Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
ISSN 2237-8642

ANÁLISE DE PERÍODOS DE ESTIAGEM EM ANOS DE EL NIÑO NO LAGO GRANDE DE MONTE ALEGRE-PA

Analysis of drought periods during El Niño years in Lago Grande de Monte Alegre-Pa

Análisis de períodos de sequía en años de El Niño en el Lago Grande de Monte Alegre-PA

Gianlucca Wanghon De Sousa Guimarães
Instituto de Ciências e Tecnologia das Águas, Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA)
gianlucca.guimaraes@gmail.com

Paulo Roberto Brasil Santos
Instituto de Ciências e Tecnologia das Águas, Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA)
paulo.rbs@ufopa.edu.br

Roseilson Souza do Vale
Instituto de Engenharia e Geociências, Universidade Federal do Oeste de Pará (UFOPA)
roseilson.vale@ufopa.edu.br

Livaldo de Oliveira Santos
Instituto de Engenharia e Geociências, Universidade Federal do Oeste de Pará (UFOPA)
livaldo.santos@ufopa.edu.br

Resumo: Este estudo investiga a intensificação de eventos climáticos extremos na Bacia Amazônica, com foco nos impactos das secas severas no Lago Grande de Monte Alegre (LGMA). A importância reside na necessidade de compreender a dinâmica hídrica dos sistemas lacustres amazônicos para mitigar os efeitos das mudanças climáticas nas comunidades ribeirinhas e ecossistemas associados. Utilizou-se imagens de satélite para analisar a variação temporal da área do LGMA entre 2000 e 2024, durante os meses mais secos. O Índice de Diferença Normalizada da Água Modificada (MNDWI) foi calculado para estimar a área do lago. Uma ANOVA foi aplicada para verificar diferenças nas áreas ao longo dos anos. Dados climatológicos dos índices Niño 3.4 e Atlântico Tropical Norte (ATN) foram correlacionados com as variações da área hídrica por meio de correlação parcial. A área hídrica do

LGMA apresentou va riações significativas com máximo em 2002 e o mínimo em 2024. O estudo revelou a influência do Atlântico Tropical Norte por meio da correlação parcial entre a área do lago e o índice ATN, removendo o efeito do NINO3.4. A dinâmica hídrica do LGMA é influenciada tanto pelo El Niño quanto pelas anomalias do Atlântico Norte, sendo este último, neste estudo, o fator dominante na regulação hidrológica do lago.
Palavras-chave: Secas Amazônicas. El Niño. Sensoriamento Remoto. MNDWI.

Abstract: This study investigates the intensified occurrence of extreme climatic events in the Amazon Basin, focusing on the impacts of severe droughts on Lago Grande de Monte Alegre (LGMA). This research is significant for understanding the hydrological dynamics of Amazonian lake systems, crucial for mitigating climate change impacts on riparian communities and associated ecosystems. Satellite imagery was used to analyze temporal variations in the LGMA's surface area between 2000 and 2024, focusing on the driest months. The Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) was calculated to estimate lake extent. An ANOVA was conducted to assess inter-annual differences in lake area. Climatological data from the Niño 3.4 and Tropical North Atlantic (TNA) indices were correlated with observed changes in water coverage using partial correlation analysis. The LGMA's water area exhibited significant fluctuations, peaking in 2002 and reaching its minimum in 2024. The study identified a significant influence of the Tropical North Atlantic, evidenced by a partial correlation between lake area and the TNA index after controlling for the effect of the Niño 3.4 index. Overall, the LGMA's hydrological dynamics are influenced by both El Niño and North Atlantic anomalies, with the latter identified as the dominant factor in its hydrological regulation.
Keywords: Amazonian Droughts. El Niño. Remote Sensing. MNDWI.

Resumen: Este estudio investiga la intensificación de eventos climáticos extremos en la Cuenca Amazónica, enfocándose en los impactos de las sequías severas en el Lago Grande de Monte Alegre (LGMA). La importancia radica en la necesidad de comprender la dinámica hídrica de los sistemas lacustres amazónicos para mitigar los efectos del cambio climático en las comunidades ribereñas y ecosistemas asociados. Se utilizaron imágenes satelitales para analizar la variación temporal de la zona del LGMA entre 2000 y 2024, durante los meses más secos. Se calculó el Índice de Diferencia Normalizada del Agua Modificado (MNDWI) para estimar la superficie del lago. Se aplicó un ANOVA para verificar diferencias a lo largo de los años. Los datos climatológicos de los índices Niño 3.4 y Atlántico Tropical Norte (ATN) se correlacionaron con las variaciones de la zona hídrica mediante una correlación parcial. La zona hídrica del LGMA mostró variaciones significativas con un máximo en 2002 y un mínimo en 2024. El estudio reveló la influencia del Atlántico Tropical Norte a través de la correlación parcial entre el área del lago y el índice ATN, eliminando el efecto del NINO3.4. La dinámica hídrica del LGMA está influida tanto por El Niño como por las anomalías del Atlántico Norte, siendo este último, en este estudio, el factor dominante en la regulación hidrológica del lago.
Palabras clave: Sequías amazónicas. El Niño. Teledetección. MNDWI.

Submetido em: 19/05/2025
Aceito para publicação em: 02/11/2025
Publicado em: 14/12/2025

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a Bacia Amazônica tem sido palco de uma intensificação de eventos climáticos extremos, cujos impactos se manifestam de maneira significativa tanto no meio ambiente quanto nas dinâmicas sociais das populações que dependem dos recursos naturais da região (Tomasella *et al*., 2010). Esses eventos refletem a complexa interação entre fatores climáticos globais e regionais, influenciando diretamente a hidrologia da bacia e gerando implicações ecológicas e socioeconômicas de grande magnitude.

Entre os ecossistemas mais afetados, destacam-se as zonas úmidas amazônicas, cuja variabilidade hídrica exerce um papel crucial na manutenção da biodiversidade e na provisão de serviços ecossistêmicos essenciais, incluindo a regulação climática, a manutenção de habitats aquáticos e a oferta de recursos pesqueiros, que representam uma importante fonte de proteína para grande parte da população local (Barros e Albernaz, 2014).

A intensificação das variações no regime de precipitação na Bacia Amazônica tem resultado em uma alternância entre períodos de cheias extremas e secas severas, sendo estas últimas cada vez mais frequentes e intensas. Estudos indicam que essas secas estão fortemente associadas ao fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS), evidenciando uma relação direta entre a dinâmica hidrológica da região e as variações na temperatura da superfície do Oceano Pacífico tropical (Marengo, 2005; Tomasella *et al.,* 2013).

Marengo e Espinosa (2016) analisaram secas e enchentes extremas na Amazônia entre 1906 e 2014, identificando 19 eventos, sendo 12 secas e 7 enchentes, e essas secas extremas foram majoritariamente associadas ao El Niño (cinco eventos) ou à combinação desse fenômeno com o aquecimento do Atlântico Tropical Norte (quatro eventos).

O Lago Grande de Monte Alegre se destaca como um dos principais locais de extração de recursos aquáticos, fornecendo subsistência e renda para as comunidades ribeirinhas. Sua influência na pesca está relacionada tanto à abundância e diversidade de espécies disponíveis quanto às condições ambientais favoráveis, que possibilitam a manutenção das populações pesqueiras ao longo do ano (Cerdeira *et al.,* 2000).

