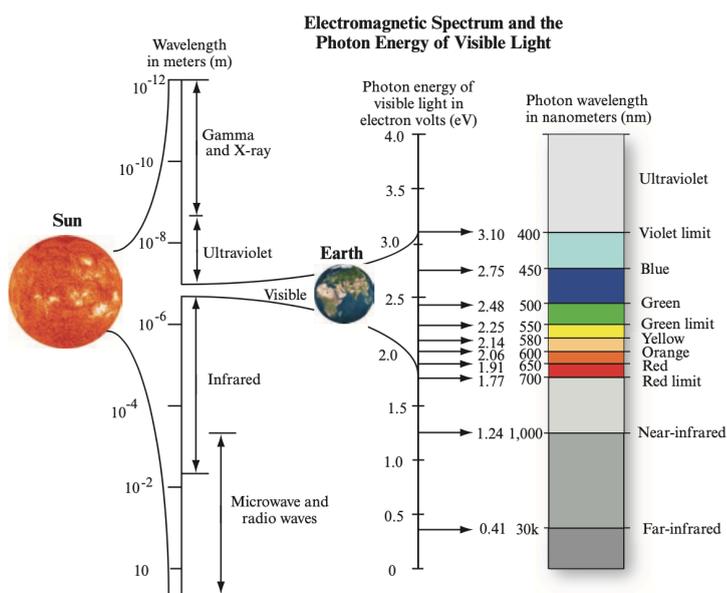
#### **4.4 Sensoriamento Remoto Aquático e Termal**

Definido como um conjunto de técnicas, o sensoriamento remoto, ao utilizar-se de sensores imageadores para captar a energia eletromagnética que é emitida ou refletida por

alvos na superfície terrestre, traz consigo, dados espaciais de maneira remota (Baptista, 2019). Sua utilização, vem dinamizando cada vez mais a obtenção de produtos orbitais com potencial de interpretação para tomada de decisão e reconhecimento de condicionantes ambientais.

O início do processo de captação destes dados, como exposto por Lorenzetti (2015), provém da incidência de radiação eletromagnética (REM) por uma fonte, como o Sol. Na ocasião, a energia eletromagnética emitida em diversas intensidades, se torna passível de ser sub dividida didaticamente em regiões ou faixas espectrais conforme sua frequência ou comprimento de onda (Figura 1). Essas radiações ao atingirem a superfície em diversas direções, como citada por Novo e Ponzoni (2001), possuem potencial em sofrer fenômenos como reflexão, transmissão e/ou absorção, a depender das características físico-químicas dos objetos.

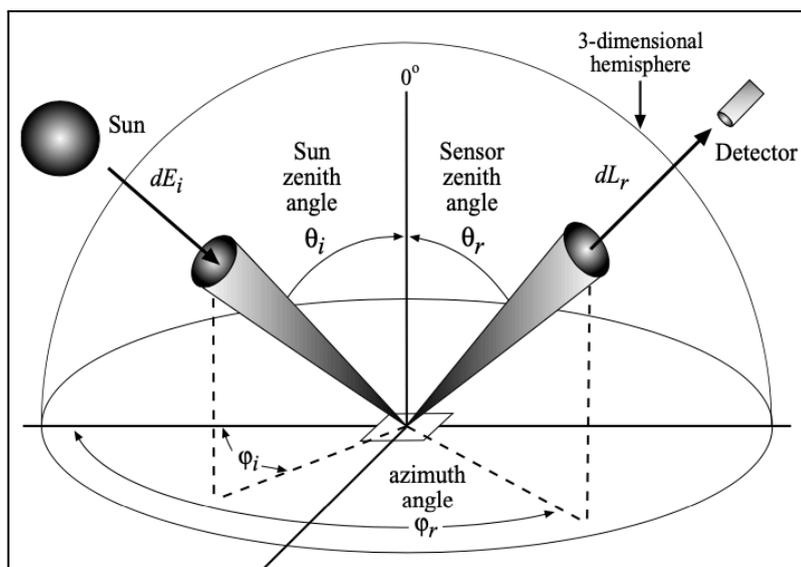
**Figura 6 - Representação do espectro eletromagnético.**



Fonte: Jensen (2015).

Após atingir o alvo em questão, esse fluxo de REM contendo infinitos fluxos de energia são captados pelo sensor, podendo este, ser determinado por uma região espectral específica (Novo; Ponzoni, 2001). Cabe salientar que, os comprimentos de onda somente são detectados pelo sensor em seu ângulo sólido, que nada mais seriam do que do que uma abertura no sensor responsável por captar a REM e a região da superfície em questão, proveniente de uma projeção de ângulo solar (Novo; Ponzoni, 2001; Jensen, 2014).

**Figura 7** - Representação da geometria de aquisição formada pelo ângulo sólido.



Fonte: Adaptado de Jensen (2014).

A reflectância, nesse sentido, seria a razão entre os campos elétricos refletidos e incidentes nesse determinado alvo (Florenzano, 2011). Lorenzetti (2015) complementa que a distribuição da REM refletida, depende de parâmetros, relativos aos comprimentos de onda, ângulo de incidência, polarização da radiação, rugosidade da superfície e as propriedades elétricas do alvo em questão.

Dessa forma, a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto em corpos hídricos, alguns aspectos devem ser considerados, isto porque, a energia eletromagnética ao mudar de meio físico (atmosfera-água), espalha-se, posteriormente é absorvida por componentes ali presentes (Liu, 2015). Jensen (2009) aborda que, somando-se à radiância que interage com fundo, têm-se as radiâncias que não interagem com a água, mas sim com as partículas atmosféricas (atenuação atmosférica), a radiância que penetra na superfície da água e é refletida, e, por fim, a radiância que penetra no corpo hídrico, interagindo com os componentes da lâmina d'água, porém, sem interagir com o fundo.



demais regiões. Trabalhos como Facco et al. (2019), Peixoto, Guasselli e Pereira Filho (2018) e Dezordi et al. (2019), demonstram a aplicabilidade dos sensores desse satélite para a verificação da reflectância na coluna d'água de reservatórios.

Outro fator a ser considerado a esse tipo de análise, refere-se à possibilidade em se fazer processamentos em nuvem, como pela plataforma do *Google Earth Engine*, aumentando as possibilidades de análise. Por meio dela, um grande volume de dados (*big data*) pode vir a ser processado, contribuindo para estudos de monitoramento. Assim, o “monitoramento desses ambientes amplia a compreensão dos processos biogeoquímicos que alteram suas propriedades” (Barbosa et al., 2019, p. 107).

Dentre as variáveis passíveis de serem analisadas está o monitoramento de temperatura de superfície por meio de produtos orbitais, mais reconhecido na literatura como sensoriamento remoto termal. Este, é uma técnica utilizada para obter informações sobre a emissão de energia térmica da superfície terrestre, capturadas em bandas específicas do espectro infravermelho termal. Essa abordagem é baseada na Lei de Planck (permitem medir a radiação emitida pelos objetos) e na emissividade dos materiais, propriedades que permitem identificar e quantificar variações térmicas, sendo amplamente aplicável em estudos ambientais, agrícolas, urbanos e hidrológicos (Li et al., 2013).

Seu funcionamento baseia-se na detecção da radiação emitida por corpos devido à sua temperatura, capturada em comprimentos de onda que variam entre 8  $\mu\text{m}$  e 14  $\mu\text{m}$  no espectro eletromagnético. Os sensores termais medem essa radiação e a convertem em temperaturas aparentes da superfície, considerando fatores já supracitados, como emissividade e transmissividade atmosférica (Ermida et al., 2020).

No mapeamento da temperatura de superfície aquática, o sensoriamento remoto termal funciona ao capturar a radiação emitida pela superfície da água e convertê-la em estimativas de temperatura. Essa abordagem utiliza bandas do infravermelho termal de sensores como Landsat e MODIS, combinadas com correções atmosféricas e ajustes de emissividade, para garantir a acurácia dos dados (Ermida et al., 2020). Para águas interiores, como rios e lagos, a alta variabilidade espacial da temperatura é capturada em escalas adequadas para monitoramento local, possibilitando análises de fluxo térmico, impactos de eventos climáticos extremos, e variações sazonais.

Esse tipo de análise oferece vantagens significativas no estudo de águas interiores, como a capacidade de monitorar grandes áreas em curto intervalo de tempo e de acessar regiões remotas, como a Amazônia (Novo et al, 2005). Em estudos como o de Zanotta, Ducati

e Gonçalves (2010), Bayable et al (2024) e Sogno, Kein e Kuenzer (2022), Z, o sensoriamento remoto termal foi empregado utilizando-se de diferentes produtos orbitais, porém, como resultado, obtêm-se panoramas espaço-temporais significativos sobre o quadro regional de cada corpo hídrico e de como as mudanças climáticas vem alterando padrões de temperatura e qualidade da água nesses ambientes.

Entretanto, desafios como a baixa resolução espacial de sensores em grandes áreas, interferências atmosféricas e a complexidade da análise em corpos d'água heterogêneos ainda limitam sua aplicabilidade. A superação desse desafio, requer o desenvolvimento de algoritmos mais robustos e o uso combinado de dados de diferentes sensores e escalas (Jiménez-Muñoz e Sobrino, 2010). Como alternativa, o uso de canais de banda única no sensoriamento remoto termal tem se destacado por sua simplicidade e eficiência na estimativa da temperatura da superfície terrestre.

Essa abordagem utiliza diretamente a radiação termal emitida em um único comprimento de onda, geralmente na banda do infravermelho termal (TIR). Estudos como o de Wang et al. (2015) demonstraram que o método de banda única, quando associado a modelos atmosféricos precisos, pode oferecer estimativas de temperatura confiáveis com menor custo computacional em comparação a métodos multibandas. Além disso, a simplicidade na parametrização desse método facilita sua aplicação em regiões remotas ou com dados limitados, sendo uma alternativa viável para análises em grandes escalas.

Frente à dados de sensores da série Landsat, especialmente o Landsat 8, têm sido amplamente utilizados para o mapeamento de temperatura da superfície devido à sua resolução espacial de 30 metros e à disponibilidade gratuita. Estudos como o de Namikawa (2015) demonstram a aplicabilidade do Landsat 8 para monitorar corpos d'água interiores, destacando sua capacidade de capturar variações térmicas sazonais em lagos e rios. No entanto, sua aplicação na Amazônia enfrenta desafios específicos, como a alta cobertura de nuvens, que limita a aquisição de imagens claras, e a complexidade de mapeamento em áreas com forte heterogeneidade térmica e alta densidade de vegetação (Silva, 2022; Ferreira et al., 2023).

Dada a alternativa de processamento, consta que a *United States Geological Survey* (USGS) disponibiliza produtos Landsat divididos em duas coleções no catálogo de imagens do GEE. Na primeira (C01), estão contidas imagens adquiridas e processadas até 01/01/2022 e mantidas no catálogo até 01/01/2023. Já na segunda, produtos que abrangem a C01 e as

imagens processadas após 31/12/2021 são disponibilizadas exclusivamente na coleção 2 (C02) ([GEE](#)).

Tais coleções possuem três diferentes níveis de processamento dentro da plataforma do GEE, sendo estes os produtos de nível 1 (T1) que atendem a requisitos de qualidade de calibrações radiométricas e geométricas, produtos nível 2 (T2) que não atendem aos mesmos requisitos de qualidade e os dados adquiridos, mas não avaliados, denominados de imagens em *Real Time* (RT) ([GEE](#)).

