

Áreas de sensibilidade bioclimática da várzea da foz do rio Guamá/Amazônia Oriental

Ana Caroline Correa dos Santos¹, Aline Maria Meiguins de Lima^{2*}, Maria Luiza Nascimento Dias³

¹Graduação em Meteorologia, Universidade Federal do Pará, Brasil.

²Doutora em Desenvolvimento Socioambiental - Núcleo de Estudos Amazônicos - Universidade Federal do Pará, Brasil. (*Autor correspondente: ameiguins@ufpa.br).

³Mestre em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Pará, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 13/08/2025 – Revisado em: 23/09/2025 – Aceito em: 28/09/2025

RESUMO

O estudo avalia a sensibilidade bioclimática da várzea na foz do rio Guamá, no estado do Pará, frente às variações hidroclimáticas e às pressões antrópicas locais. O objetivo foi avaliar o grau de sensibilidade bioclimática na foz do rio Guamá. A metodologia envolveu análises de séries temporais (2003–2023) de precipitação, temperatura e evapotranspiração, combinadas com balanço hídrico decadal e mapeamento de uso e cobertura da terra. Os resultados indicaram alta variabilidade interanual de precipitação, déficits hídricos sazonais críticos e áreas urbanas em expansão dentro e no entorno das Áreas de Proteção Ambiental (APA Belém e APA Ilha do Combu), intensificando a perda de cobertura vegetal e a pressão sobre os recursos hídricos. A análise espacial mostrou correlação entre baixa evapotranspiração e áreas urbanizadas, refletindo a perda de funcionalidade ecológica. Conclui-se que o planejamento territorial deve incorporar soluções baseadas na natureza e gestão participativa, priorizando medidas de adaptação climática e preservação ecológica das zonas úmidas urbanas da região.

Palavras-Chaves: Balanço hídrico, APA Belém, Variabilidade climática.

Bioclimatic sensitivity areas of the Guamá River floodplain in the Eastern Amazon

ABSTRACT

This investigation evaluates the bioclimatic vulnerability of the floodplain at the confluence of the Guamá River, in the state of Pará, to hydroclimatic changes and local human-induced pressures. The aim was to evaluate the level of bioclimatic sensitivity in this area. Time-series analyses (2003–2023) of precipitation, temperature and evapotranspiration were combined with decadal water balance and land use/land cover mapping. The results revealed significant interannual variability in precipitation, critical seasonal water deficits and the expansion of urban areas within and around the Environmental Protection Areas (EPAs Belém and Ilha do Combu), which has intensified the loss of vegetation cover and put pressure on water resources. Spatial analysis revealed a correlation between low evapotranspiration and urbanized areas, reflecting a loss of ecological functionality. It is concluded that territorial planning must incorporate nature-based solutions and participatory management, prioritizing climate adaptation measures and the ecological preservation of the region's urban wetlands.

Keywords: Water balance, EPA Belém, Climate variability.

Áreas de sensibilidad bioclimática de la planicie inundable en la desembocadura del río Guamá/Amazonia Oriental

RESUMEN

En este estudio se evaluó la sensibilidad bioclimática de la llanura aluvial de la desembocadura del río Guamá, en el estado de Pará, ante las variaciones hidroclimáticas y las presiones antropogénicas locales. El objetivo fue evaluar el grado de sensibilidad bioclimática de esta zona. Para ello, se analizaron series temporales (2003-2023) de precipitación, temperatura y evapotranspiración, combinadas con el balance hídrico decenal y el mapeo del uso y la cobertura del suelo. Los resultados indicaron una elevada variabilidad interanual en la precipitación, déficits hídricos estacionales críticos y una expansión de las áreas urbanas dentro y en los alrededores de las Áreas

Santos, A. C. C. dos, Lima, A. M. M. de, & Dias, M. L. N. (2025). Áreas de sensibilidade bioclimática da várzea da foz do rio Guamá/Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.13, n.3, p.111-130.



de Protección Ambiental (APA Belém y APA Isla do Combu), lo que ha intensificado la pérdida de cobertura vegetal y la presión sobre los recursos hídricos. El análisis espacial mostró una correlación entre la baja evapotranspiración y las zonas urbanizadas, lo que refleja la pérdida de funcionalidad ecológica. En conclusión, la planificación territorial debe incorporar soluciones basadas en la naturaleza y una gestión participativa que priorice las medidas de adaptación climática y la preservación ecológica de los humedales urbanos de la región.

Palabras clave: Balance hídrico, APA Belém, Variabilidad climática.

1. Introdução

A compreensão da interação entre o ambiente urbano e natural tem evoluído nos últimos anos, com estudos destacando a importância de se considerar a complexidade dos ecossistemas urbanos. Inicialmente, a abordagem concentrou-se na compreensão das alterações nas paisagens naturais causadas pelo crescimento urbano, como observado em várias cidades localizadas às margens dos rios amazônicos (Souza et al., 2010). Posteriormente, na importância de considerar variáveis climáticas e a composição atmosférica em áreas urbanas, criando condições climáticas únicas (Lopes et al., 2022), com a identificação de zonas bioclimáticas. Estas são reconhecidas como sistemas fundamentais para avaliar regiões com possíveis ocorrências de condições ambientais adversas (Silva et al., 2022). No entanto, a aplicação desse conceito em áreas urbanas ainda enfrenta desafios, como a falta de representatividade dos dados climatológicos em escalas locais (Amorim e Carlo, 2017).