Eventos históricos de seca extrema, como os de 1996 e 2005, foram amplamente reportados pelas populações ribeirinhas, que observaram elevadas taxas de mortalidade de

espécies aquáticas, frequentemente atribuídas à hipóxia resultante da redução do volume de água e do aumento da temperatura nos corpos hídricos (Santos *et al.,* 2023).

Essa conjuntura acarreta impactos diretos na economia regional, dificultando atividades como a pesca e o transporte, além de restringir o acesso a serviços essenciais, como saúde e educação (Tomasella *et al.,* 2010). Situação semelhante foi registrada na seca de 2010, considerada ainda mais intensa que a de 2005, evidenciando uma tendência de agravamento desses eventos extremos na última década (Marengo *et al.,* 2011).

Santos *et al.* (2023), destacam que a mobilidade dessas comunidades, que depende da interconectividade entre os rios principais e os lagos de várzea, torna-se drasticamente comprometida durante períodos de estiagem severa, uma vez que os canais de ligação entre esses ambientes tornam-se inacessíveis.

Diante desse contexto, compreender as variações na dinâmica hídrica dos sistemas lacustres amazônicos é essencial para avaliar os impactos das mudanças climáticas e a influência de fenômenos climáticos globais na hidrologia da região. O presente estudo tem como objetivo analisar a variação temporal da área do Lago Grande de Monte Alegre (LGMA) durante os meses mais secos, no período de 2000 a 2024, utilizando imagens de satélite e investigar a correlação dessas variações com a ocorrência do fenômeno El Niño. Ao estabelecer essa relação, o estudo busca contribuir para a compreensão dos processos hidrológicos na região e fornecer subsídios para a formulação de estratégias que visam a mitigação dos impactos das secas sobre as comunidades ribeirinhas e os ecossistemas associados.

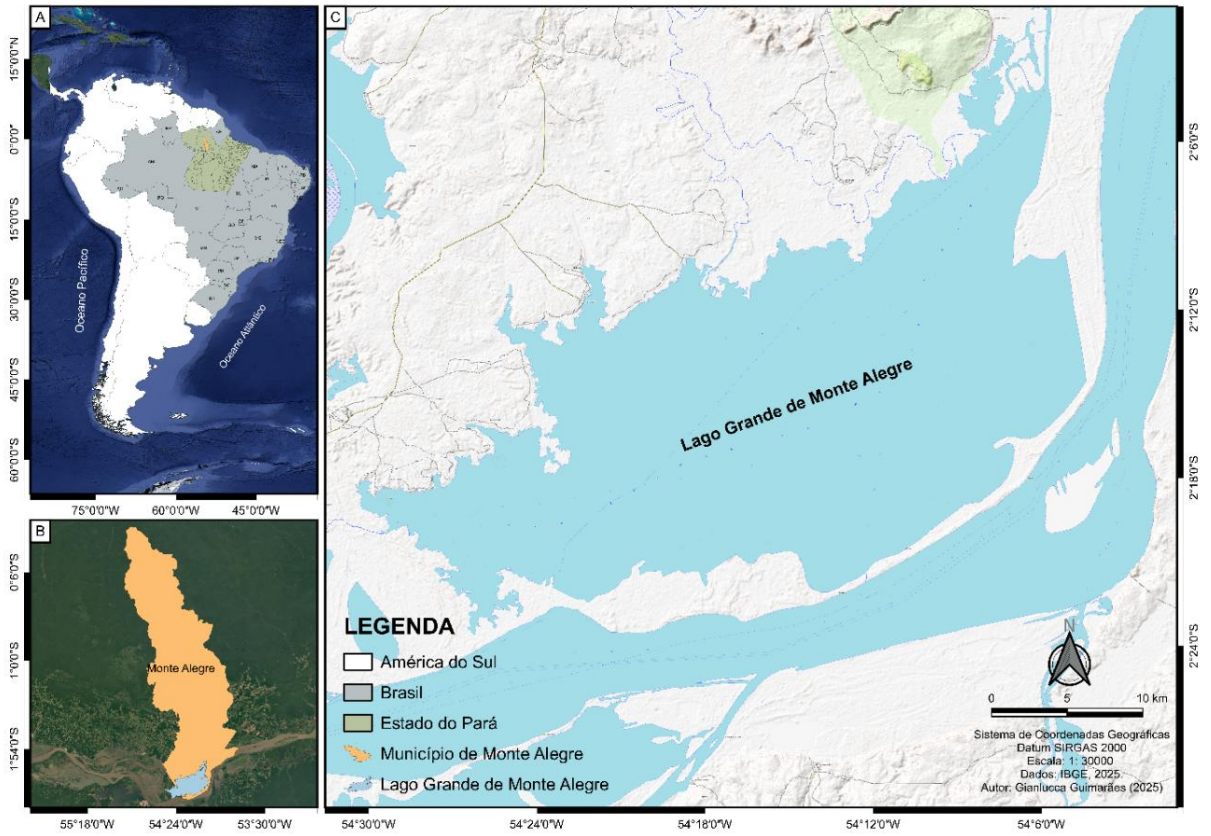
2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

A área de estudo situa-se na porção noroeste do estado do Pará, mais precisamente na margem esquerda do rio Amazonas (Figura 1). O Lago Grande de Monte Alegre (LGMA) está localizado na Região Geográfica Intermediária de Santarém e na Região Geográfica Imediata de Santarém, conforme a nova divisão territorial do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), entre as coordenadas de 00°22’52’’ de latitude norte e 02°25’34’’

de latitude sul, e de 53°41’10’’ de longitude leste e de 54°54’13’’ de longitude oeste (BRASIL, 2009).

Figura 1 – Mapa de localização do Lago grande de Monte Alegre. A) Mapa do território brasileiro, com destaque ao estado do Pará (em marrom); B) Município de Monte Alegre com o indicador da área de estudo; C) Área de estudo**.**



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O LGMA está localizado em uma área geomorfologicamente mais estável do que os trechos a montante do rio Amazonas, resultando em uma planície de inundação (Mertes *et al.,* 1995). O clima dominante no município de Monte Alegre é o tipo AWi, clima tropical chuvoso de acordo com a classificação de Köppen, e a temperatura média mensal varia de 25,7 a 27,7 °C. A estação chuvosa é de fevereiro a maio com precipitações pluviométricas médias mensais superiores a 200 mm, sendo abril, o mês mais chuvoso e de setembro a novembro são os meses menos chuvosos (Della *et al.,* 2019).

Este lago, o maior da região, apresenta aproximadamente 60 km de comprimento e 40 km de largura durante a temporada de cheia. Nessa época, o nível da água pode subir até 5 metros em relação ao registrado na estação seca. Sua principal fonte de abastecimento é o rio

Amazonas, com a entrada e saída de água acontecendo através de diversos canais menores. O lago também recebe contribuições de água do Rio Maicuru e de outros rios de menor porte (COSTA *et al*., 1998).