Em cada uma das coleções, está contida a RT de dados brutos (*Digital Number* (DN)), e para as coleções com T1 e T2, produtos de reflectância de topo da atmosfera (TOA), reflectância de superfície (SR) e temperatura da superfície terrestre (LST) são ofertados tematicamente ([GEE](#)).

Por fim, no mapeamento de áreas alagadas, diversos índices estão sendo testados e validados a fim de obter-se melhores representações. Dentre eles, têm-se o NDWI, MNDWI e o AWEI. O *Automated Water Extraction Index* (AWEI) foi desenvolvido por Feyisa et al. (2014) para aprimorar a precisão na extração de corpos d'água em áreas com sombras profundas ou superfícies escuras, que tradicionalmente apresentam desafios para outros métodos de classificação. A fórmula do AWEI é expressa como:

$$\text{AWEI} = \text{BLUE} + 2.5 \times \text{GREEN} - 1.5 \times (\text{NIR} + \text{SWIR1}) - 0.25 \times \text{SWIR2}$$

Esse índice foi projetado para minimizar erros de omissão e comissão em imagens Landsat, permitindo uma detecção mais robusta em ambientes complexos. Estudos aplicaram o AWEI para mapear corpos d'água em regiões montanhosas e em áreas com fundo escuro, demonstrando sua superioridade em relação ao MNDWI e a classificadores de máxima verossimilhança (Feyisa et al., 2014; Mustafa et al., 2017). Por exemplo, um estudo realizado na África do Sul mostrou que o AWEI reduziu os erros de classificação em mais de 50% em comparação a métodos tradicionais (Feyisa et al., 2014).

O *Normalized Difference Water Index* (NDWI) foi criado por McFeeters (1996) para destacar corpos d'água utilizando a relação entre as bandas verde (Green) e infravermelho próximo (NIR). A equação do NDWI é dada por:

$$\text{NDWI} = (\text{GREEN} - \text{NIR}) / (\text{GREEN} + \text{NIR})$$

Segundo estudos, o índice se mostrou eficaz em áreas onde a vegetação é o principal elemento do entorno, pois a água absorve o NIR enquanto reflete o verde, o que gera um contraste claro entre os dois elementos. Estudos têm utilizado o NDWI para monitorar corpos d'água em áreas tropicais e subtropicais, destacando sua utilidade na delimitação de áreas alagadas durante períodos sazonais (McFeeters, 1996). Por exemplo, aplicações do NDWI em florestas tropicais da Amazônia ajudaram a mapear variações sazonais em planícies de inundação, demonstrando sua relevância para o monitoramento de mudanças hidrológicas e ecológicas em grandes sistemas aquáticos.

O *Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)*, proposto por Xu (2006), é uma modificação do NDWI que substitui o NIR pelo infravermelho de ondas curtas (SWIR). A equação do MNDWI é expressa como:

$$\text{MNDWI} = (\text{GREEN} - \text{SWIR1}) / (\text{GREEN} + \text{SWIR1})$$

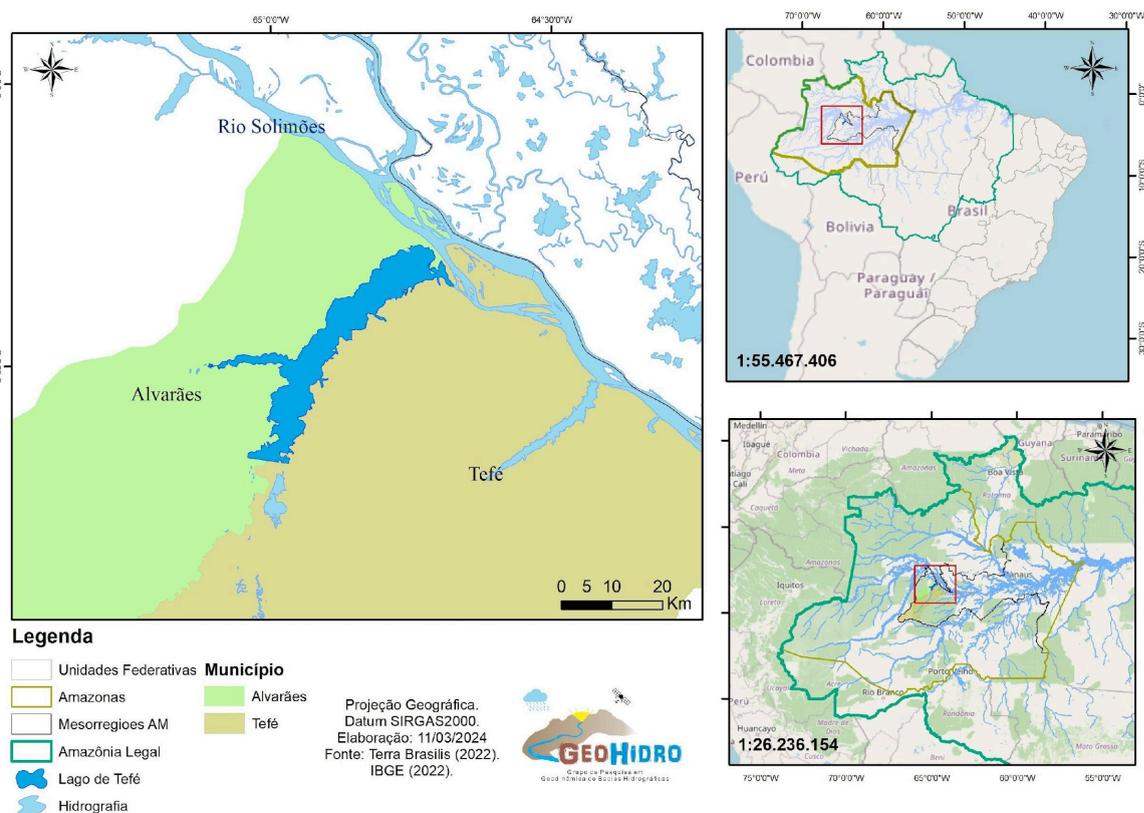
Essa modificação foi introduzida para resolver limitações do NDWI, como a confusão entre corpos d'água e superfícies urbanas ou vegetação densa. O MNDWI é amplamente utilizado para mapear corpos d'água em áreas urbanas, uma vez que reduz significativamente os impactos das sombras de construções e montanhas (Xu, 2006). Por exemplo, o índice foi aplicado em estudos de monitoramento de lagos na China, onde se mostrou eficaz na identificação de mudanças sazonais em áreas urbanizadas e em reservatórios com altos níveis de turbidez.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 Área de estudo

O Lago Tefé está localizado entre os municípios de Tefé e Alvarães, pertencentes estes à Mesorregião Centro Amazonense. Encontrando-se a aproximadamente 522 km da Capital do Estado, Manaus, o acesso ao local, exclusivamente, é realizado pela rede hidroviária que possui o rio Solimões como trecho navegável principal (Carmo, 2010).

**Figura 9 - Localização da área de estudo.**



Fonte: autora (2024).

Inserido no contexto Amazônico, a área de estudo enquadra-se no domínio da Planície Amazônica (SGB, 2020), mais especificamente no Domínio Intracratônico Clástico da Bacia Sedimentar do rio Solimões, sob o compartimento tectônico do rio Juruá, Grupo Tefé (Carmo, 2010; Castro, 2019). Dentre os pacotes sedimentares dispostos no arranjo geológico (Silva; Rabelo; Nunes, 2024), a região é marcada pelo domínio Pleistocênico da Formação Içá (arenito, argilito, siltito e turfa) e depósitos aluvionares holocênicos (areia, silte, argila, cascalho inconsolidado)(SGB, 2005; Motta, 2008; Pedreira da Silva et al., 2003).

Tal panorama litoestratigráfico, marcado pelas inúmeras sequências deposicionais, possui em sua história geológica a formação não somente de perfis sedimentares como também a presença de cinturões, frutos de eventos tectônicos mesozóicos, que hoje, propiciam a extração de gás natural e derivados de combustíveis fósseis (ICMBio, 2014).

A geomorfologia da região é caracterizada pela presença de altimetrias médias de 100m, inserido no Domínio das Unidades Morfoestruturais da Planície Amazônica e Planalto Rebaixado da Amazônia. Segundo o Plano de Manejo da FLONA de Tefé:

“existe a predominância de um relevo praticamente plano, com áreas de acumulação inundáveis e ausência de drenos para escoamento das águas. A planície Amazônica caracteriza-se por apresentar lagos, furos, paranás e depósitos lineares fluviais recentes nas áreas marginais aos rios, sob solos aluviais, recobertos por vegetação tipo mata de várzea.” (ICMBio, 2014, p.160)

O panorama climático regional, segundo o ICMBio (2014), é caracterizado por médias pluviométricas anuais em torno de 2.000mm e de temperaturas médias próximas à 24°C, apresentando estações definidas de seca e chuva, enquadrando-se na classificação de Koppen como A, (Tropical Chuvoso), com médias superiores à 18°C no mês mais frio, referindo à clima de florestas tropicais. A variação de temperatura na região apresenta maiores médias nos meses de outubro e novembro (30°C-33°C) e mínimas nos meses de maio e junho (21°C-23°C).

Toda a região é abarcada pela rede hidrográfica do rio Solimões, mas possui afluentes relevantes para a dinâmica de locomoção e sustento local, como o rio Tefé, Curimatá de Baixo e Curimatá de Cima, estes, sendo estes últimos perenes (acompanhando o fluxo de cheias). A região possui também lagos como o lago Tefé, lago Caiambé, lago Jutica e lago Catuá (Silva, 2018).

Tal caracterização físico-ambiental, permitiu a formação de solos do tipo Podzólico Vermelho Amarelo Álico em florestas de terra firme, Podzólico Vermelho Amarelo Endoálico em floresta densa plana mas menor drenagem. Ao longo da extensão hidrográfica da região, existem solos hidromórficos Gleizados eutróficos e álicos. De forma geral, os solos são pouco férteis devido às elevadas concentrações de alumínio.

A fauna e flora locais majoritariamente são associados à dinâmica de Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas Dossel Emergente, Floresta Ombrófila Densa Aluvial Dossel Uniforme, Floresta Ombrófila Aberta Aluvial com palmeiras, Floresta Ombrófila Aberta Terras Baixas com palmeiras, Campinarana arborizada com palmeiras, chavascal e formações pioneiras apresentando diversidade de plantas aquáticas mas com predominância de florestas

de terra firme. Apesar da baixa fertilidade, zonas de terra firme permitem a instalação de densas florestas por serem bem estruturadas.

A região por estar sob influência da Floresta Nacional de Tefé e por toda dinâmica de inundação regional, configura uma grande presença de primatas, mamíferos (aquáticos e terrestre) e mastofauna, como apontado, “apresenta extensas áreas preservadas, de terra firme e inundáveis. Este complexo mosaico de ambiente (várzeas, igapós e terra firme) abriga uma infinidade de espécies da fauna, contendo parte significativa da biodiversidade amazônica.” (ICMBio, 2014, p.187)

Abarcando-se na biodiversidade e dinâmica de inundação local, a subsistência na região se configura pelo usufruto da rede hidrográfica para transporte e alimentação, produção agrícola, extrativismo e caça de subsistência.