Nesse contexto, propõe-se uma abordagem para a identificação de zonas bioclimáticas em áreas urbanas, considerando a interação entre ambiente urbano, ambiente natural (ecológico), ciclo atmosférico e ciclo hidrológico (Cardenas-Jiron e Morales-Salinas, 2019), onde busca-se superar as limitações atuais e fornecer uma ferramenta mais eficaz para a gestão sustentável das cidades. A resiliência urbana enfrenta desafios em decorrências das ameaças exigentes, tais como os efeitos da variabilidade das condições do clima, onde o desenho urbano cria um microclima único que afeta variáveis como a temperatura do ar e a velocidade do vento, enquanto que parques, praças, áreas verdes e costeiras desempenham um papel fundamental na qualidade de vida dos cidadãos (Chondrogianni e Stephanedes, 2022).

A presença de zonas de amortecimento envolvendo os ambientes urbanos, áreas verdes destinadas à preservação permanente, assim como o estabelecimento de corredores ecológicos, constituem importantes mecanismos para manutenção de padrões bioclimáticos incorporados a manutenção do fluxo de serviços ecossistêmicos e a conservação das espécies (Duan et al., 2024). Os fatores que afetam o conforto bioclimático são a temperatura do ar, a umidade atmosférica, a movimentação do ar, a radiação e a resistência à evaporação (efeito do sombreamento da vegetação), como elementos que podem influenciar citam-se o número de dias quentes e a poluição do ar (Cetin et al., 2018).

A manutenção de padrões de qualidade de vida nos ambientes urbanos com base nos condicionantes bioclimáticos é uma das premissas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11. Este visa tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, assim como promover a adoção e implementação de políticas e planos integrados para eficiência de recursos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas e resiliência a desastres, sendo necessário conceber soluções inovadoras e projetar modelos de planejamento das cidades que promovam estratégias que contribuam significativamente para o alcance desta meta.

Em termos de gestão do território o alcance das metas do ODS 11 representa um grande desafio, principalmente para os centros já conectados, como os que formam as Regiões Metropolitanas. Nestas, já existe uma relação entre os municípios formadores que somam diversos fatores e tornam o espaço urbano mais complexo, especialmente quando se trata da manutenção de padrões bioclimáticos vinculados presença de áreas verdes geridas para fornecer serviços ecossistêmicos, como os relacionados a melhoria da qualidade do ar, redução do *stress* térmico e contenção de cheias (Battisti, 2020).

A Região Metropolitana de Belém (RMB) passou nas últimas décadas por mudanças de cobertura da terra que acentuam as interferências antrópicas sobre os ecossistemas locais. A cobertura de vegetação de 1984 a 2020 foi a que mais sofreu redução, com uma transição de 66,9% em 1984, para 56,0% em 2020, totalizando 390,3 km² de perdas (Gutierrez et al., 2021). Em decorrência foram observadas relações diretas entre a temperatura do ar e as mudanças na cobertura da terra com correlações significativas ($p < 0,05$) para temperatura (efeito direto) em ambos os regimes sazonais (período chuvoso e menos chuvoso), estas foram negativas com as formas de cobertura de vegetação (-0,79, no período seco) e positivas nas áreas urbanizadas (0,86, no período seco) (Gutierrez et al., 2022).

A importância da influência das zonas bioclimáticas ao longo das áreas urbanas, como a RMB, pode ser traduzida no seu impacto na saúde humana. Efeitos combinados que simulam cenários de desmatamento e de aquecimento global para a América do Sul estimulam a ocorrência de níveis extremos de risco de estresse térmico com um aumento de até 11,5 °C no cenário pessimista apontado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, RCP8.5) (Oliveira et al., 2021).

As características intrínsecas do clima amazônico com acentuada sazonalidade, refletem uma frequência mensal de desastres (hidrológicos e climatológicos), de consequências diretas nas dimensões humana e econômica; destacando as maiores frequências do grupo hidrológico (inundações, enchentes, chuvas fortes) entre fevereiro e maio, e do grupo climatológico (secas e Incêndios florestais) de agosto a outubro (Souza et al., 2024). Desta forma, a presença das zonas bioclimáticas se torna um “escudo natural” contra os efeitos diretos e indiretos da variabilidade das condições climáticas, considerando a expansão das cidades e sua vulnerabilidade à ocorrência de eventos extremos.