2.2. Imagens de satélite

As imagens utilizadas foram provenientes dos satélites Landsat 5 (sensor TM), Landsat 7 (sensor ETM+) e Landsat 8 (sensor OLI), pertencentes a Collection 2 Level –1, que possuem radiometria bem caracterizada, e resolução espacial de 30 metros, disponíveis gratuitamente no banco de dados do United States Geological Service (USGS) através do portal Earth Explorer. Dessa forma, as imagens foram adquiridas entre os meses de outubro, novembro e dezembro, no período de 2001 a 2024, correspondendo à estação seca da região. Para minimizar interferências na resposta espectral da água, como a presença de densa cobertura de nuvens, para a escolha das imagens, foram consideradas aquelas com a menor quantidade de nuvens sobre a área de estudo.

Como parte da pesquisa, foram realizadas visitas de campo ao Lago Grande de Monte Alegre durante as estações de cheia e seca, com o objetivo de observar diretamente as condições locais e registrar a mudança de paisagem entre as estações por meio de fotografias. Esse contato presencial foi fundamental para compreender de forma mais detalhada a dinâmica da região, ampliando a análise que complementa os dados obtidos remotamente, como mapas e imagens de satélite.

2.3. Dados climatológicos

Os dados climatológicos utilizados foram índices baseados na temperatura da superfície do mar (TSM) dos oceanos Pacífico e Atlântico, sendo eles o índice oceânico Niño, referente à região Niño 3.4 (NINO3.4), localizada entre as coordenadas 5° N a 5° S e 170° W a 120° W no oceano Pacífico central. O segundo é o índice Atlântico Tropical Norte (ATN), que representa as anomalias de TSM na região localizada entre as coordenadas 15° N a 23,5° N e 15° W a 57,5° W. As series históricas desses índices foram extraídas, respectivamente, do repositório público da National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) e do

acervo do curso de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI (https://meteorologia.unifei.edu.br/teleconexoes/indice.php?id=tna).

2.4. Processamento dos dados

O processamento das imagens foi realizado no software livre Quantum Geographic Information System (QGIS) versão 3.16, onde foi calculado o Índice de Diferença Normalizada da Água Modificada (MNDWI) ao longo da série temporal. Inicialmente, foi calculada a reflectância das imagens, seguida pela aplicação do MNDWI por meio da Equação 1. Em seguida, foram determinadas as áreas do lago (km²) durante os três últimos meses da estação seca de cada ano, selecionando, ao final, os três dias com a menor área hídrica registrada.

Para esses procedimentos, foram utilizadas ferramentas internas do QGIS, como "Trena" e "Calculadora Raster", além do plugin "Semi-Automatic Classification Plugin" para o cálculo da reflectância. Por fim, foram gerados mapas de resultados, com o índice MNDWI. Este método facilita a aquisição de parâmetros hídricos relevantes e permite uma análise detalhada da variabilidade espaço-temporal das condições hídricas do LGMA.

$$MNDWI = \frac{\rho Grenn - \rho SWIR1}{\rho Grenn + \rho SWIR1} \quad (1)$$

Onde: ρGrenn: é reflectância da banda verde do Landsat; pSWRI: é reflectância da banda infravermelha de ondas curtas do Landstsat.

O índice de diferença normalizada da água modificada (MNDWI) foi desenvolvido por Xu (2006) para corrigir as limitações do índice de diferença de água normalizada (NDWI). Esse índice varia de -1 a 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam uma maior probabilidade de presença de água (Mcfeeters, 1996).

2.5. Análise dos dados

Para comparar as áreas calculadas entre as estações secas, aplicou-se uma análise de variância (ANOVA) *one-way* e o teste a posteriori de Tukey ao nível de significância de 5%.

Considerou-se como repetição do delineamento experimental, os três dias de menor área hídrica calculados a partir do MNDWI.

Para examinar se há ocorrência de relações entre área hídrica e índices NINO3.4 e ATN, foi aplicada a correlação parcial (Equação 2). Primeiramente, para cada ano da série, calculou-se a média dos índices climatológicos referentes aos meses de outubro, novembro e dezembro, resultando em uma série temporal que sintetiza as anomalias oceânicas durante o período de estiagem mais intensa. Essa série foi então padronizada em conjunto com a série anual da área do lago, garantindo a correspondência exata de pares ordenados ano a ano para análise conjunta. Com os dados devidamente alinhados, procedeu-se ao cálculo da correlação parcial para as seguintes hipóteses: 1) Correlação entre a área do lago e o índice NINO3.4, removendo o efeito do ATN. 2) Correlação entre a área do lago e o índice ATN, removendo o efeito do NINO3.4.

$$r_{Y,Xi,Xj} = \frac{r_{Y,Xi} - r_{Y,Xj} \cdot r_{Xi,Xj}}{\sqrt{\left(1 - r_{Y,Xi}^2\right) \cdot \left(1 - r_{Y,Xj}^2\right)}} \quad (2)$$

Onde: Y é a área do Lago (variável resposta); Xi: variável explicativa principal (NINO3.4 ou ATN); Xj: variável explicativa que será controlada (removendo o efeito de ATN ou NINO3.4); r(Y, Xi): correlação entre a Y e Xi; r(Y, Xj): correlação entre Y e Xj; e r(Xi, Xj): correlação entre NINO3.4 e NTA.

Todas as análises acima foram realizadas no software R 4.3.1 (R Core Team, 2024). Para a correlação parcial, empregou-se o pacote ppcor (Kim, 2015) por meio da função pcor(), complementado pelo pacote psych (Revelle, 2024). As análises de variância (ANOVA) e o teste post-hoc de Tukey foram conduzidas com a função aov() do pacote stats (R Core Team, 2024) e do pacote agrícola e que fornece agrupamentos com letras-diferença significativas (de Mendiburu, 2021).