## 5.2 Procedimentos metodológicos

Seguindo a metodologia de trabalho, inicialmente, foi acessada a plataforma do *Earth Explorer* da *United States Geological Survey* (USGS) para a verificação de passagens disponíveis na área de estudo. A ausência de nuvens na superfície do Lago Tefé foi critério de seleção de imagens da biblioteca do satélite Landsat 8. Seleccionadas as datas das passagens, agora no ambiente de processamento do *Google Earth Engine* (*code editor*) a biblioteca LANDSAT/LC08/C02/T1\_L2 foi carregada e processada segundo a metodologia de Ermida et al. (2020). Dentro da série (2014-2024), obteve-se onze imagens disponíveis para o processamento (Quadro 1).

**Quadro 1** - Seleção das passagens do Satélite Landsat 8

ID Imagem	Aquisição
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_001062_20140929	29/09/2014
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_001062_20150815	15/08/2015
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_001062_20180924	24/09/2018
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_001062_20200913	13/09/2020
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_001062_20210916	16/09/2021
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_001062_20220919	19/09/2022
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_001062_20221005	05/10/2022
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_001062_20230821	21/08/2023
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_001062_20230922	22/09/2023
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_001062_20240807	07/08/2024
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_001062_20240908	08/09/2024

Fonte: autora (2024).

Consta-se que, o comportamento atmosférico na região foi fator determinante para a desigual distribuição de imagens disponíveis. Assim, apenas cenas dos anos de 2014, 2015, 2018, 2020, 2021, 2022, 2023 e 2024 seguiram os critérios de seleção, e em todas as ocasiões, a disponibilidade corresponde à estação seca da região de estudo.

Com base na metodologia de Ermida et al. (2020) para estimar a temperatura da superfície terrestre (LST), foram aplicadas mascaramento de nuvem e calibração radiométrica para a obtenção da reflectância de superfície e informações de superfície hídrica. Nele, imagens Landsat passam por uma correção atmosférica que permite modelar e corrigir as emissões detectadas pelo sensor térmico para que se aproximem da temperatura real da superfície. Para isso, o *Total Column Water Vapor* (TCWV) do banco de dados NCEP/NCAR foi utilizado.

A emissividade da superfície foi calculada a partir de produtos da *ASTER Global Emissivity Dataset Version 3* (GEDv3), que fornece valores baseados em dados de vegetação, e ajusta tais valores para as bandas térmicas do Landsat. A área de cobertura de vegetação foi medida pelo *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e a partir do índice, calculou-se a fração de cobertura vegetal (FVC), que é obtida com a fórmula:

$$FVC = \left( \frac{NDVI - NDVI_{bare}}{NDVI_{veg} - NDVI_{bare}} \right)^2$$

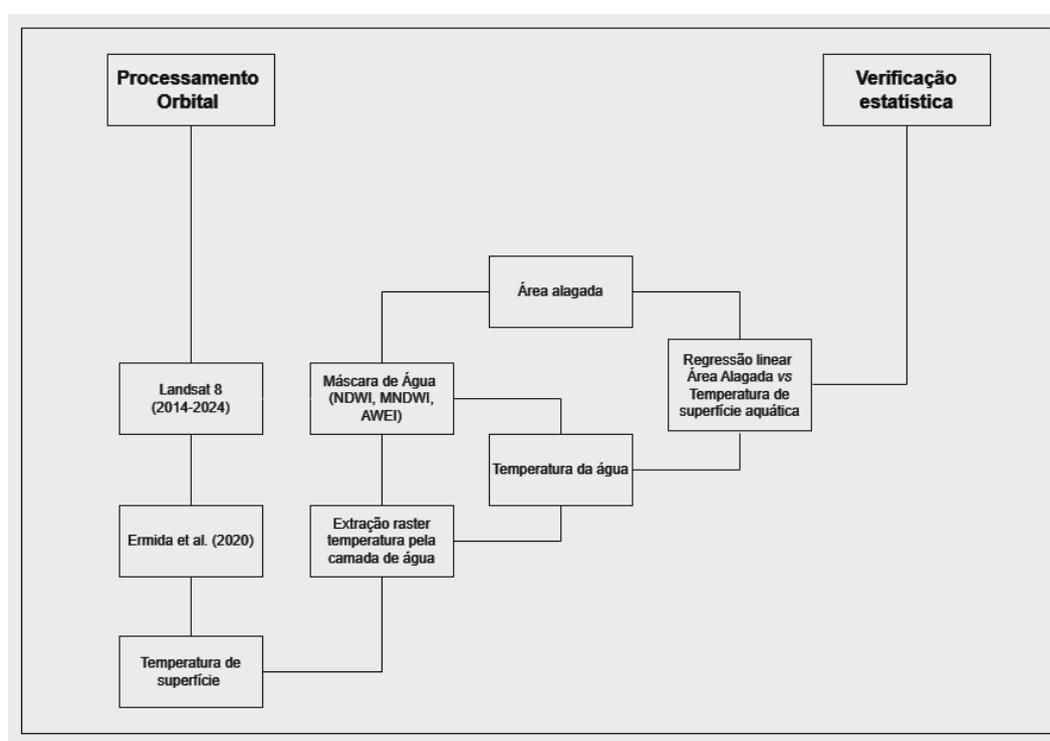
Na equação, o NDVI\_bare representa solo descoberto e NDVI\_veg uma vegetação densa. Valores típicos para esses parâmetros são 0,2 para solo exposto e 0,86 para cobertura vegetal plena. Com a FVC obtida, a emissividade é derivada para cada pixel, utilizando um valor próximo de 0,99 para vegetação densa e ajustando conforme a área de solo nu, permitindo uma maior precisão na obtenção da LST.

Com a emissividade determinada, prossegue-se ao cálculo da temperatura de brilho (*Brightness Temperature*) da TOA (*Top of Atmosphere*), ou seja, a temperatura inicial da energia térmica detectada pelo sensor Landsat antes das correções aplicadas. Este dado foi utilizado em conjunto com a emissividade para calcular a LST por meio de algoritmos específicos, como o *Statistical Mono-Window* (SMW) e o *Split-Window* (SW). O SMW, por exemplo, usa uma relação linear entre a temperatura de brilho e a emissividade para obter a LST, enquanto o SW utiliza a diferença entre duas bandas térmicas para ajustar a temperatura com base nas variações atmosféricas:

$$LST = A_l \frac{Tb}{\varepsilon} + B_l \frac{1}{\varepsilon} + C_l$$

As modificações realizadas na metodologia de Ermida et al (2020) realizadas no presente trabalho, circundam na obtenção da superfície hídrica, e pela base de pontos geradas para a averiguação do comportamento estatístico da temperatura no lago, como apontado na Figura 10:

**Figura 10** - Diagrama metodológico.



Fonte: autora (2024).

Após o cálculo da temperatura de superfície, a aplicação de índices espectrais para a recuperação da superfície da água foram adotados segundo as características da água no momento da passagem do satélite. Via inspeção visual das imagens com parâmetro de visualização RGB, em passagens onde a área do lago apresentava presença de sombras, o índice AWEI foi adotado. Em ocasiões nas quais o lago apresentava diminuição representativa de sua área alagada, o NDWI foi adotado, pois apresentou melhor distinção entre a camada de água e o solo exposto. Nas passagens nas quais a área alagada não apresentava sombreamento, nem diminuição de área significativa, o MNDWI apresentou melhor imageamento.

Adquiridas as áreas de superfície alagada, um recuo de margem de -100m (*buffer* negativo) foi aplicado, visando diminuir as interferências de borda do solo exposto sob os dados de superfície hídrica. Por fim, a camada de água com recuo de margem foi utilizada como máscara de extração para obtenção da temperatura hídrica sobre o produto LST. O script encontra-se disponível na plataforma no GEE (<https://code.earthengine.google.com/7d4679ec64ee656c283dd8e0a6e3bf78>).

A averiguação estatística baseou-se na execução de uma regressão linear a fim de obter a possível relação entre as variáveis área alagada vs temperatura de superfície, a partir de um código em *Python* processado no *Google Collab*. Na ocasião, foram buscados também, dados auxiliares da estação fluviométrica 12900001 Tefé-Missões para informações de cota e pluviosidade *in locu* (<https://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/gerarGrafico.aspx>).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo a metodologia proposta, foram obtidos onze produtos de área alagada dentro da série histórica. Como resultado, têm-se os seguintes valores:

**Quadro 2** - Correlação entre índices utilizados em cada passagem e valor de área alagada obtida.

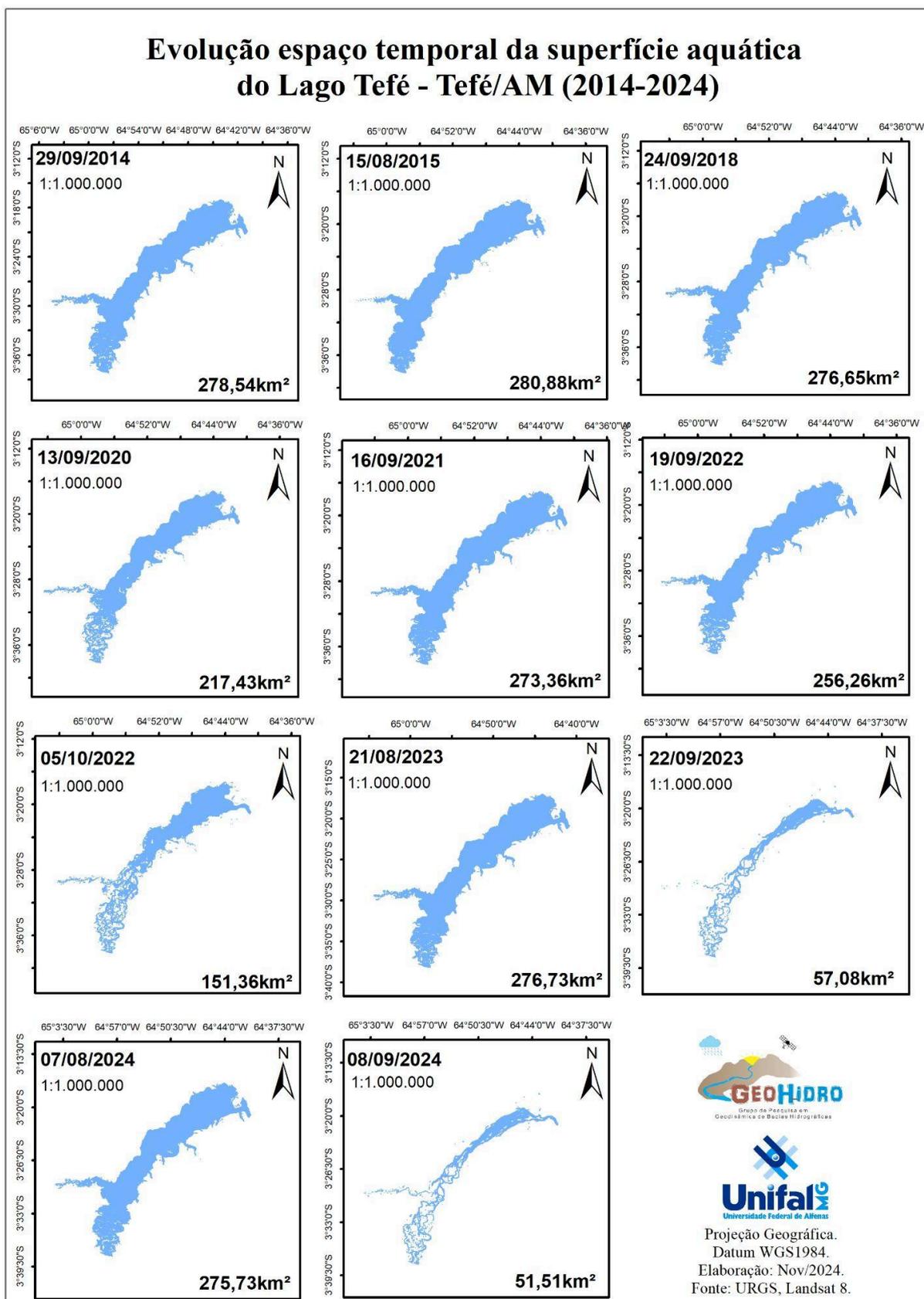
<b>Aquisição</b>	<b>Método - Máscara</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>
29/09/2014	MNDWI	278.54
15/08/2015	NDWI	280.88
24/09/2018	AWEI	276.65
13/09/2020	MNDWI	217.43
16/09/2021	MNDWI	273.36
19/09/2022	NDWI	256.26
05/10/2022	MNDWI	151.36
21/08/2023	AWEI	276.73
22/09/2023	NDWI	57.08
07/08/2024	AWEI	275.73
08/09/2024	NDWI	51.51

Fonte: autora (2024).