A foz do rio Guamá, localizada no nordeste do estado do Pará, é um ambiente de integração entre o rio Amazonas, o rio Tocantins e diversas vias que compõem o sistema modal fluvial-terrestre, utilizado para o transporte público e comercial. Consequentemente, as cidades se desenvolvem no entorno dos portos, provocando alterações no ambiente da várzea, com a retirada da cobertura vegetal e urbanização. Este estudo busca contribuir para o manejo sustentável dessa região, considerando a complexidade dos sistemas ecossistêmicos urbanos e a importância da preservação da qualidade ambiental. O objetivo principal foi avaliar o grau de sensibilidade bioclimática na foz do rio Guamá, visando proporcionar uma compreensão de como a variabilidade climática está afetando os ambientes bióticos e antrópicos.

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

A foz do rio Guamá destaca-se pela importância como unidade da paisagem, conforme apresentado por Rocha et al. (2021). Esta abrange parte da Região Metropolitana de Belém (RMB), incluindo a capital do estado (Belém - Pará), com relevância ambiental pela manutenção das áreas florestais marginais ao rio Guamá e que compõe o Delta Estuário do rio Amazonas (DEA) (Rocha et al., 2021). Além da área insular, fazem parte um mosaico de Unidades de Conservação (UCs) que são também responsáveis pela manutenção dos mananciais de abastecimento de água da RMB (Figura 1, Tabela 1).

Tabela 1 - Características que definem as UCs na área de influência da foz do Rio Guamá.
Table 1 - Characteristics that define the UCs in the area of influence of the mouth of the Guamá River.

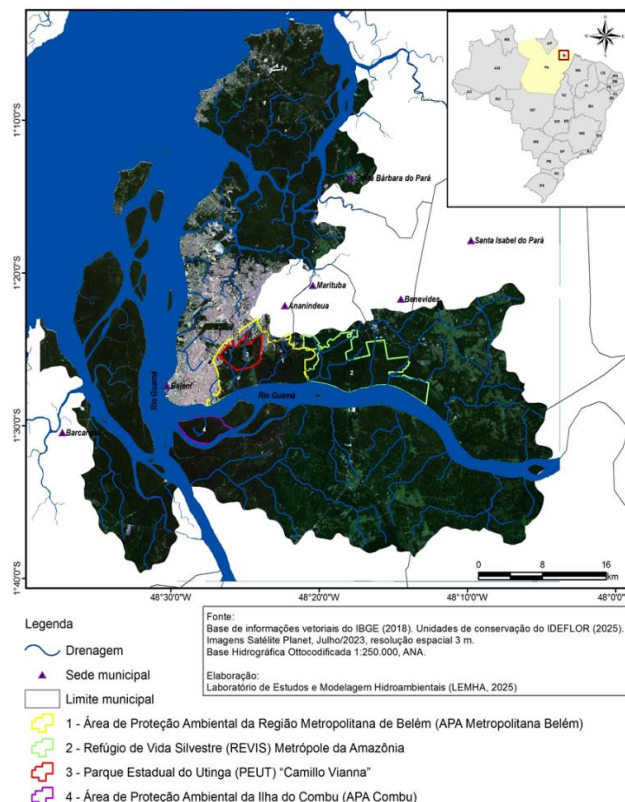
Unidade	Descrição
Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém (APA Belém)	Definida pelo Decreto nº 1.329, de 03/10/2008, com 7.457,50 ha (74,57 km ²), formada pelos municípios de Belém (59,49%) e Ananindeua (40,51%), tendo sido inicialmente denominada de Área de Proteção Ambiental dos Mananciais de Abastecimento de Água de Belém - APA Belém (Decreto Estadual nº 1.551, de 03/05/1993), pelo objetivo de garantir a potabilidade de água dos mananciais através da restauração e manutenção da

Unidade	Descrição
	qualidade ambiental dos lagos Água Preta e Bolonha, do rio Aura e respectivas bacias hidrográficas.
Parque Estadual do Utinga “Camillo Vianna”	Anterior “Parque Ambiental do Utinga” (Decreto Estadual nº 1.552/1993, Decreto Estadual nº 1.330/2008, Lei Estadual nº 8.958/2019) abrange Belém (99%) e Ananindeua (1%), com 1.393,088 hectares (13,93 Km ²), contendo uma biodiversidade extensa com florestas de terra firme, floresta secundária e igapó ao redor da área dos lagos.
Área de Proteção Ambiental da Ilha do Combu	Definida pela Lei Estadual nº 6.083 de 13/11/1997, sendo a quarta maior ilha do município de Belém com 15,972 Km ² , margeada pelo rio Guamá ao norte, Furo São Benedito ao sul, Furo da Paciência a leste e Baía do Guajará ao oeste.
Refúgio de Vida Silvestre (REVIS) Metrópole da Amazônia	Decreto nº. 2.211 de 30/03/2010), com área de 6.367.27 hectares (63,67 km ²), abrangendo 6,3% da área total de quatro municípios: Ananindeua, Benevides, Marituba e Santa Isabel do Pará. O REVIS tem por objetivo a proteção de ecossistemas aquáticos (6,5%) que contemplam o rio Guamá, pequenos furos e igarapés; ecossistemas de terra firme (25,7%) representados por capoeiras, pastagens abandonadas, assim com as plantações de seringueira e urucum; e ecossistemas de várzea (67,8%), associados a florestas preservadas.

Fonte: Adaptado de IDEFLOR-Bio (2025).