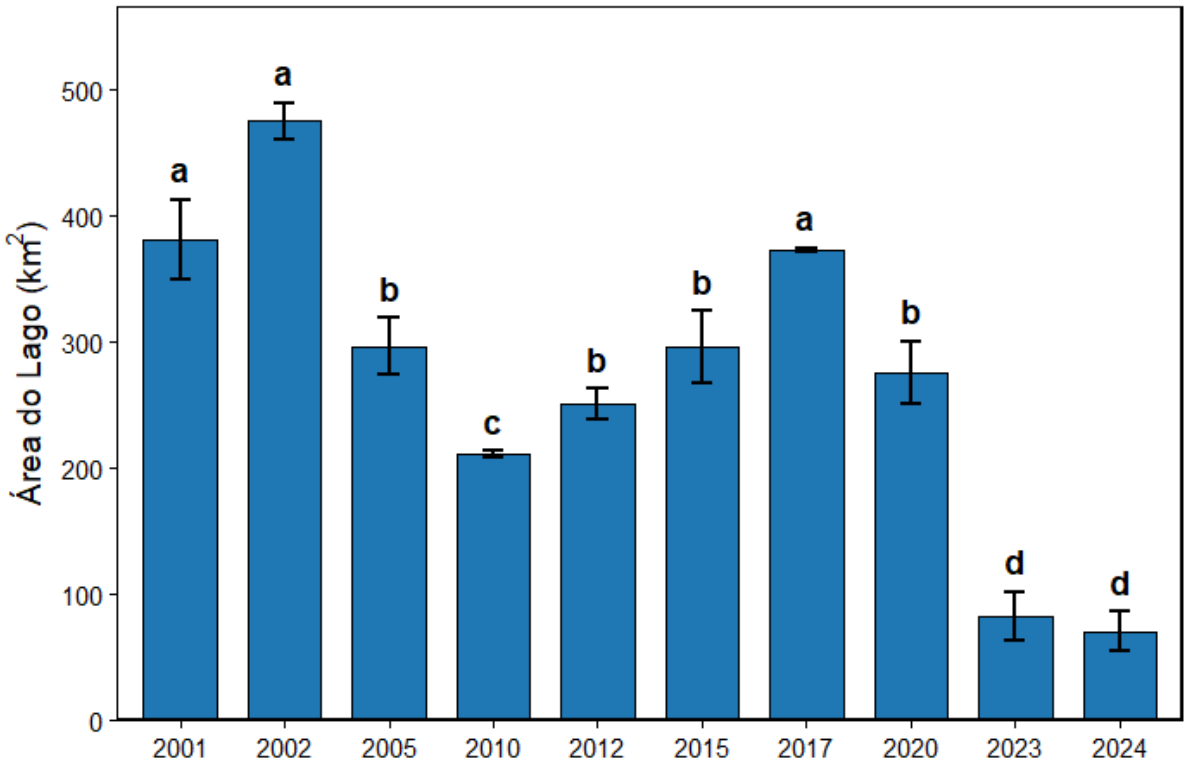
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Entre 2001 e 2024, a área hídrica durante a estação seca no LGMA apresentou variações significativas. O valor máximo registrado foi de 492,38 km², em 2002, enquanto o valor mínimo foi de 47,41 km², em 2024. Conforme mostrado na Figura 2, os anos de 2023 e

2024 apresentaram as menores médias de área hídrica, enquanto 2001, 2002 e 2017 registraram os maiores valores.

A análise de variância (ANOVA) revelou diferenças estatisticamente significativas entre os anos avaliados ($F = 29,87$; $p < 0,0001$). O teste de Tukey indicou que os anos de 2001, 2002 e 2017, representados pela letra "a", apresentaram médias da área do lago significativamente maiores em comparação aos anos indicados pelas letras "b", "c" e "d". Não foram observadas diferenças estatísticas relevantes entre os anos agrupados pela letra "b", demonstrando similaridade nas médias de suas áreas. Por sua vez, o ano de 2010, representado pela letra "c", apresentou médias significativamente menores que os anos indicados por "a" e "b". Por fim, os anos de 2023 e 2024, identificados pela letra "d", exibiram as menores médias, caracterizando uma diminuição expressiva na área do lago. A Figura 2 ilustra essas diferenças, destacadas pelas barras de erro, que representam os desvios padrão das médias comparadas.

Figura 2 – Valores médios e desvio padrão da área hídrica calculados a partir do MNDWI entre os anos de 2001 e 2024. Letras diferentes em cada coluna apresentam diferenças significativas do Teste de Tukey ($p<0,05$)**.**

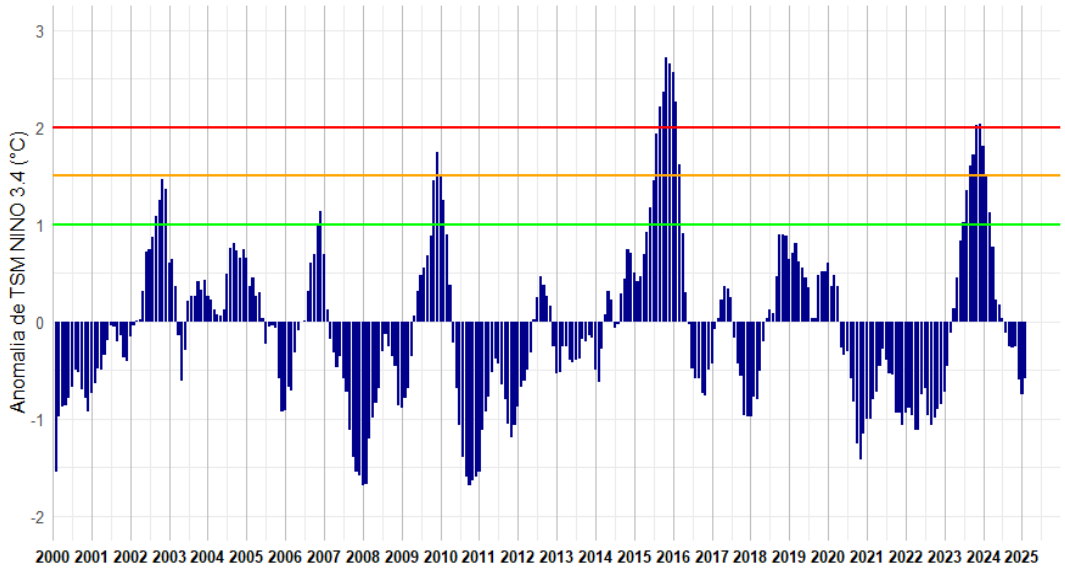


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os dados apresentados na Figura 3 indicam que a variabilidade da TSM na região do Pacífico equatorial tem seguido padrões característicos do fenômeno El Niño ao longo dos anos de 2001 a 2024. Na Figura 3 destaca-se a presença de dois eventos extremos de El-Niño, o de 2015-2016, o mais forte já registrado e o de 2023-2024, ambos com anomalias acima de 2°C. Entretanto, conforme ilustrado pela Figura 2, a menor área hídrica do LGMA não ocorreu durante o intenso El Niño de 2015, mas sim nos anos de 2023 e 2024. Esta aparente discrepância pode ser atribuída ao comportamento do Atlântico Tropical Norte (ATN). Enquanto em 2015 o índice ATN registrou anomalias próximas de zero ou negativas (Figura 4), limitando seu efeito de intensificação de seca. Por outro lado, em 2023 e 2024 observou-se a combinação de um El Niño forte com anomalias positivas expressivas do ATN (> 1,5°C). Esta condição de aquecimento simultâneo dos oceanos Pacífico e Atlântico Tropical Norte é reconhecida por intensificar drasticamente as secas na Amazônia (Marengo e Espinoza, 2016). Além disso, a seca extremamente severa de 2023 contribuiu com a redução drástica da área hídrica, impedindo uma recuperação significativa durante o ano seguinte. Dessa forma, a área hídrica em 2024, ainda sob a influência do El Niño e do ATN positivo, atingiu o seu menor valor da série histórica avaliada, o que configura um evento de seca cumulativa com impactos prolongados. Esses resultados corroboram com os estudos de Grimm e Tedeschi (2009), que associam eventos intensos de El Niño a impactos significativos nos padrões de precipitação e à ocorrência de secas severas no Brasil; porém, a resposta hidrológica final observada em nosso estudo na região do LGMA é também fortemente modulada pelo estado termal do Atlântico Tropical.