Para a passagem de 29/09/2014, utilizando o índice MNDWI, uma área de 278,54 km<sup>2</sup> foi obtida. Em 15/08/2015, utilizando o índice NDWI, 280,88 km<sup>2</sup>. Em 29/09/2018, com o índice AWEI, 276,65 km<sup>2</sup>. Em 13/09/2020, com o índice MNDWI, 217,43 km<sup>2</sup>. Em 16/09/2021, com o índice MNDWI, 273,36 km<sup>2</sup>. Para o ano de 2022, com as datas das passagens 19/09/2022 e 05/10/2022, utilizando os índices NDWI e MNDWI, respectivamente, apresentaram a área alagada de 256,26 km<sup>2</sup> e 151,36 km<sup>2</sup>. Para 2023, com as datas das passagens de 21/08/2023 e 22/09/2023 e utilizando os índices AWEI e NDWI, áreas de 276,73 km<sup>2</sup> e 57,08 km<sup>2</sup> foram obtidas respectivamente. Por fim, para o ano de 2024, entre as datas de 07/08/2024 e 08/09/2024, com os índices AWEI e NDWI, foram obtidas áreas de 275,73 km<sup>2</sup> e a menor da série histórica, 51,51 km<sup>2</sup>.

Observa-se que, nas passagens entre 2014 e 2022, o Lago manteve-se com uma área alagada acima de 200km<sup>2</sup>, havendo uma oscilação entre setembro e outubro de 2022. Destaca-se que para o ano de 2023, houve um decréscimo de 218,53 km<sup>2</sup> (-80,1%) de área alagada no período de um mês. Seguindo a mesma dinâmica, em 2024, nas passagens analisadas, entre agosto e setembro do mesmo ano, a área alagada do Lago sofreu uma queda significativa de 82,2%. Espacialmente, a variação é demonstrada na Figura 11.

Figura 11 - Dinâmica espaço-temporal da área alagada.

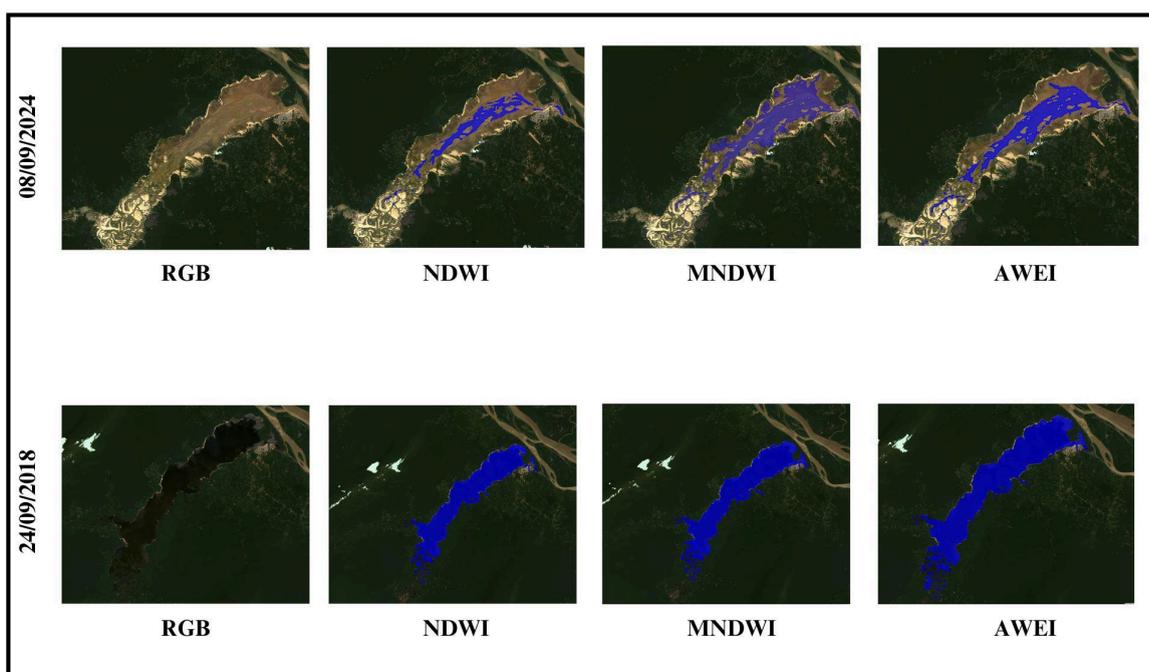


Fonte: autora (2024).

As alterações supracitadas, especialmente são representadas pelo recuo das margens do lago (Souza Junior et al., 2019). Constata-se que dentro dos padrões observados, dentre as passagens nas quais o recuo de margem foi expressivo (como em 22/09/2023 e 08/09/2024) (Souza Junior et al., 2024), na porção sudoeste, o rio Tefé, agora em menor volume hídrico, ressalta a formação de ilhas frutos da diminuição brusca da área alagada na região. Em trabalhos realizados na região como em Silva, Rabelo e Nunes (2024), apontam que a natureza meandante do rio que, desenvolvido sob um padrão anastomosado/multicanais, torna recorrente a formação de ilhas ao longo do percurso do rio Tefé em períodos de seca.

A formação de tais ilhas ao longo do percurso do lago também refletiu nas escolhas dos índices para a captação da área alagada. A efeitos de exemplo na passagem de 08/09/2024, que apresentou a menor área alagada na série, os bancos de areia são visíveis pela abundância em comparação com as regiões com água. Por inspeção visual, constata-se que o NDWI melhor difere as porções de solo exposto da lâmina d'água quando comparado com os demais índices (MNDWI e AWEI). Em comparação, na passagem de 24/09/2018, na qual os níveis de água ainda não apresentaram expressivo decaimento, porém a lâmina d'água apresentava anomalias, o índice AWEI apresentou melhor representatividade, como consta na Figura 12.

**Figura 12** - Demonstrativo da área alagada a partir da escolha do índice.

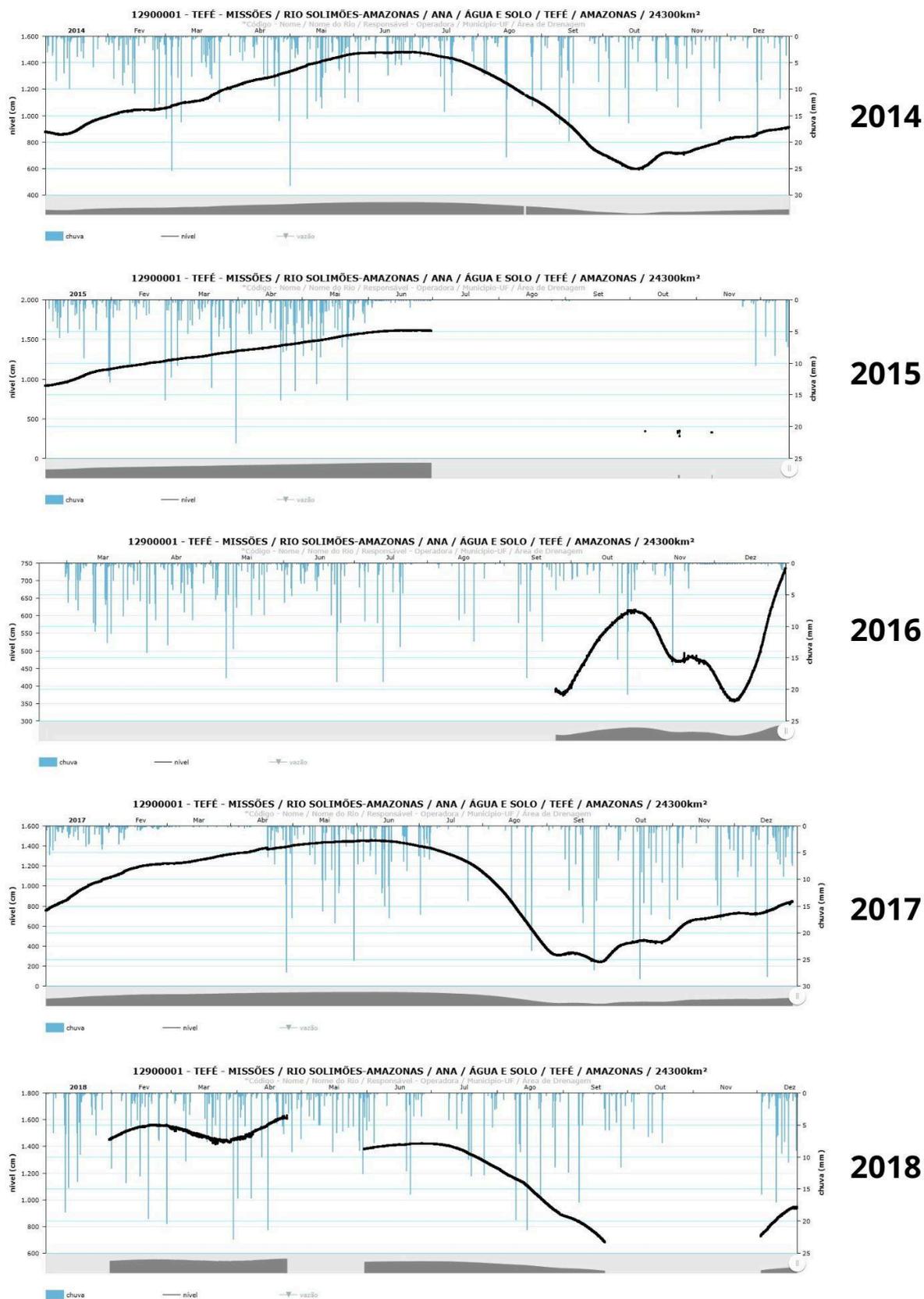


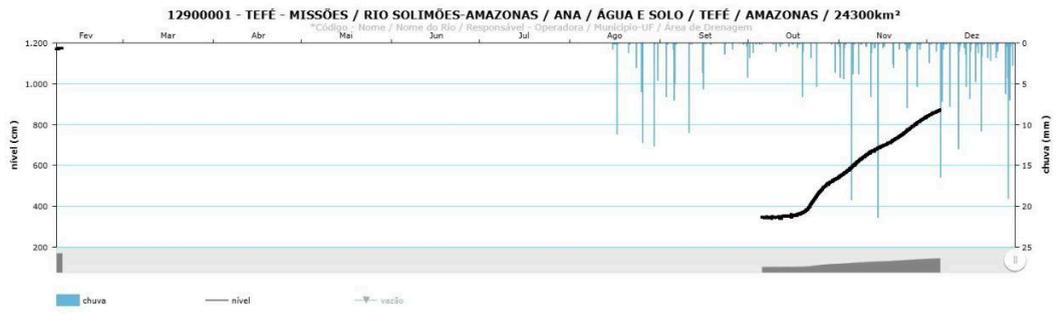
Fonte: autora (2024).