Source: Adapted from IDEFLOR-Bio (2025).

Figura 1 - Localização da foz do rio Guamá e das unidades de conservação da natureza implantadas na região.
Figure 1 - The location of the mouth of the Guamá River and the nature conservation units established in the region.

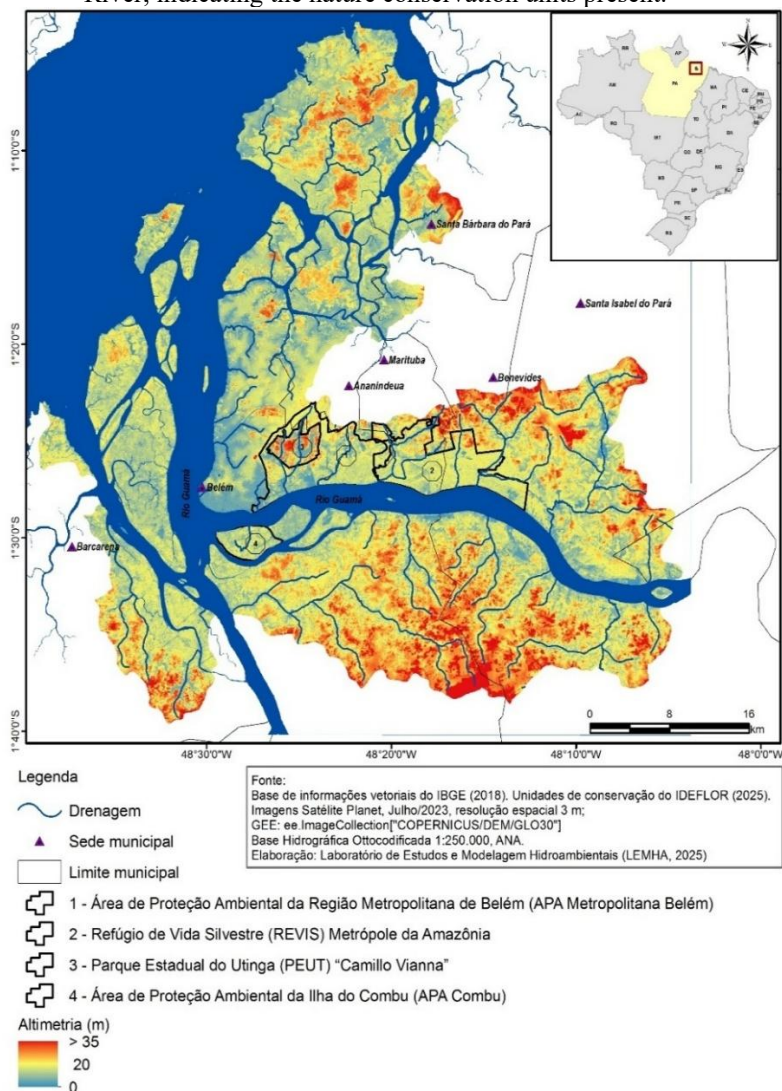


Fonte: Autores (2025).

Source: Authors (2025).

Figura 2 - Modelo digital de elevação e localização da área de abrangência de várzea da foz do rio Guamá, com indicação das unidades de conservação da natureza presentes.

Figure 2 - Digital elevation model and location of the floodplain coverage area of the estuary of the Guamá River, indicating the nature conservation units present.



Fonte: Autores (2025).
 Source: Authors (2025).

A região é marcada pelas baixas topografias (Figura 2) que configuram a planície de inundação natural do rio Guamá, caracterizada por um sistema mesotidal (semidiurno) com altura variante de 3,6 m a 0,1 m (Lima et al., 2023).

A vegetação natural seria a típica da Floresta Amazônica, porém ocorreu substituição por pasto e florestas secundárias em vários segmentos, afetando inclusive os manguezais; na margem leste (sentido montante-jusante) são observadas planícies de maré lamosas que corroboram com uma morfologia que evidencia o comportamento de “estuário dominado por maré” e de “rios com maré”, ambos marcados pela duração superior do fluxo de vazante em relação ao fluxo de enchente, descarga crescente e intensa em direção a foz e baixa salinidade (Gregório e Mendes, 2009, p. 63-66).

2.2 Base de dados e processamento

A documentação cartográfica utilizada é composta pela carta de uso e cobertura da terra, onde são definidas as classes de (1) Áreas de cobertura vegetal incluindo florestas primárias e a vegetação ripária; (2) Áreas alteradas, incluindo as destinadas a agropecuária e demais usos da terra do setor produtivo; (3) Áreas de praias; (4) Áreas urbanizadas e de solo exposto; e (5) Corpos hídricos, incluindo canais e lagos. Para tanto, foram utilizadas Imagens Planet (3 m de resolução espacial, de julho de 2023), classificadas utilizando o classificador Random Forest (Amini et al., 2022). No processo de validação foi utilizado o produto MapBiomas Coleção 9 (MapBiomas, 2024). Os indicadores de acurácia e Kappa obtidos foram de 0,87 e 0,80 respectivamente, considerados satisfatórios em decorrência das diferenças quanto a classificação e sensores adotados.