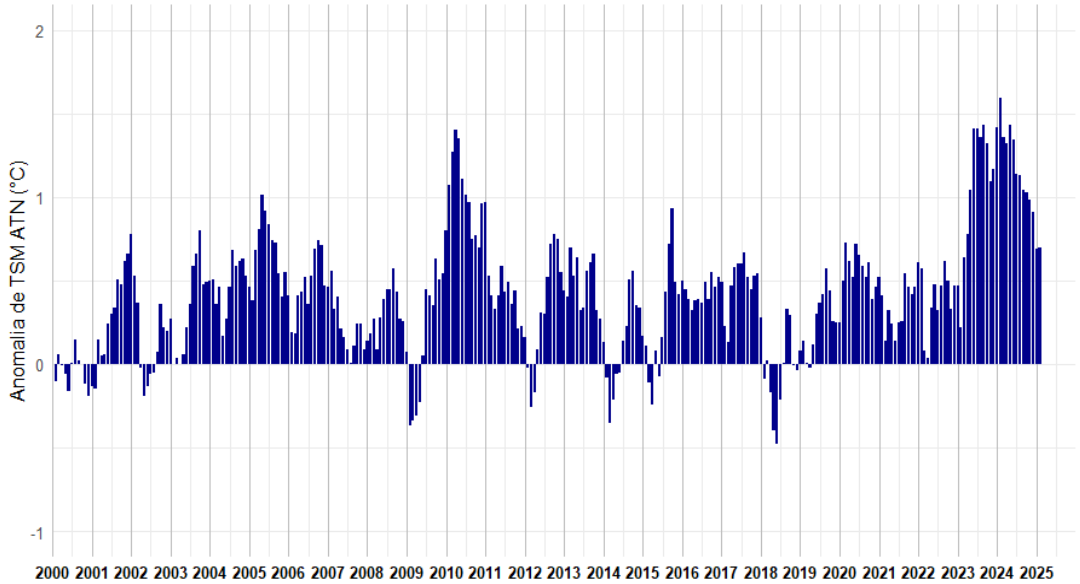
A Figura 4 complementa essa análise ao apresentar as anomalias anuais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Oceano Atlântico Norte (ATN). Os dados mostram que, com exceção dos anos de 2000, 2002, 2007 e 2018, todas as demais medições ultrapassaram o limiar de 0,5 °C. Dentre os anos avaliados, 2024 registrou a anomalia mais expressiva, com valores superiores a 1,5 °C. Essa variação está associada à redução da área do lago, sendo que os anos de 2010, 2023 e 2024 apresentaram anomalias elevadas, o que contribuiu para a prolongação e intensificação dos períodos de estiagem, especialmente em 2023 e 2024.

Figura 3 – Série histórica da variação do índice Niño 3.4 de 2000 a 2024, representando anomalias de temperatura na região central do Oceano Pacífico. O eixo X indica o tempo, com marcações de meses e anos, enquanto o eixo Y mostra os valores do índice, variando de aproximadamente -2 a +3. As linhas horizontais em verde, amarelo e vermelho representam os diferentes níveis de intensidade dos eventos de El Niño, categorizados como Moderado (≥ 1,0), Forte (≥ 1,5) e Muito Forte (≥ 2,0), respectivamente. Destacam-se fortes El Niño em 2015-2016 e 2023-2024**.**



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Figura 4 – Série histórica da variação do Índice do Atlântico Norte (ATN), que mede as anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM) na região tropical do OAN, entre os anos de 2000 e 2024. O eixo X representa o tempo, com marcações de meses e anos, enquanto o eixo Y exibe os valores das anomalias da TSM, variando aproximadamente de -0,5 a +1,8. Destacam-se períodos de forte aquecimento em 2009-2010 e 2023-2024, enquanto períodos de menor variabilidade térmica são observados entre 2015 e 2019.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A correlação parcial entre a área do lago e o índice NINO3.4, removendo o efeito do ATN, foi de r = −0,3791 (p<0,05), indicando uma relação moderadamente negativa. Por outro lado, a correlação parcial entre a área do lago e o índice ATN, removendo o efeito do NINO3.4, foi de r = −0,8698 (p<0,01), apresentando uma correlação negativa altamente significativa.

Este resultado quantitativo confirma por que a redução da área hídrica foi mais severa em 2023 e 2024 (Figura 2) do que em 2015, embora em 2015 tenha registrado as maiores anomalias de TSM no Pacífico no período (Figura 3), quando o ATN não atuou como intensificador.

Os resultados sugerem que o efeito da redução da área do LGMA esteve relacionado com o efeito combinado das anomalias do oceano Atlântico Norte com a região do El-Niño 3.4 do Pacífico. Isto ocorre devido a diminuição no transporte de umidade conduzida pelos ventos alísios para dentro do continente e a diminuição de movimentos ascendentes, consequentemente menos convecção e chuva na região (Marengo, 2005; Tomasella *et al.,* 2010). Assim como o aquecimento do ATN intensifica o gradiente térmico inter-hemisférico, provocando um deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para norte e fortalecendo o ramo descendente da Célula de Hadley sobre a Amazônia, um padrão de teleconexão que fortalece a subsidência e suprime a convecção profunda e a formação de nuvens, consequentemente inibindo a precipitação na região (Grimm e Ambrizzi, 2009; Yoon e Zeng, 2010).

A combinação dos fatores, redução da umidade advectada e a inibição da convecção local por subsidência intensificada, resulta em um déficit hídrico mais pronunciado, explicando a correlação negativa altamente significativa entre a área do lago e o índice ATN. Tais resultados reforçam que, embora tanto o NINO3.4 quanto o ATN influenciem negativamente a área do lago, o impacto do ATN neste estudo, foi estatisticamente mais significativo. Isso sugere que as variações na temperatura do Atlântico Norte Tropical desempenham um papel dominante na regulação hidrológica do lago estudado.