Em algumas publicações, já foram discutidas os potenciais e aplicabilidades dos índices utilizados no presente trabalho. A efeitos de exemplo, o AWEI (Xie et al., 2016), por possuir menor sensibilidade perante efeitos atmosféricos como as sombras, apresentou bons resultados no que tange a extração de lâmina d'água. Quanto ao NDWI (Ozelkan, 2019), além de ter apresentado resultados satisfatórios na diferenciação de solo exposto e pixels de água, também apresentou eficácia no mapeamento de águas turvas, fator que poderia explicar a melhor detecção nas passagens de menor área alagada da região de Tefé. Em diversos trabalhos, a aplicação do MNDWI também mostrou-se satisfatória, como em Brubacher, Guasselli e Oliveira (2017), por apresentar boa distinção de alvos.

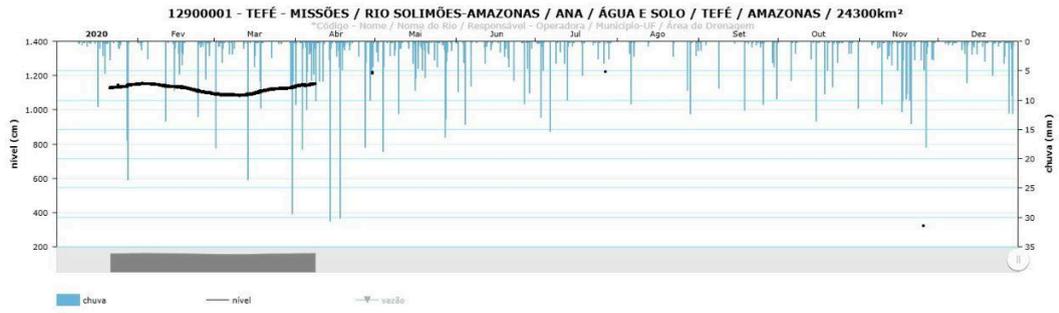
Quanto às variáveis associadas às oscilações da área alagada, a obtenção de dados de precipitação e de variação de cota foi adotada. Ao acessar o portal do sistema de hidro-telemetria da ANA, toda a série histórica adotada pode ser analisada segundo parâmetros medidos na região, como constam nos gráficos a seguir.

Figura 13 - Relação cotas x pluviosidade segundo dados da estação 12900001.

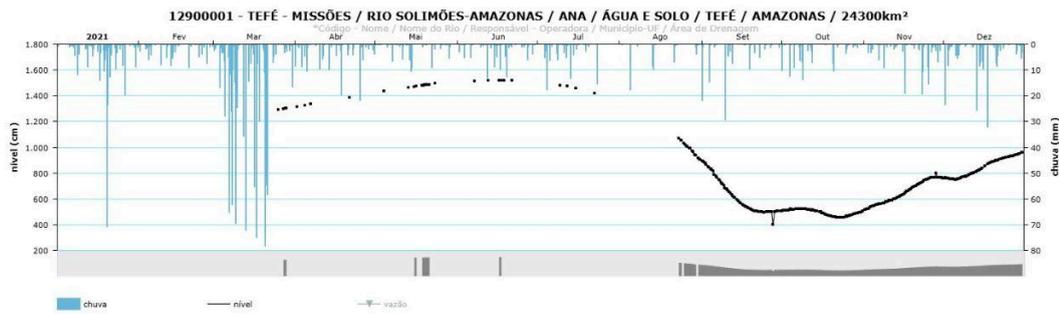




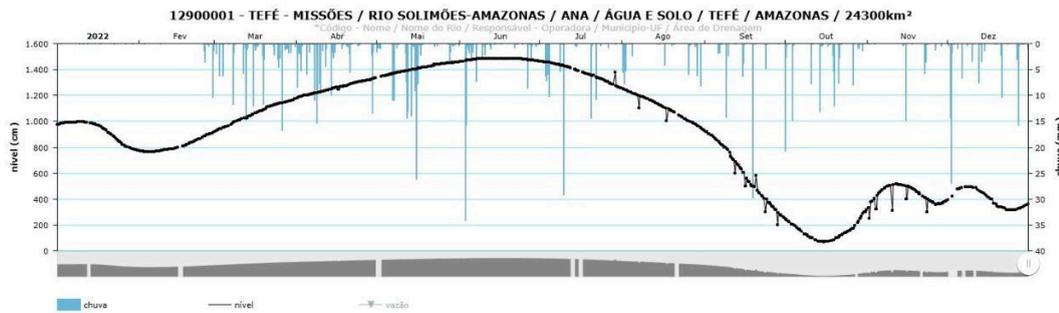
2019



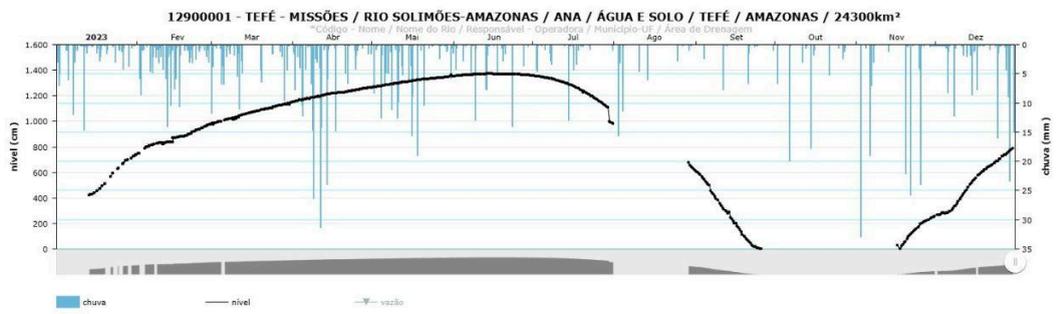
2020



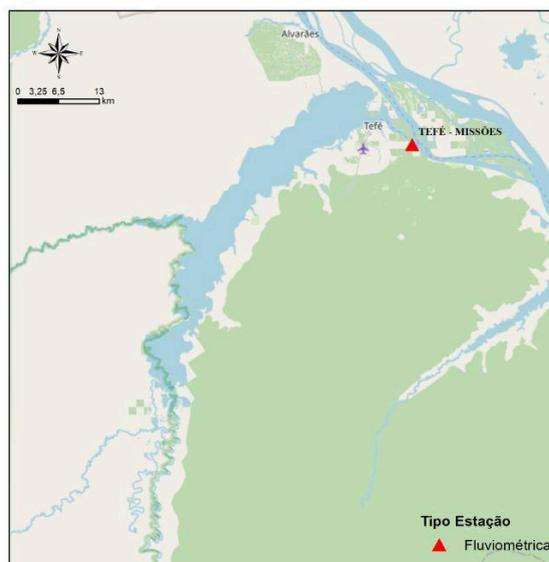
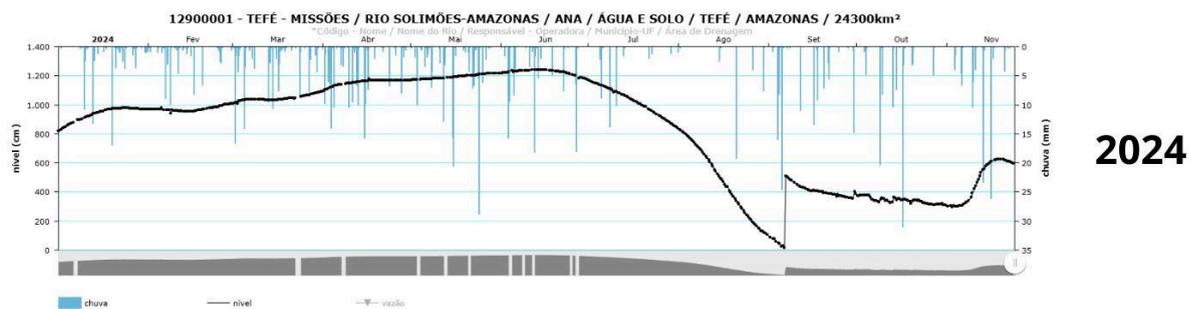
2021



2022



2023



Fonte: ANA (2024).

Observa-se que apesar da estação de referência estar localizada no canal que interliga o Lago ao rio Solimões (consequentemente, possuindo menor área alagada), o produto possibilita a visualização do panorama geral de eventos extremos na região, como a cheia e a seca, além de demonstrar com clareza a lacuna de dados características das estações de monitoramento em todo país.

Ao analisar os gráficos, a dinâmica das cotas e do regime pluviométrico delimitam bem as estações secas e chuvosas do bioma. Em 2014, os valores de cota oscilaram de acordo com o regime de chuva, apresentando decaimento estatístico de acordo com a mudança de estação, considerando que a estação seca na Amazônia começa em maio e termina em outubro. Para 2015 a inconsistência dos dados se dá pela ausência de recorrência do monitoramento, mas indicando que no mesmo período do ano anterior, o regime de chuvas foi maior.

No ano de 2016, apesar da inconstância dos dados, observa-se que a estação chuvosa começou com menor volume de chuvas, mas apresentou uma curva crescente de cota e chuva

para o mês de outubro, se comparado a 2014, a cota obtida apresentou menores marcadores. O ano de 2017 iniciou com cotas acima de 8m iniciando o decaimento da curva apenas no mês de agosto. Quanto ao comportamento pluviométrico, apresentou intensa atividade entre abril e início de julho e entre setembro e dezembro, porém estes não foram suficientes para alcançar as cotas do início do período, permanecendo abaixo dos 8m até o mês de dezembro.

Em 2018 observa-se novamente uma lacuna de dados. Constata-se que o início do período apresentou intenso regime pluviométrico responsável por estabilizar a cota da região acima dos 14m. Com o declínio das chuvas entre abril e junho, o nível do lago manteve-se abaixo dos 14m o restante do período.

Novamente, os anos de 2019, 2020 e 2021 apresentaram elevada ausência de dados. Em 2020, entre os meses de janeiro e março, o intenso volume de chuvas propiciou a permanência dos níveis de água acima dos 10m. Para 2021, observa-se um intenso volume de chuvas de janeiro a março, com permanência de cota acima dos 10m. Com a diminuição de volume de chuvas nos meses seguintes, a partir do mês de agosto, os níveis do lago permaneceram abaixo dos 10m, chegando a 4m no mês de setembro daquele ano.