As bacias hidrográficas delimitadas foram definidas a partir da base Hidrográfica Ottocodificada (1:250.000) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). De forma complementar, na avaliação das características físicas do terreno foi utilizado o Modelo digital de elevação do Copernicus DEM GLO-30 (Global 30m Digital Elevation Model) (ee.ImageCollection["COPERNICUS/DEM/GLO30"]), com cobertura global e resolução de 30 metros, fornecido pela European Space Agency (ESA) (2020).

As características climáticas foram obtidas a partir dos dados de precipitação pluviométrica do Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS), com resolução espacial de ~ 5,56 km (Funk et al., 2015) e Temperatura da superfície terrestre por meio da plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando o produto MOD11A1.061, com resolução espacial de 1 km (Wan et al., 2021), derivado do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (ee.ImageCollection("MODIS/061/MOD11A1")). E do produto de evapotranspiração potencial total do MODIS - MOD16A2GF, versão 6.1 (MOD16A2GF.061: Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day Global), com resolução de 500 metros, baseado na lógica da equação de Penman-Monteith, que inclui entradas de dados de reanálise meteorológica diária, para os anos de 2003, 2013 e 2023 (ee.ImageCollection("MODIS/061/MOD16A2GF")) (Wan et al., 2021).

Os dados de precipitação pluviométrica e temperatura da superfície terrestre foram analisados segundo uma série temporal de 21 anos, de 2003 a 2023, coincidente com o padrão atual de evolução da RMB. Os valores médios mensais da série foram extraídos, a partir do conjunto matricial (*raster*), e convertidos para o formato tabular. Com os dados processados e tabulados.

O método de avaliação do comportamento bioclimático adotado teve como base os conceitos apresentados em Amorim e Carlo (2017), sendo o balanço hídrico calculado pelo sistema HidroBio 3.0 (Plantilla de Balances Hidrico y Bioclimatico) de Artigas et al. (2014, 2024). Este consiste em uma abordagem hidrobioclimática que considera a interação entre clima, solo e vegetação, operacionalizando cálculos a partir de dados de entrada mensais de temperatura média e precipitação pluviométrica, e também permite o cálculo do escoamento superficial (R) e do Índice Global de Umidade de Thornthwaite (Im), que classifica o clima regional com base na relação entre precipitação e demanda hídrica anual. O processo computacional da planilha contempla: o cálculo da evapotranspiração potencial (ETP) corrigida pela latitude; estimativa da água disponível no solo e sua variação mensal; cálculo do escoamento superficial nos meses de excedente e a Determinação do índice de umidade global (Im), classificando o clima local conforme os parâmetros definidos por Thornthwaite-Mather.

A partir dos 21 anos de dados disponíveis, foram selecionados três anos específicos para uma análise comparativa do regime de precipitação, a saber: 2003, 2013 e 2023, que correspondem ao início, meio e fim da série de dados, respectivamente. Posteriormente, foram avaliados os valores de forma comparativa, envolvendo a precipitação e as perdas potenciais de umidade no solo (P-ETP) obtidas mediante o balanço hídrico. Essa abordagem permite compreender a resposta do meio físico às variações climáticas e estabelecer relações entre sazonalidade e comportamento vegetativo em diferentes formações de uso da terra. Na avaliação dos dados de balanço hídrico considerou-se necessário dividir a série de dados de 21 anos em duas décadas: a

primeira década de 2003 a 2012; enquanto a segunda década de 2013 a 2022.

3. Resultados e Discussão

3.1 Balanço Hídrico Decadal

A dinâmica hidroclimática decadal para a região da foz do rio Guamá é resumida na Tabela 2, para o período de 2003 a 2022, demonstrando o balanço hídrico ao longo do tempo, onde observou-se considerável variabilidade interanual na precipitação total (P) e na evapotranspiração potencial (ETP).

Tabela 2 – Variabilidade hidroclimática por década (2003-2012 e 2013-2022): precipitação, evapotranspiração potencial e balanço hídrico.

Table 2 – Hydroclimatic variability by decade (2003-2012 and 2013-2022): precipitation, potential evapotranspiration and water balance.