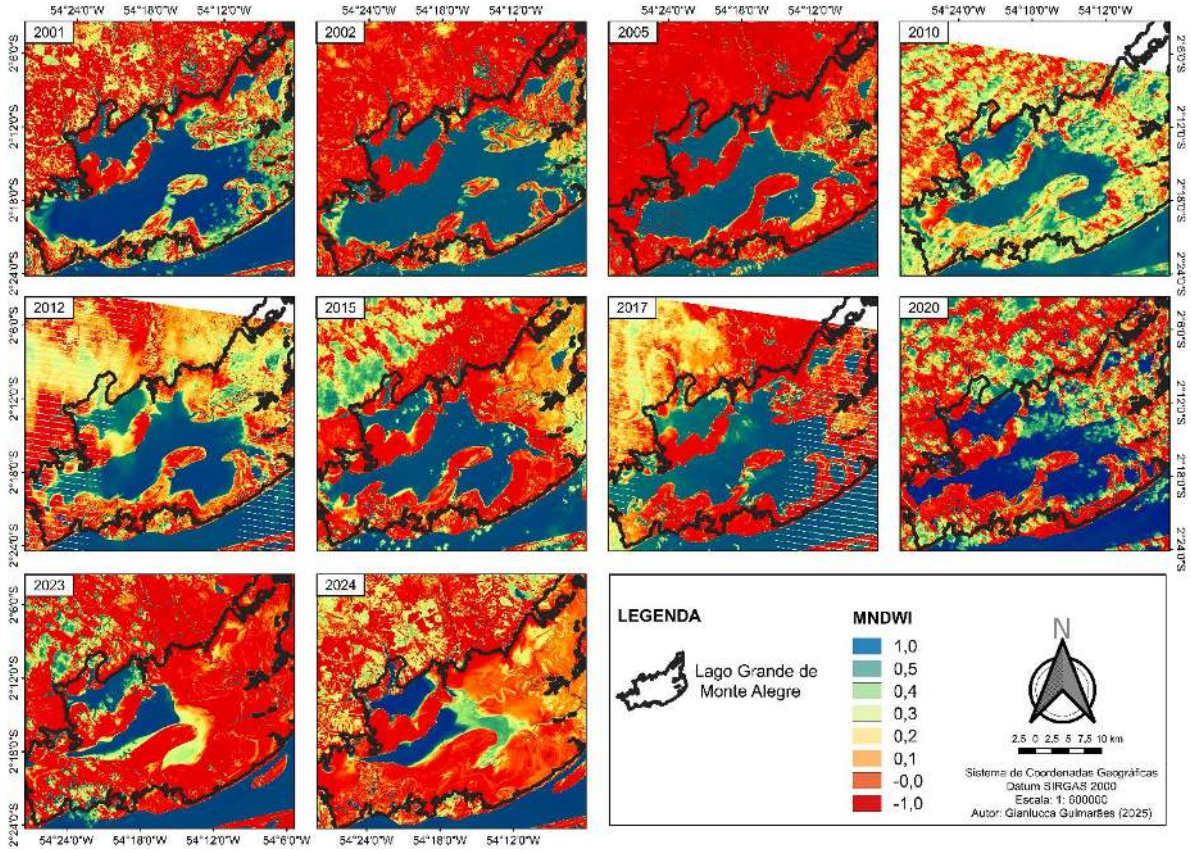
Ao analisar os resultados, pode-se observar que as menores áreas hídricas foram registradas nos anos de El Nino (2023 e 2024), com maior contribuição quando se tem a configuração de forte El-Niño (> 1,5) e anomalias positivas da TSM do Atlântico Norte. Esse comportamento, se assemelha aos encontrados por Ropelewski e Halpert (1987), o que pode

ser atribuído pela complexa interação entre os padrões atmosféricos e oceânicos influenciando na disponibilidade hídrica na região.

Além disso, esses resultados destacam a importância do monitoramento contínuo das anomalias de TSM e sua relação com os eventos climáticos globais, permitindo uma melhor compreensão das implicações dessas variações para a Amazônia. Conforme Marengo e Nobre (2009), a utilização de modelos climáticos avançados e o aprimoramento da previsão climática são fundamentais para mitigar os impactos adversos dessas mudanças e auxiliar na formulação de políticas públicas de adaptação e gestão ambiental.

A Figura 5, ilustra os resultados com os valores da área hídrica mapeada pelo índice espectral MNDWI. Durante o período de estudo, a área hídrica do LGMA apresentou variações. Notavelmente, as menores áreas cobertas por corpos d'água, nos períodos de estação seca, foram nos anos de 2023 e 2024, onde os valores variam de 53,52 a 47,41 km², respectivamente.

Figura 5 – Variação temporal da área hídrica do LGMA entre os anos 2001 a 2024 mensurado a partir do MNDWI, indicando que há presença de água quando o valor é superior a 0, enquanto a ausência de água na superfície ocorre quando é inferior a 0.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Observou-se também que, conforme McFeeters (1996), o índice NDWI varia de -1 a 1, sendo o valor zero como o limiar para presença de água, também confirmado nos resultados apontados por Brubascher e Guasselli (2013), que mostraram que há presença de água quando o valor de NDWI é superior a 0, e ausência de água na superfície ocorre quando o NDWI é inferior a 0.

Situado na margem esquerda do rio Amazonas, no noroeste do Pará, o LGMA apresenta um regime geomorfológico uniforme quando comparado às áreas em que a ação erosiva e deposicional é mais evidente. Dessa forma, as flutuações do corpo d'água podem ser atribuídas, predominantemente, às oscilações climáticas — como as extensas secas decorrentes de episódios de El Niño — e não a transformações abruptas do terreno. O uso de imagens de satélite (Landsat 5, 7 e 8) aliado ao índice MNDWI reforça como a consistência do substrato potencializa a monitorização das variações hídricas, evidenciando a importância dessa característica para o manejo sustentável das regiões amazônicas.

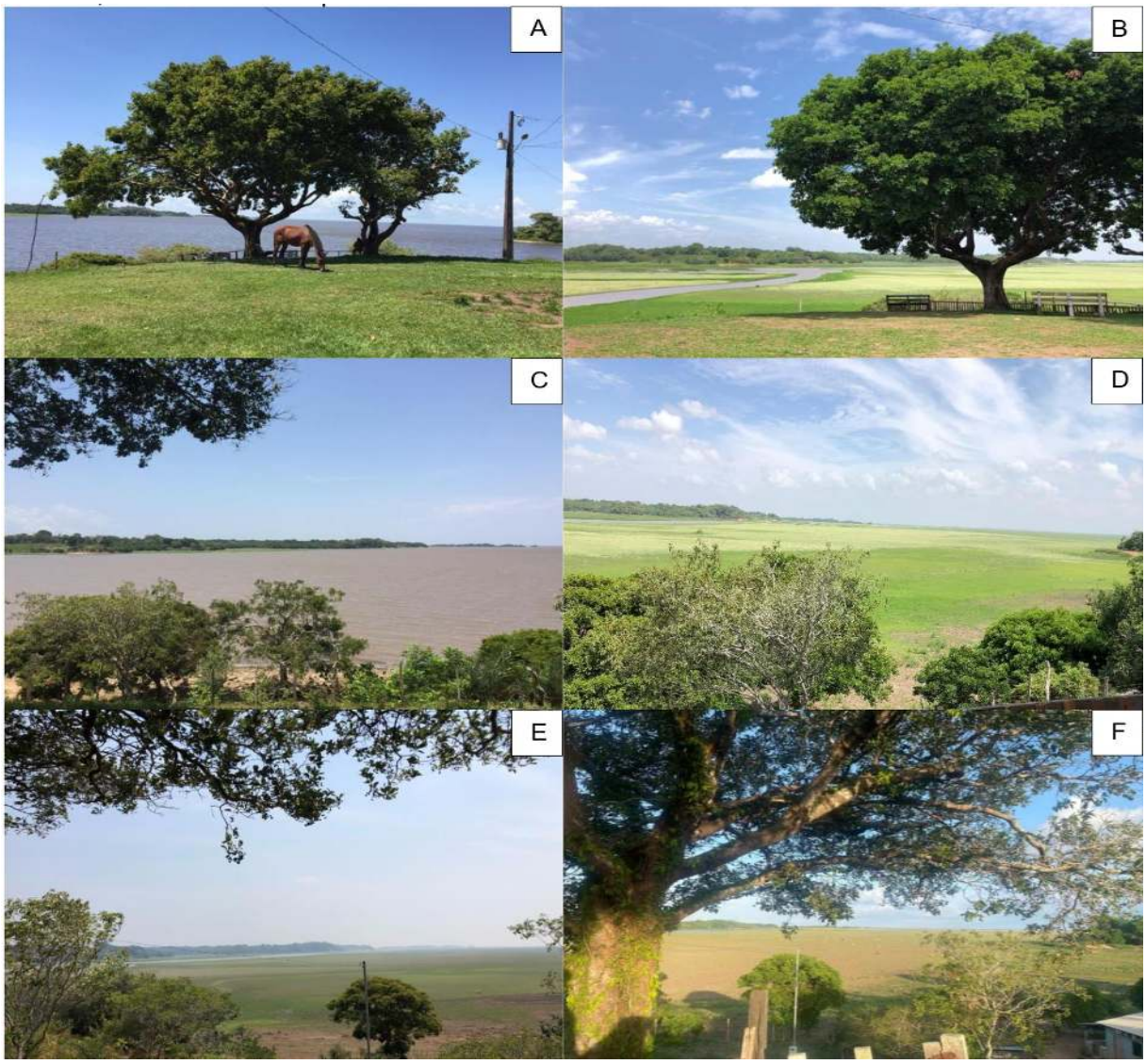
Nesta conjuntura, os resultados apresentados corroboram com os estudos de Scheibel *et al.* (2024), os quais enfatizam que o MNDWI permite um melhor delineamento de corpos d'água abertos e áreas mais úmidas. Isso se deve à maior sensibilidade do MNDWI a variações na resposta espectral da água e sua maior capacidade de suprimir a influência de outros alvos como vegetação e solo exposto.