Em 2022 iniciou o ano com um volume de chuvas abaixo de 20mm, porém, pela constância, propiciou a permanência do nível do corpo hídrico acima de 10m de março a agosto, havendo queda exponencial da cota entre setembro e dezembro. O ano de 2023 apresentou uma distribuição intensa de chuvas no primeiro semestre e uma constância de chuva desigual no segundo semestre. Os reflexos dessa distribuição resultaram na permanência dos níveis do Lago acima dos 10m entre fevereiro e julho e em níveis extremos de seca entre setembro e novembro, ficando abaixo dos 2m.

O ano de 2024, contabilizado até o mês de novembro, apresentou uma distribuição de chuvas inferior a 20mm no primeiro semestre, mas suficientes para manter a cota do trecho acima de 8m. A queda de volume de chuva entre julho e agosto, refletiu na queda brusca do nível do Lago nesse período, ficando novamente abaixo dos 2m, voltando a subir apenas no início de julho.

Segundo estudos, confirmam a intensa perda de área alagada na Amazônia de 2012 a 2021, com intensificação a partir de 2023 (Ferreira et al., 2023; Souza Júnior et al., 2024). Em Silva et al. (2018), discorre que os efeitos da seca em 2005 e 2010, acarretou anomalias negativas dos níveis de água na bacia do rio Solimões, associadas ao aumento de temperatura do Oceano Atlântico. Os autores também discorrem no trabalho que as enchentes

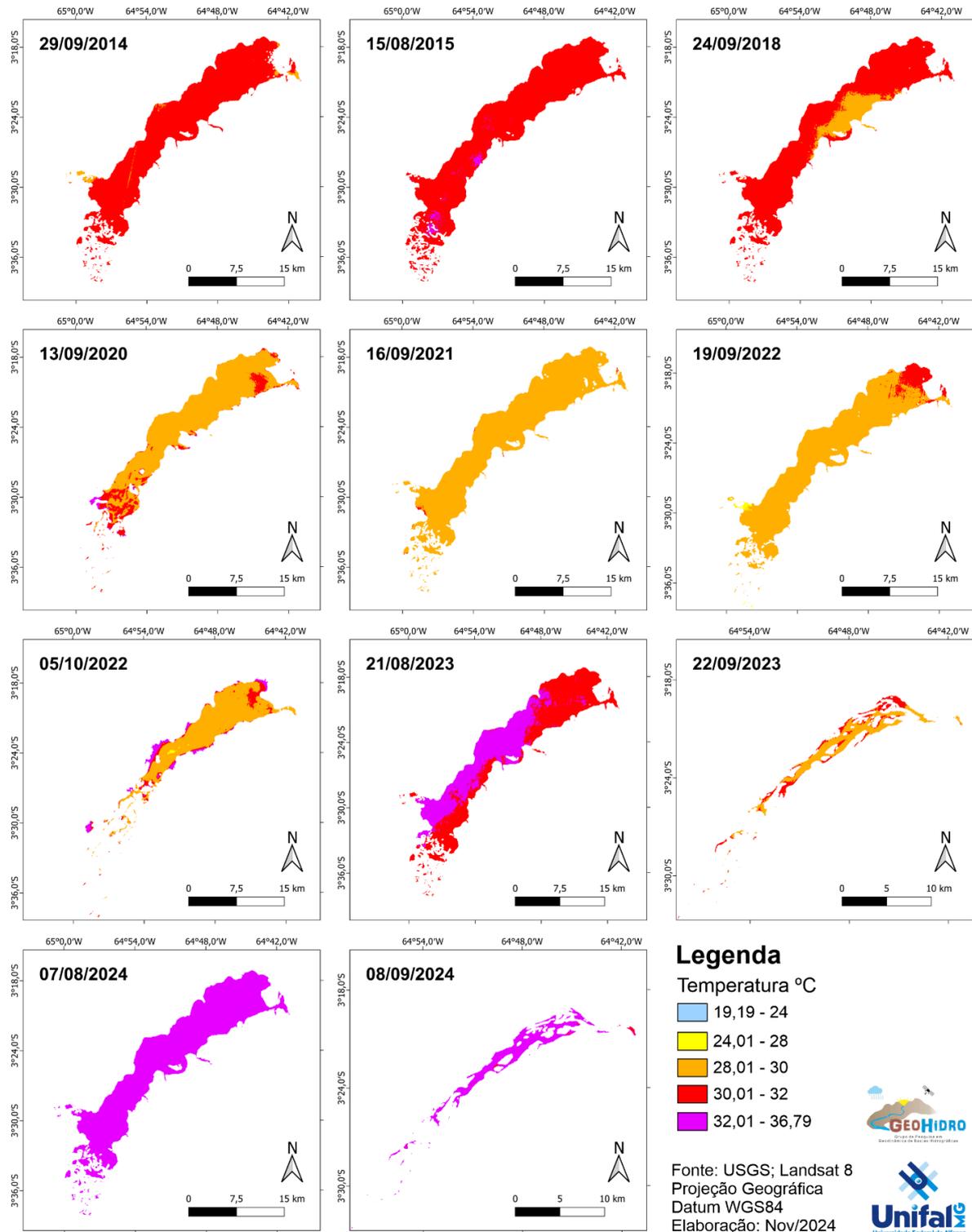
presenciadas em 2012 podem ter sido influenciadas pelo resfriamento das águas do Atlântico Norte.

Espacialmente, o comportamento de temperatura da superfície do Lago Tefé, apresentou comportamentos diversos ao longo da série histórica adotada. De forma geral, observou-se que comportamento acima de 32°C foram captados antes mesmo da crise hídrica da região iniciada em 2022, havendo por exemplo, o maior registro de temperatura em setembro de 2020. Observa-se porém, que o dinamismo de diferentes zonas de temperatura no lago, foram ficando mais homogêneas com o passar dos anos.

A efeitos de exemplo, de 2014 a 2018 as temperaturas majoritariamente foram em torno de 30°C-32°C, de 2020 a 2022, majoritariamente de 28°C-30°C, havendo uma oscilação brusca em 2023, em agosto com valores entre 30°C-32°C e 32°C-33°C bem homogeneizados, e, em setembro do mesmo ano, o retorno para médias na casa dos 30°C-32°C. Os resultados para 2024 obtiveram perspectivas alarmantes, uma vez que permaneceram com valores médios em toda a superfície acima dos 32°C, como representado na Figura 14.

Figura 14 - Variação do comportamento de temperatura da superfície aquática do Lago Tefé.

### Variação espaço-temporal da temperatura da superfície aquática do Lago Tefé -Tefé/AM (2014 - 2024)



Fonte: autora (2024).

Quanto aos dados gerados pelo processamento de dados de temperatura, constata-se que para o ano de 2014, a temperatura de superfície do Lago apresentou valores que variaram entre 29,2°C e 32,3°C. Espacialmente, as maiores temperaturas se concentraram nas porções sudoeste, parte do centro e parcela noroeste do corpo hídrico, enquanto que as temperaturas entre 28 e 30°C predominaram em parcelas da região centro Sul, parcelas no sudeste próximas ao município de Tefé e no braço que interliga o lago ao rio Bauana.

Em 2015, o Lago apresentou temperaturas que variaram entre 30,4°C e 32,2°C. Majoritariamente, os valores entre 30,5°C e 32°C predominaram no corpo hídrico, havendo pequenas parcelas no extremo sul e na região central com temperaturas superiores a 32°C. Para 2018, os valores adquiridos, circundam entre 28,6°C e 31,8°C. A distribuição espacial da variação de temperatura na passagem consistiu na predominância de valores entre 30-31,8°C, havendo parcelas a nordeste com temperaturas de até 30°C.

Em 2020, a temperatura obtida para a superfície aquática concebeu-se entre 27,9-36,7°C. Novamente os valores de pixel de maior temperatura concentraram-se na porção extremo sul, próximo aos bancos de areia característicos da região, podendo ser fruto de efeitos de borda. Majoritariamente, o corpo do lago variou entre 28°C e 30°C, havendo pequenas parcelas próximas à Tefé e ao sul do Lago com variações entre 30°C e 32°C.

Para 2021, os valores de temperatura variaram entre 27,7-30,9°C. Espacialmente, a superfície do Lago ficou homogeneizada entre 28°C e 30°C, havendo somente algumas parcelas nas bordas do Lago apresentando valores superiores a 30°C e uma pequena parcela nas ilhas formadas a sul, com valores inferiores a 28°C.

Apesar do pequeno intervalo de tempo entre as passagens, o comportamento de temperatura na superfície aquática apresentou padrões desiguais em 2022. Em setembro, com o volume do Lago maior, a temperatura apresentou oscilações entre 19,1-31,1°C, havendo predominância de temperatura entre 28-30°C em todo o lago. As porções de menor temperatura na passagem correspondem novamente às porções em torno de bancos de areia ao Sul e no braço do rio Bauana.

Na passagem de outubro de 2022, agora com o volume do Lago reduzido drasticamente, os valores médios de temperatura foram maiores, oscilando entre 27,6-35,6°C. A predominância de temperatura circundou entre 28-30°C, havendo apenas uma pequena parcela na porção central com temperaturas inferiores. Os maiores registros de temperatura ficaram espacialmente concentrados nas bordas do Lago, especialmente a norte, na porção centro-sul e nas ilhas de bancos de areia localizadas a sul.

Os resultados para 2023 também apresentaram divergentes comportamentos de temperatura. Na passagem de agosto de 2023, os valores de temperatura variaram entre 29.2°C-33.4°C. Constata-se que majoritariamente à leste as temperaturas comportaram-se na casa dos 30°C-32°C, enquanto à oeste, as temperaturas predominantes ficaram acima dos 32°C. Pequenas regiões nas ilhas de bancos de areia a sul obtiveram resultados com valores menores que 30°C.