Décadas	Descrição
Primeira Década (2003-2012)	A precipitação total (P) apresentou variabilidade interanual, com mínima de 34,27 mm em 2004 e máxima de 431,25 mm em 2011. A evapotranspiração potencial (ETP) também apresentou variabilidade interanual, com mínimo de 201,98 mm em 2005 e máximo de 224,51 mm em 2012. O déficit hídrico (P-ETP) foi geralmente negativo, indicando que a região é limitada por água. O maior déficit hidrológico foi observado em 2009 (-761,44 mm), enquanto o menor foi registrado em 2011 (224,65 mm).
	A precipitação foi maior durante os meses de junho a agosto e menor durante os meses de dezembro a fevereiro. O déficit hídrico foi geralmente maior durante os meses de verão, indicando que a região experimenta estresse hídrico durante esse período. No período de 10 anos, o déficit hidrológico apresentou uma leve tendência decrescente, o que pode sugerir uma ligeira melhora no balanço hidrológico.
Segunda Década (2013-2022)	Na análise dos dados da segunda década, também foi observado uma forte variabilidade interanual na precipitação, com a mínima de 21,77 mm em 2015 e máxima de 553,04 mm em 2013. A evapotranspiração potencial (ETP) teve sua mínima de 200,75 mm em 2014 e a máxima de 223,58 mm em 2015. O balanço hídrico (P-ETP) indicou predominância de déficit hídrico durante grande parte do ano, com exceção dos meses mais chuvosos. O maior excedente hídrico foi registrado em fevereiro de 2013, com saldo positivo de 344,24 mm, enquanto o maior déficit hídrico ocorreu em outubro de 2015, com saldo negativo de -201,68 mm.
	Durante esses últimos 10 anos analisados, a precipitação foi mais elevada durante os meses de fevereiro a abril, correspondendo ao período de maior disponibilidade hídrica da região, enquanto os menores volumes ocorreram de agosto a outubro, coincidindo com a estação seca. O déficit hídrico foi mais pronunciado entre os meses de maio e outubro, evidenciando estresse hídrico na região durante a estação seca.

Fonte: Autores (2025).

Source: Authors (2025).

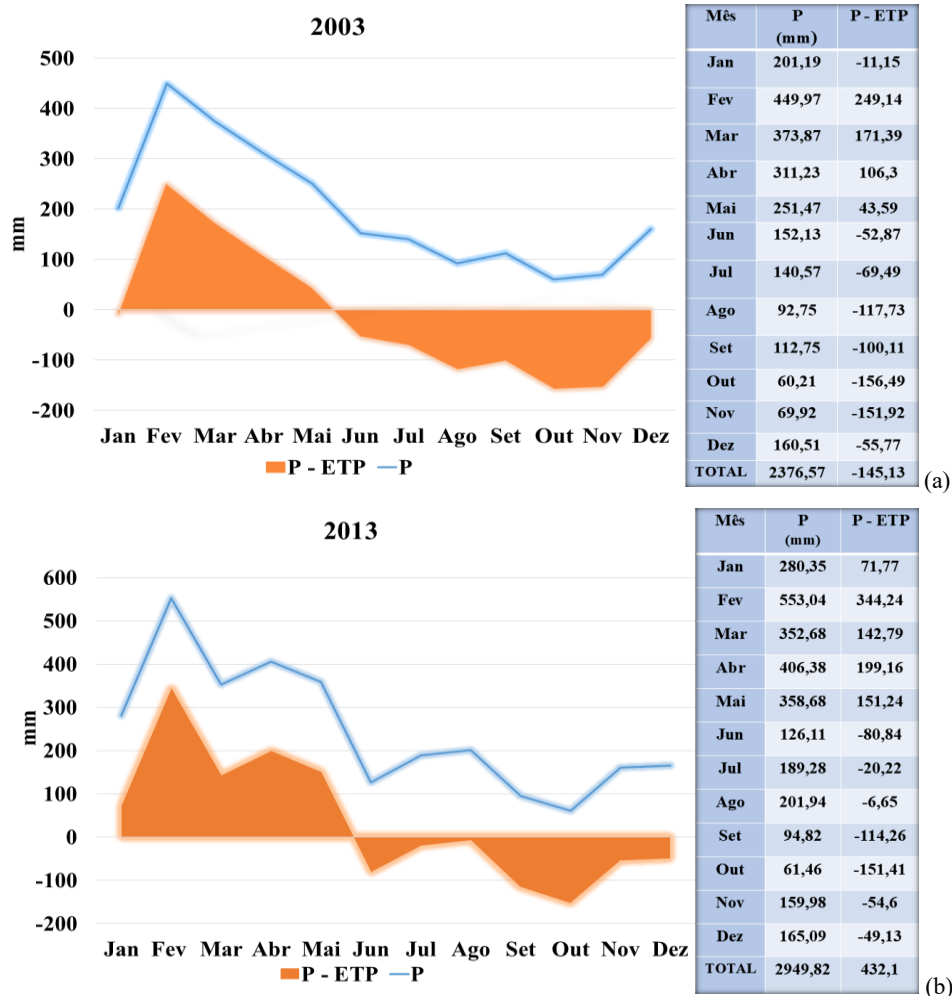
As décadas individualizadas indicam que o déficit hídrico na região da foz do rio Guamá ocorre apesar da elevada precipitação da região, os dados indicam que há períodos em que a evapotranspiração excede a precipitação, resultando em déficit hídrico recorrente; e a variabilidade interanual é alta, o que pode ser influenciado por fatores climáticos como El Niño e La Niña, bem como mudanças nos padrões de precipitação e evapotranspiração (Moraes et al., 2005; Lopes et al., 2013; Souza et al., 2016). Logo, a região da foz do rio Guamá está passando por uma transição em termos de déficit hídrico. No entanto, é essencial notar que a

variabilidade interanual é alta e a região ainda enfrenta desafios em termos de gestão de recursos hídricos, que deve considerar os extremos climáticos e a sazonalidade das chuvas para garantir a segurança hídrica regional. Além disso, é fundamental implementar estratégias de monitoramento e gestão para garantir a disponibilidade de água para a agricultura e o consumo humano.