Não obstante, Yang *et al.* (2020), reforçam que a utilização de outras metodologias pode apresentar inconsistências na detecção de corpos d'água em regiões áridas e semiáridas durante períodos prolongados de seca como as observadas durante eventos intensos de El Niño.

Sob a perspectiva da geologia regional (Santos *et al.,* 2023), as investigações realizadas no entorno do Lago Grande de Monte Alegre (LGMA) demonstram que sua inserção em uma planície de inundação estável permite uma observação direta dos impactos dos eventos climáticos extremos sobre a extensão hídrica, eliminando a influência de mudanças morfológicas intensas. Esse cenário singular fornece subsídios essenciais para a criação de estratégias de manejo e conservação ambiental que integrem os efeitos das variações climáticas aos processos geológicos presentes na Amazônia.

A Figura 6, apresenta imagens do LGMA durante os períodos de estiagem e enchente nos anos de 2021, 2022, 2023, 2024 e 2025, permitindo uma comparação visual da variação da área hídrica ao longo dos anos. Na análise das imagens, observa-se uma redução progressiva da extensão do lago nos anos de El Niño (2023 e 2024), com áreas significativamente menores em comparação a 2021 e 2022. Essa diminuição na cobertura hídrica reflete os padrões climáticos extremos, caracterizados pela redução da precipitação e aumento das temperaturas, resultando em menor aporte hídrico para o lago.

Figura 6 – Registros de parte do LGMA durante os períodos de enchente e estiagem. As Figuras A, B, C e D representam os períodos de enchente e seca dos anos 2021 e 2022, respectivamente. As Figuras E e F representam o período de seca dos anos 2023 e 2024.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Cabe ainda ressaltar que, a comparação com as imagens de 2025 pode fornecer indícios sobre tendências futuras na dinâmica hídrica da região. Caso a redução da área hídrica persista, será essencial implementar estratégias de adaptação para minimizar os efeitos adversos sobre as comunidades ribeirinhas. Por fim, os resultados confirmam a influência do El Niño na redução da área hídrica, enquanto o aquecimento do Atlântico Norte esteve associado aos anos sem o fenômeno.

Em períodos de seca extrema, como observado nos anos de 2023 e 2024, a conectividade do LGMA é reduzida, afetando negativamente a fauna aquática e os ciclos biogeoquímicos do ecossistema. Ainda nesse contexto, a variação do nível do lago também afeta a mobilidade da população ribeirinha, isolando algumas comunidades dificultando o acesso a serviços essenciais, como transporte, educação e saúde, tornando a navegação nos períodos de estiagem desafiadora, comprometendo a qualidade de vida dos habitantes locais (Santos *et al.,* 2023).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou a variação da área hídrica do LGMA ao longo de diferentes períodos, com ênfase nos anos de El Niño entre 2001 e 2024. Os resultados evidenciaram reduções significativas na extensão do lago em anos de maior intensidade do fenômeno El-Niño combinado com anomalias positivas do ATN, o que leva a um impacto direto na disponibilidade hídrica da região. A análise de correlação parcial demonstrou que a área do lago é mais fortemente modulada pelo ATN do que pelo NINO3.4, sugerindo que a variabilidade climática do Atlântico Tropical Norte exerce um papel mais determinante na dinâmica hídrica do sistema lacustre.

A aplicação do índice MNDWI confirmou-se como uma ferramenta eficaz para detectar variações hídricas ao longo do tempo, permitindo identificar padrões de redução da área do lago com alta precisão. Esses resultados ressaltam a importância do sensoriamento remoto como uma abordagem eficiente para o monitoramento contínuo dos sistemas aquáticos amazônicos, possibilitando análises detalhadas sobre os impactos ambientais decorrentes da variabilidade climática.

Além das mudanças hidrológicas, os resultados destacam a relevância socioeconômica do LGMA para as comunidades ribeirinhas, que dependem diretamente de seus recursos para subsistência, alimentação e transporte. A redução da área hídrica, especialmente em períodos prolongados de estiagem, compromete não apenas a biodiversidade aquática, mas também afeta atividades como a pesca e dificulta a mobilidade da população local. Assim, compreender os impactos do El Niño sobre esse ecossistema é fundamental para subsidiar estratégias de mitigação e adaptação aos efeitos das mudanças climáticas.

Apesar dos resultados obtidos, algumas limitações foram observadas. A cobertura de nuvens em algumas imagens dificultou a análise de determinados períodos, exigindo a seleção criteriosa de dados com menor interferência atmosférica. Além disso, a disponibilidade de referências científicas específicas sobre o LGMA ainda é limitada, evidenciando a necessidade de mais estudos voltados para a compreensão da dinâmica hídrica desse ecossistema.

Esses achados reforçam a necessidade de investigações adicionais para compreender os mecanismos pelos quais essas oscilações oceânicas influenciam os corpos d'água da Amazônia. Conduzindo a pesquisas futuras que ampliem o conhecimento sobre a dinâmica das planícies de inundação e suas interações com variáveis climáticas globais. Além disso, pesquisas que sejam embasadas na aplicação conjunta da análise granulométrica e da proveniência mineral. A primeira técnica, ao quantificar e classificar os sedimentos, possibilitará a avaliação detalhada das dinâmicas deposicionais, enquanto a segunda revelará a origem e os processos de formação dos materiais sedimentares. Essa abordagem integrada ampliará o entendimento dos mecanismos que influenciam a variação hídrica e oferece uma base robusta para novas investigações e para o aprimoramento das estratégias de conservação ambiental na região. Tais contribuições podem auxiliar na conservação e o manejo sustentável desses ecossistemas são essenciais para garantir a resiliência das comunidades ribeirinhas e a preservação dos serviços ecossistêmicos prestados por esses ambientes naturais.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Ciências e Tecnologia das Águas - ICTA e à Pró-reitora de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação Tecnológica - PROPPIT da Universidade Federal do Oeste do Pará.