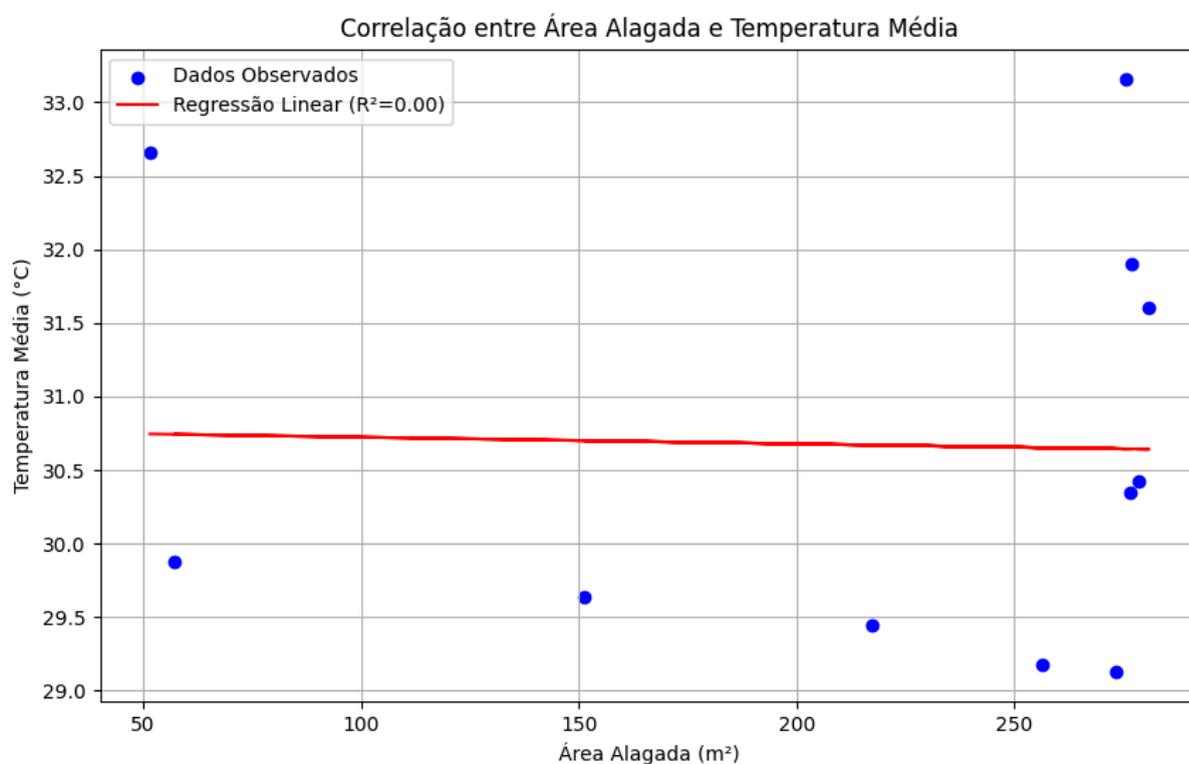
Já na segunda passagem em setembro de 2023, o comportamento da temperatura foi mais homogêneo, ainda que em menor área alagada, variando entre 28.9°C-31,7°C. Majoritariamente todo o corpo do Lado apresentou temperaturas entre 28.93°C e 30°C, havendo algumas porções a norte e a sul com temperaturas entre 30°C e 31,7°C.

Para 2024, as temperaturas das passagens selecionadas apresentaram a maior homogeneidade de maiores temperaturas entre toda a série, evento também relatado por inúmeros noticiários (WWF, 2024). Em agosto de 2024 os valores de temperatura variaram entre 32,2 °C - 34,4 °C. Todo o corpo do reservatório, devido à metodologia empregada, comportou-se representativamente em uma única classe.

Na passagem de setembro de 2024, observa-se o recuo da área alagada com temperaturas em torno de 29,4 °C - 35,2 °C. Temperaturas entre 32 °C e 35,2 °C, abarcaram todo corpo do reservatório, apresentando temperaturas entre 31,39 °C - 32 °C, apenas algumas regiões a nordeste e a sul.

Segundo Wang et al. (2024) extremos de temperatura quente na atmosfera podem afetar a temperatura da água na superfície do lago, sendo responsáveis por 24°C das tendências de aquecimento de superfície de lagos no verão, padrão observado em diversos estudos, como o de Jungkeit-Milla et al 2024, Zhang et al (2024), inclusive na região de estudo. Em Fleischmann et al (2024), constatou-se o aumento de 0,6°C na temperatura de 10 corpos d'água na mesorregião central da Amazônia entre 1990-2023, havendo também uma crise significativa com a redução de área alagada em alguns lagos, ficando com áreas abaixo dos seus 10%.

Os resultados obtidos apresentaram um Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ): 0.001, indicando que a variação na área alagada explica menos de 1% da variação na temperatura média, com P-valor do coeficiente da área alagada (x1): 0.934. Seguindo as estatísticas abordadas, o ajuste geral apresentou baixa significância do modelo sugerindo que a variação da área alagada não está diretamente associada às médias de temperatura nesse caso (Figura 15).

**Figura 15** - Regressão estatística considerando área alagada e temperatura de superfície.

Fonte: autora (2024).

Segundo alguns trabalhos, a ausência de uma relação significativa pode ser atribuída a complexidade dos fatores climáticos, uma vez que a temperatura não depende exclusivamente da área alagada, mas também de variáveis como umidade, radiação solar, sazonalidade e circulação atmosférica, além de possíveis problemáticas oriundas do sensor, (como resolução temporal que, adicionada a condicional de ausência de nuvens, possui um nível amostral reduzido) e a metodologia de obtenção de temperatura (Wang et al, 2024; Wermuth, 2022).

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou analisar padrões de comportamento de temperatura e área alagada do lago Tefé com base em processamento orbital em nuvem e produtos Landsat8. As metodologias utilizadas para o mapeamento da temperatura da superfície aquática e área alagada derivaram dos estudos de Ermida et al (2020), e da utilização de índices espectrais (NDWI, MNDWI e AWEI) respectivamente. Devido à ausência de dados secundários comparativos para a região de estudo, a metodologia de recuperação de temperatura de superfície não pode ser validada, sendo usados os produtos apenas com o fator processamento, obtendo-se, portanto, dados preliminares para futuras correções. Quanto à área alagada, a complexidade do corpo hídrico demandou a utilização dos três índices para que o mapeamento da lâmina d'água fosse satisfatório.

Com a interpretação dos dados fluviométricos disponíveis da estação Fluviométrica de Tefé-Missões, pode-se observar que a área alagada obtida remotamente, obteve correspondência com as oscilações de cota marcadas pelo monitoramento convencional, ainda trazendo discussões referentes ao comportamento pluviométrico regional e como seu impacto contribuiu para as oscilações de níveis da água. Os dados obtidos também refletiram a deficiência da constância de monitoramento de variáveis hidrológicas no país, representadas estas pela ausência de estações ativas na região e a lacuna de dados.

Por fim, estatisticamente, com metodologia utilizada, as variáveis temperatura de superfície e área alagada não apresentaram coeficiente de correlação satisfatório, contrapondo a tendência já analisada em outros trabalhos na área de hidrologia. Porém, a complexidade de alterações de padrões físico-químicos em Lagos amazônicos frente a mudanças climáticas ainda é incipiente, transformando os resultados da presente pesquisa em referência para discussões futuras e aplicação de políticas públicas frente à problemática.

## REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Rede Hidrometeorológica Nacional - Sistema HIDRO**, v6.0.8475.7. 2024. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidro/telemetria/serieHistorica.aspx#>.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Relatório de situação dos recursos hídricos no Brasil – 2017**. Brasília: ANA, 2017.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Total de estações em operação e gerenciadas pela ANA por UF - Fluviométrica**. 11 abr. 2023. Disponível em: [https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/126b9fa4131644988506858063c35a5b\\_1/about](https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/126b9fa4131644988506858063c35a5b_1/about).

Alcantara, E. et al. Remote sensing of water surface temperature and heat flux over a tropical hydroelectric reservoir. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, 2010.

Alsdorf, D. et al. Seasonal water storage on the Amazon floodplain measured from satellites. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, p. 2448-2456, 2010.

Ambrizzi, T. et al. **Base Científica das Mudanças Climáticas Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Rio de Janeiro: PBMC, 2013.

Asner, G. P.; Alencar, A. Drought impacts on the Amazon forest: The remote sensing perspective. **New Phytologist**, v. 187, n. 3, p. 569-578, 2010.

Ayres, J. M. **As Matas de Várzea do Marimauá**. Belém: Sociedade Civil Marimauá, 123p, 2006.

Baker, J. C. A. et al. Evapotranspiration in the Amazon: spatial patterns, seasonality, and recent trends in observations, reanalysis, and climate models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 4, p. 2279–2300, 2021.

Barata, C. F.; Caputo, M. V. Geologia do petróleo da Bacia do Solimões. O “estado da arte”. **Anais do 4º PDPETRO**, Campinas, SP, 21-24 out. 2007.

Bayable, G. Spatiotemporal variability of lake surface water temperature and water quality parameters and its interrelationship with water hyacinth biomass in Lake Tana, Ethiopia. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 33, p. 1–25, 2024.

Brito, H. C. de; Vasconcelos, R. S.; Rufino, I. A. A.; Brito, Y. M. A. Uso de sensoriamento remoto para monitoramento de parâmetros de qualidade de água no rio Doce, Minas Gerais, Brasil. **Caminhos de Geografia**, v. 23, n. 90, p. 108–119, 2022.

Brubacher, J. P.; Guasselli, L. A.; Oliveira, G. G. Delimitação de áreas inundáveis a partir de Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) no Município de Esteio (RS, Brasil). **Pesquisas em Geociências**, v. 44, n. 2, p. 367–376, 2017.

Carmo, M. R. **Análise morfotectônica da região entre Tefé e Coari, Amazonas**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas, 109p, 2010.

Castro, R. G. **Impactos socioambientais causados pelas cheias extremas aos moradores da bacia hidrográfica urbana do igarapé Xidari, médio Solimões-AM, ocorridas entre 1993 a 2018**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Amazonas, 117p, 2019.

Cho, J. et al. A study on the relationship between Atlantic sea surface temperature and Amazonian greenness. **Ecological Informatics**, v. 5, n. 5, p. 367-378, 2010.

Christofoletti, A. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1981.

Conti, J. B. Considerações sobre as mudanças climáticas globais. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, Brasil, v. 16, p. 70–75, 2011.

Data Center Dynamics. **O desafio de conectar as áreas remotas do Brasil**. 03 jul. 2024.

Disponível em:

<https://www.datacenterdynamics.com/br/an%C3%A1lises/o-desafio-de-conectar-as-zonas-remotas-do-brasil/>.

Duarte, A. F.; Cunha, R. M.; Lima, W. S. A necessidade de otimização das informações meteorológicas na amazônica ocidental. **Boletim SBMET**, vol. 30, n. 1, p. 21-31, 2006.

Eerola, T. T. Mudanças Climáticas: Passado, Presente e Futuro. In: **Fórum de Ecologia**. Florianópolis, 2008.

Ermida, S. L. et al. Google Earth Engine open-source code for land surface temperature estimation from the Landsat series. **Remote Sensing**, v. 12, n. 9, 2020.

Esteves, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

Esteves, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

Fearnside, P. M. Desmatamento na Amazônia e seus impactos ecológicos e sociais. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, 2005.

Fiquem Sabendo. **Estados da Amazônia Legal não têm estratégias de alerta e de contingência permanentes para eventos climáticos extremos, diz relatório**. 27 out. 2021.

Disponível em:

<https://fiquemsabendo.com.br/meio-ambiente/amazonia-legal-alerta-eventos-climaticos-extremos>.

Fisch, G.; Marengo, J. A.; Nobre, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 28, n. 2, p. 101-126, 1998.

Freitas, R.; Moura, A. C. Alterações climáticas e emissões de gases em lagos brasileiros. **Caderno de Geociências**, v. 12, n. 3, 2020.

Freitas, T. E. et al. Impactos da redução de áreas alagadas em ecossistemas aquáticos brasileiros. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 39, n. 2, 2018.

G1. **Imagem de satélite mostra impacto da seca em lago no AM**. 30 set. 2024. Disponível em:

<https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2024/09/30/imagem-de-satelite-impacto-seca-lago-no-am.ghtml>.