3.2 Avaliação das condições bioclimáticas

No ano de 2003, observa-se que o mês com o maior índice de precipitação é fevereiro, com uma média de 449,97 mm, enquanto o mês com o menor índice de precipitação é outubro, com uma média de 60,21 mm (Figura 3a). Referente ao ano de 2013 (Figura 3b), nota-se que o regime de precipitação não apresentou uma mudança drástica em relação aos meses mais chuvosos e menos chuvosos, mantendo o padrão um pouco parecido com o observado na Figura 3, com fevereiro e outubro como os meses com maior e menor índice de precipitação, respectivamente. No entanto, é possível observar uma grande variação ao longo dos anos.

Figura 3 - Tendência de precipitação (P) e perdas potenciais de umidade no solo (P-ETP): (a) 2003; (b) 2013.
Figure 3 - Precipitation (P) and potential soil moisture loss (P-ETP) trends: (a) 2003; (b) 2013.

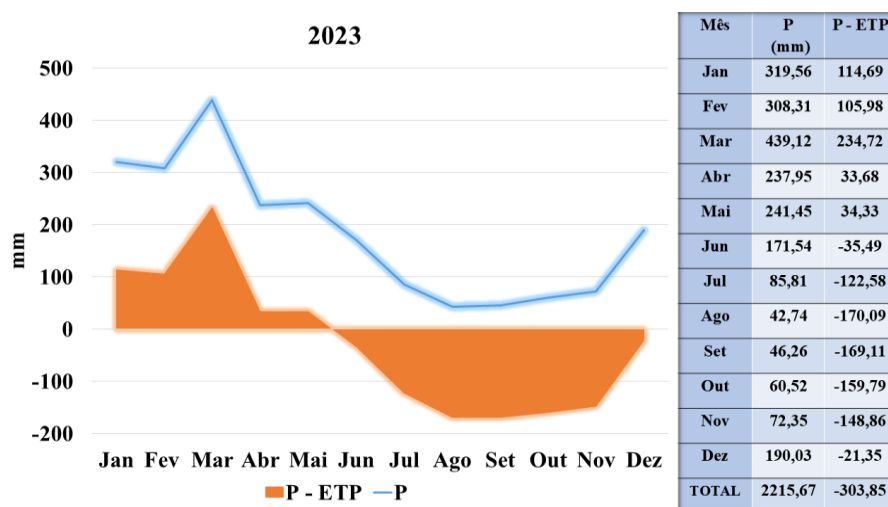


Fonte: Autores (2025).
Source: Authors (2025).

Observa-se que no ano de 2023 (Figura 4) o mês de março apresentou o maior índice de precipitação, com uma média de 439,12 mm, enquanto o mês de agosto apresentou o menor índice de precipitação, com uma média de 42,74 mm. Além disso, a análise integrada permite visualizar que as perdas potenciais de umidade no solo (P-ETP) acompanharam a sazonalidade da precipitação em todos os três anos estudados, refletindo os períodos de recarga e déficit hídrico.

Figura 4 - Tendência de precipitação (P) e perdas potenciais de umidade no solo (P-ETP): 2023.

Figure 4 - Precipitation (P) and potential soil moisture loss (P-ETP) trends: 2023.



Fonte: Autores (2025).