REFERÊNCIAS

BARROS, D. F.; ALBERNAZ, A. L. M. **Possible impacts of climate change on wetlands and its biota in the Brazilian Amazon.** Brazilian Journal of Biology, v. 74, n. 4, p. 810-820, 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano de manejo do Parque Estadual de Monte Alegre**. Belém, 2009.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Divisão Regional do Brasil em Regiões Geográficas Imediatas e Regiões Geográficas Intermediárias: 2017**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100600.pdf. Acesso em: 07 Out. 2025.

BRUBASCHER, J. P.; GUASSELLI, L. A. **Mapeamento da área inundável da planície do rio dos Sinos a partir do índice NDWI, São Leopoldo-RS**. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais. Foz do Iguaçu: INPE, p. 4540-4547, 2013.

CERDEIRA, R. G. P.; RUFFINO, M. L.; ISAAC, V. J. **Fish catches among riverside communities around Lago Grande de Monte Alegre, Lower Amazon, Brazil**. Fisheries Management and Ecology, v. 7, n. 4, p. 355-374, 2000. DOI: 10.1046/j.1365-2400.2000.007004355.

COSTA, M. P. de F.; NOVO, E. M. L. de M.; AHERN, F.; MITSUO II, F.; MANTOVANI, J. E.; BALLESTER, M. V.; PIETSCH, R. W. **The Amazon Floodplain through Radar Eyes: Lago Grande de Monte Alegre Case Study**. Canadian Journal of Remote Sensing: Journal canadien de télédétection, v. 24, n. 4, p. 339-349, 1998. DOI: 10.1080/07038992.1998.1087469.

DELLA, A. P.; FERREIRA, I.; MACIEL, S.; PIETROBOM, M. R**. Licófitas e samambaias do Parque Estadual Monte Alegre (PEMA), Pará, Brasil**. Hoehnea, v. 46, e732018, 2019. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/2236-8906-73/2018.

de MENDIBURU, F. **agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research**. R package version 1.3-7, 2023. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=agricolae

GRIMM, A. M.; TEDESCHI, R. G. **ENSO and extreme rainfall events in South America**. Journal of Climate, v. 22, n. 7, p. 1589-1609, 2009.DOI: https://doi.org/10.1175/2008JCLI2429.1

GRIMM, A. M.; AMBRIZZI, T. **Teleconnections into South America from the Tropics and Extratropics on Interannual and Intraseasonal Timescales**. In: Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions. Dordrecht: Springer, 2009. p. 159-191. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-2672-9_7

KIM, S. **ppcor: An R Package for a Fast Calculation to Semi-partial and Partial Correlations**. Communications for Statistical Applications and Methods, 22(6), 665–674, 2015.

MARENGO, J. A. **Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget**. Climate Dynamics, v. 24, p. 11-22, 2005. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-004-0461-6

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. **Clima da Região Amazônica**. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Ed.). Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, Cap. 13, p. 197-212, 2009.

MARENGO, J.A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L.M.; SOARES, W.R.; RODRIGUEZ, D.A. **The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region**. Geophysical Research Letters, v. 38, L12703, 2011.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. **Review extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts**. International Journal of Climatology, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016. DOI: 10.1002/joc.4420.

MCFEETERS, S. K. **The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features**. International Journal of Remote Sensing, v.17, n.7, p.1425-1432, 1996.

MERTES, L. A. K .; DANIEL, D.L.; MELACK, J.M .; NELSON , B.; MARTINELLI, A., FORSBE RG, B. R. **Spatial Patterns of Hydrology, Geomorphology, and Vegetation on the Floodplain of the Amazon River in Brazil from a Remote Sensing Perspective**. Geomorphology. 13: 2 15-232. 1995.

NOAA. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **NOAA Physical Sciences Laboratory – Niño 3.4 Index**. Disponível em: https://psl.noaa.gov/data/correlation/nina34.data. Acesso em: 16 Nov. 2024.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 24 fev. 2025.

REVELLE, W. **psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research**. Northwestern University, Evanston, Illinois, 2024.

ROPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. **Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation**. Monthly Weather Review, v. 115, n. 8, p. 1606-1626, 1987. DOI: 10.1175/15200493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2.

SANTOS, P. R. B.; SILVA, R. F.; CASTRO, T. F. S.; REIS, B. P.; SANTOS, L. O.; SILVA, S. R. **Avaliação espaço-temporal dos efeitos de secas utilizando sensoriamento remoto sobre as águas do Lago Paytuna no complexo flúvio-lacustre de Monte Alegre, Pará, Brasil: é possível cultivar peixes neste ambiente amazônico?** Journal of Agricultural Sciences Research, v. 3, n. 10, 2023. DOI: 10.22533/at.ed.9733102313076.

SCHEIBEL, C. H.; NASCIMENTO, A. B. D.; JÚNIOR, G. D. N. A.; ALMEIDA, A. C. D. S.; SILVA, T. G. F. D.; SILVA, J. L. P. D.; JUNIOR, F. B. D. S.; FARIAS, J. A. D.; SANTOS, J. P. A. D. S.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. D. et al. **Characterization of water bodies through hydro-physical indices and anthropogenic effects in the eastern northeast of Brazil**. Climate, v. 12, n. 9, p. 150, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/cli12090150.

TOMASELLA, J.; BORMA, L. S.; MARENGO, J. A.; RODRIGUEZ, D. A.; CUARTAS, L. A.; NOBRE, C. A.; PRADO, M. C. R. **The droughts of 1996–1997 and 2004–2005 in Amazonia; hydrological response in the river main-stem**. Hydrological Processes, 15. 2010.

TOMASELLA, J.; PINHO, P. F.; BORMA, L. S.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; BITTENCOURT, O. R. F. O.; PRADO, M. C. R.; RODRIGUEZ, D. A.; CUARTAS, L. A. **The droughts of 1997 and 2005 in Amazonia: floodplain hydrology and its potential ecological and human impacts**. Climatic Change, 116: 723–746. 2013.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ. Banco de dados meteorológicos – Curso de Ciências Atmosféricas. Disponível em: https://meteorologia.unifei.edu.br/teleconexoes/indice.php?id=tna. Acesso em: 16 nov. 2024.

USGS. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. ***Earth Explorer***. Disponível em: https://earthexplorer.usgs.gov/ . Acesso em: 16 Nov. 2024.

XU, H. **Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery**. International Journal of Remote Sensing, v. 27, n. 14, pp. 3025-303, 2006. DOI: https://doi.org/10.1080/01431160600589179

YANG, X.; QIN, Q.; YÉSOU, H.; LEDAUPHIN, T.; KOEHL, M.; GRUSSENMEYER, P.; ZHU, Z. **Monthly estimation of the surface water extent in France at a 10-m resolution using Sentinel-2 data**. Remote Sensing of Environment, v. 244, p. 111803, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111803 .

YOON, JH.; ZENG, N. **An Atlantic influence on Amazon rainfall**. Clim Dyn 34, 249–264, 2010. https://doi.org/10.1007/s00382-009-0551-6