Gagliardi, L. M. **Metabolismo de lagos tropicais - Efeito das alterações climáticas sazonais, morfometria dos lagos e característica de suas bacias**. Tese (Doutorado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre). Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, Universidade Federal de Minas Gerais, 113p, 2015.

Gonçalves, F. T. T. Controles limnológicos sobre a formação de rochas geradoras de petróleo lacustres: o exemplo da bacia de Camamu, Nordeste do Brasil. **Geociências**, v. 20, n. 1, p. 5–23, 2001.

Horne, A.J.; Goldman, C.R. *Limnology*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1994.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Sistema de Comando de Incidentes (SCI)**. 12 jun. 2024. Disponível em:

<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/fiscalizacao-e-protecao-ambiental/emergencias-ambientais/sci>.

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Instituto Chico Mendes intensifica monitoramento após seca intensa que ameaça botos na Amazônia**. 09 out. 2024. Disponível em:

<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/noticias/ultimas-noticias/instituto-chico-mendes-intensifica-monitoramento-apos-seca-intensa-que-ameaca-botos-na-amazonia>.

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Plano de manejo da Floresta Nacional de Tefé: Volume I – Diagnósticos**. Brasília, DF: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2014.

Jornal da Unesp, **Seca que afetou a Amazônia em 2023 causou a maior queda nos níveis dos rios já registrada, e está relacionada a mudanças climáticas, mostra estudo**. 24 abr. 2024. Disponível em:

<https://jornal.unesp.br/2024/04/24/seca-que-afetou-a-amazonia-em-2023-causou-a-maior-queda-da-nos-niveis-dos-rios-ja-registrada-e-esta-relacionada-a-mudancas-climaticas-mostra-estudo/>

La, Z. et al. A Strict Validation of MODIS Lake Surface Water Temperature on the Tibetan Plateau. **Remote Sensing**, v. 14, n. 21, p. 5454, 2022.

Lima, N. A. S. et al. Índices Espectrais por Sensoriamento Remoto com os Satélites LANDSAT-5 e SENTINEL-2 no entorno do reservatório Poço da Cruz - PE. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, n. 5, p. 299-309, 2019.

Maciel, D. et al. Retrieving Total and Inorganic Suspended Sediments in Amazon Floodplain Lakes: A Multisensor Approach. **Remote Sensing**, v. 11, n. 15, 33p, 2019.

MapBiomias. **Dados inéditos mostram que os 9 países amazônicos perderam 1 Mha de superfície de água na última década**. 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2023/09/20/dados-ineditos-mostram-que-os-9-paises-amazonicos-s-perderam-1-mha-de-superficie-de-agua-na-ultima-decada/>.

MapBiomias. **Mais de 90% do desmatamento da Amazônia é para abertura de pastagem**. 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2024/10/03/mais-de-90-do-desmatamento-da-amazonia-e-para-abertura-de-pastagem/>.

MapBiomias. **MapBiomias Água Amazônia: Coleção 1**. Disponível em: <https://plataforma.amazonia.mapbiomas.org/agua>.

MapBiomias. **Superfície de água no Brasil voltou a ficar abaixo da média em 2023**. 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2024/06/26/superficie-de-agua-no-brasil-voltou-a-ficar-abaixo-da-media-em-2023/>.

Marengo, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 83–96, 2008.

Marengo, J. A. et al. Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: A review. **Acta Amazonica**, v. 54, n. esp. 1, 2024.

Marengo, J.A. Interannual variability of surface climate in the Amazon Basin. In: **J. Climatol.**, v. 12, n. 8, p. 853-863, 1992.

Margalef, R. **Ecología**. Barcelona: Omega, 1983.

Melo, C.; Schmidt, M. A. R.; Gonçalves, R. M. Comparação das imagens Landsat 8 e Sentinel 2 para o monitoramento de reservatórios de abastecimento no Cerrado brasileiro. **Geociências**, v. 39, n. 4, 2020.

Meneses, P. R.; Almeida, T. de; Baptista, G. M. M. (Org.). **Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação**. São Paulo: Oficina de Textos, 334p, 2019.

Mongabay. **Imagens de satélite mostram probabilidade maior de seca e incêndios na Amazônia este ano**. 30 abr. 2020. Disponível em: <https://brasil.mongabay.com/2020/04/imagens-de-satelite-mostram-probabilidade-maior-de-seca-e-incendios-na-amazonia-este-ano/>.

Motta, M. B. **Proveniência da formação Içá e de sedimentos do rio Solimões, entre os municípios de Tefé e Manacapuru - Amazonas**. Dissertação (Mestrado em Geologia). Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas, 112p, 2008.

Mustafa, T. et al. Using water indices (NDWI, MNDWI, NDMI, WRI and AWEI) to detect physical and chemical parameters by applying remote sensing and GIS techniques.

**International Journal of Research**, v. 5, n. 10, p. 117-128, 2017.

Nobre, C. A.; Reid, J.; Veiga, A. P. S. **Fundamentos científicos das mudanças climáticas**. São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, 44 p, 2012.

Nobre, C. A.; Sampaio, G.; Salazar, L. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, 2007.

Novo, E. M. L. M. Monitoramento de quantidade e qualidade da água e sensoriamento remoto. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo, 2007.

Novo, E. M. L. M. et al. Técnicas avançadas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo de mudanças climáticas e ao funcionamento dos ecossistemas amazônicos. **Acta Amazonica**, v. 35 n. 2, 2005.

Ozelkan, E. Water body detection analysis using NDWI indices derived from Landsat-8 OLI. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 29, n. 2, 2019.

Righi, E. et al. Google Earth Engine: uma análise bibliométrica da produção científica. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 43, p. 62-77, 2024.

Santos, L. L. **GEESEBAL: Uma ferramenta Google Earth Engine para estimativa de séries temporais de evapotranspiração**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal). Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 67p, 2020.

Serviço Geológico do Brasil - CPRM. **Instrução Técnica DIGEOB 05 – 01.07.2020: Unidades litoestratigráficas e procedimentos para definição de siglas**. Diretoria de Geologia e Recursos Minerais / Departamento de Geologia, 2020.

Silva, A. C. C. **As cheias excepcionais e os impactos socioambientais na cidade de Tefé-AM**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Amazonas, 130p, 2018.

Silva, A. D. da; Pinheiro, E. S.. A problemática dos resíduos sólidos urbanos em Tefé, Amazonas. **Sociedade & Natureza**, v. 22, n. 2, p. 297-312, 2010. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3213/321327199006.pdf>.

Silva, A. J. P. da; Lopes, R. da C.; Vasconcelos, A. M.; Bahia, R. B. C. Bacias sedimentares paleozóicas e meso-cenozóicas interiores. In: Bizzi, L. A.; Schobbenhaus, C.; Vidotti, R. M.; Gonçalves, J. H. (eds.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**. Brasília: CPRM, 2003.

Silva, M. V. et al. Relationships between Pacific and Atlantic ocean sea surface temperatures and water levels from satellite altimetry data in the Amazon rivers. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, n. 32, 2018.

Silva, T. G. da; Rabelo, D.; Nunes, H. K. D. B. Geomorfologia fluvial e geodiversidade do Lago de Tefé (Tefé, Amazonas, Brasil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 4, p. 2396-2411, 2024.

Sogno, P.; Klein, I.; Kuenzer, C. Remote sensing of surface water dynamics in the context of global change - A review. **Remote Sensing**, v. 14, n. 10, 2022.

Souza Junior, C. M. et al. Amazon severe drought in 2023 triggered surface water loss. **Environmental Research: Climate**, v. 3, n. 4, 2024.

Souza Junior, C. M. et al. Long-term annual surface water change in the Brazilian Amazon biome: potential links with deforestation, infrastructure development and climate change. **Water**, v. 11, n. 3, 2019.

Souza, S. A. S. de et al. Spatiotemporal variability of precipitation and surface temperature in the southern mesoregion of Amazonas, Brazil, during the occurrence of ENSO. **Ciência e Natura**, v. 44, n. 48, 2022.

Tavares, M. H. **Estimativas da temperatura superficial da água por sensores remotos: acurácia e aplicabilidade com modelos de temperatura**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 102p, 2019.

Tundisi, J.G.; Tundisi, T.M.; Rocha, O.; Starling, F. L. R. M. Limnologia de águas interiores: impactos, conservação e recuperação de ecossistemas aquáticos. In: **Águas Doces no Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação**. 2 ed. S. Paulo: Escrituras Editora, 2002. p. 187.

Tundisi, J. G. **Limnologia**. São Paulo : Oficina de Textos, 2008.

Wang, X. ; Shi, K.; Qin, B.; Zhang, Y. ; Woolway, R. Disproportionate impact of atmospheric heat events on lake surface water temperature increases. **Nature Climate Change**, v. 14, p. 1172-1177, 2024.

Wermuth, L. Using Landsat 8 images for monitoring surface water temperature in an urban tropical reservoir. In: **Proceedings of the 39th IAHR World Congress**, Granada, 19-24 jun. 2022.

Wetzel, R.G. **Limnology**. 2nd Edition, Saunders College Publishing, Philadelphia, 1983.

Wetzel, R. G. **Limnology: lake and river ecosystems**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2001.

World Wind Fund. **Água de 12 lagos da Amazônia já está mais quente que em 2023, quando 330 botos morreram**. 2024. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?89800/gua-de-12-lagos-da-Amazonia-ja-esta-mais-quente-que-em-2023-quando-330-botos-morreram>.

Xie, H. et al. Evaluation of Landsat 8 OLI imagery for unsupervised inland water extraction. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 8, p. 1826–1844, 2016.

Zanotta, D. C.; Ducati, J. R.; Gonçalves, G. A. Surface temperature patterns of Lagoa dos Patos, Brazil, using NOAA-AVHRR data: an annual cycle analysis. **Pesquisas em Geociências**, v. 37, n. 3, p. 219–226, 2010.

## 8 ANEXOS

```
# Importando as bibliotecas necessárias
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import linregress

# Dados
dados = {
    "areaAlagada": [278.54, 280.88, 276.65, 217.43, 273.36, 256.26,
151.36, 276.73, 57.08, 275.73, 51.51],
    "temperaturaMedia": [30.42, 31.6, 30.35, 29.44, 29.13, 29.18,
29.64, 31.9, 29.88, 33.16, 32.66]
}

# Criando um DataFrame
df = pd.DataFrame(dados)

# Calculando a regressão linear
slope, intercept, r_value, p_value, std_err =
linregress(df['areaAlagada'], df['temperaturaMedia'])

# Gerando valores previstos pela regressão
df['regressao'] = slope * df['areaAlagada'] + intercept

# Plotando o gráfico de dispersão
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.scatter(df['areaAlagada'], df['temperaturaMedia'], label="Dados
Observados", color='blue')
plt.plot(df['areaAlagada'], df['regressao'], label=f"Regressão Linear
(R²={r_value**2:.2f})", color='red')
plt.title("Correlação entre Área Alagada e Temperatura Média")
plt.xlabel("Área Alagada (m²)")
plt.ylabel("Temperatura Média (°C)")
plt.legend()
plt.grid()
plt.show()

# Exibindo métricas da regressão
print(f"Coeficiente de correlação (R): {r_value:.2f}")
print(f"R²: {r_value**2:.2f}")
print(f"P-valor: {p_value:.2e}")
```

```
print(f"Erro padrão da inclinação: {std_err:.2f}")
```