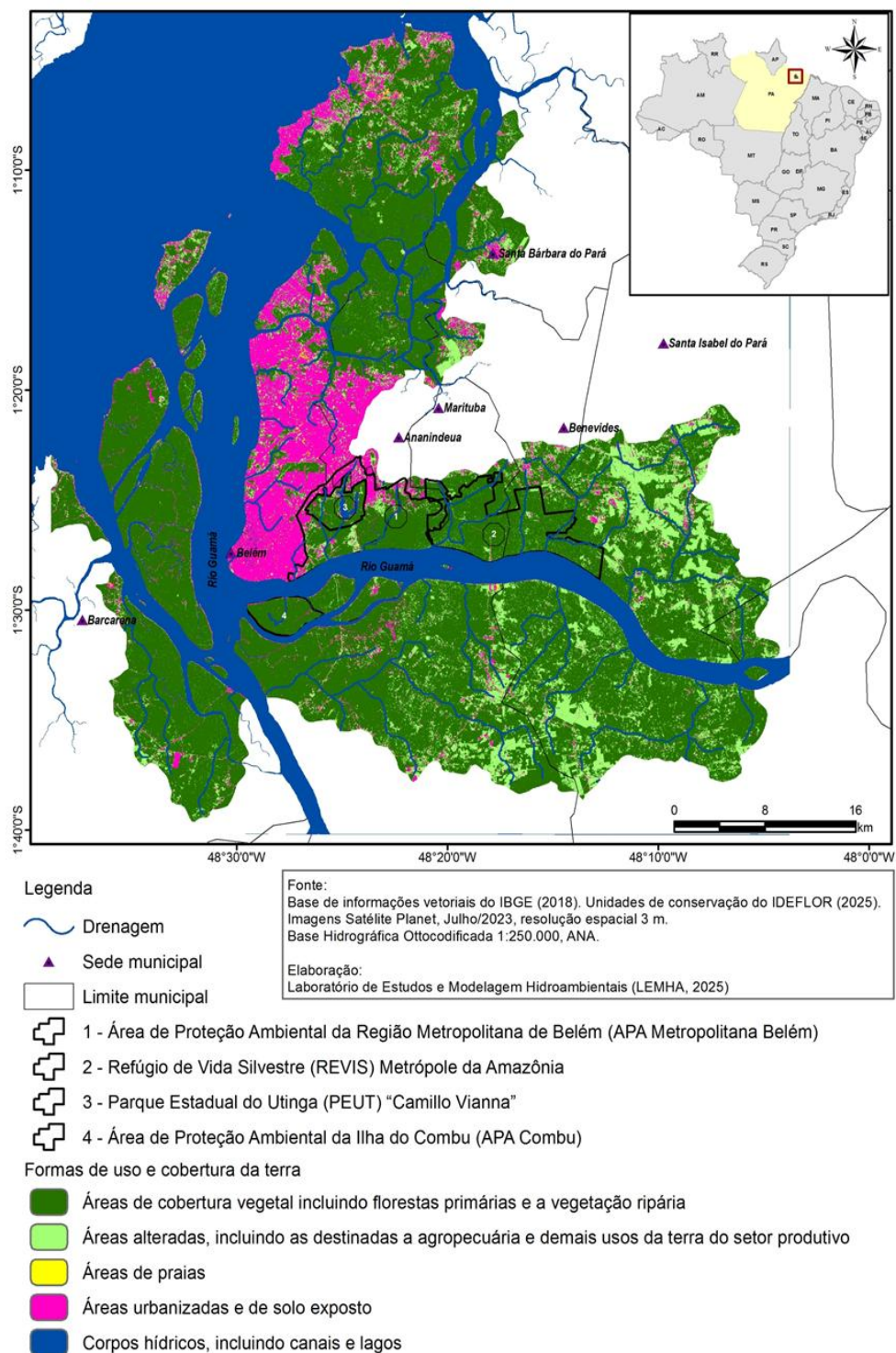
Source: Authors (2025).

Adotando o método de Thornthwaite e Mather, Embrapa (2005) obteve situação similar considerando apenas o município de Belém (PA) e dados de estação meteorológica para o ano de 2004, com os meses de excedente de fevereiro a abril e a manutenção de junho a novembro de uma situação limite ou de deficiência de água; para o ano de 2012 (Embrapa, 2021) outubro foi o mês também de maiores perdas; em 2023 (Embrapa, 2025) o resultado foi similar ao obtido na Figura 4, destacando as temperaturas máximas de setembro a outubro.

3.3 Caracterização da paisagem

Para fazer esta caracterização das áreas de sensibilidades na foz do rio Guamá, foram consideradas as Áreas de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém (APA Belém) com área territorial de 74,57 km², a APA Belém está situada no Bioma Amazônia e apresenta uma paisagem natural composta por Floresta Ombrófila Densa Aluvial de dossel uniforme e Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas (Ideflor-Bio, 2025). Além disso, inclui uma ampla área urbanizada que é delimitada pela zona florestal protegida e pelo Rio Guamá (Figura 5).

Figura 5 - Uso e cobertura da terra na região da foz do rio Guamá (julho de 2023).
 Figure 5 - The land's use and cover in the area around the mouth of the Guamá River (July 2023).



Fonte: Autores (2025).
Source: Authors (2025).

E a APA da Ilha do Combu, com área territorial de 15,972 km², e localiza-se a 1,5 km ao sul da cidade, sendo delimitada pelo rio Guamá ao norte, pelo furo São Benedito ao sul, pelo furo da Paciência a leste e pela Baía do Guajará a oeste. Estas duas UCs têm como objetivo conservar e revitalizar a biodiversidade, os recursos genéticos e as espécies em risco de extinção, além de fomentar o desenvolvimento sustentável. Isso é feito por meio da gestão eficiente dos recursos naturais e da promoção do bem-estar da comunidade local (Ideflor-Bio, 2025).

A análise de uso e cobertura da terra demonstra que a região apresenta três padrões predominantes: áreas urbanas, áreas de floresta e corpos hídricos da região. A classificação utilizada para o uso e cobertura da terra realizada para julho de 2023 quantificou as seguintes proporções para a região da foz do rio Guamá: (1) Áreas de cobertura vegetal incluindo florestas primárias e a vegetação ripária (1307,26 km²; 50,37%); (2) Áreas alteradas, incluindo as destinadas a agropecuária e demais usos da terra do setor produtivo (261,61 km²; 10,08%); (3) Áreas de praias (7,47 km²; 0,29%); (4) Áreas urbanizadas e de solo exposto (247,63 km²; 9,54%); e (5) Corpos hídricos, incluindo canais e lagos (771,35 km²; 29,72%).

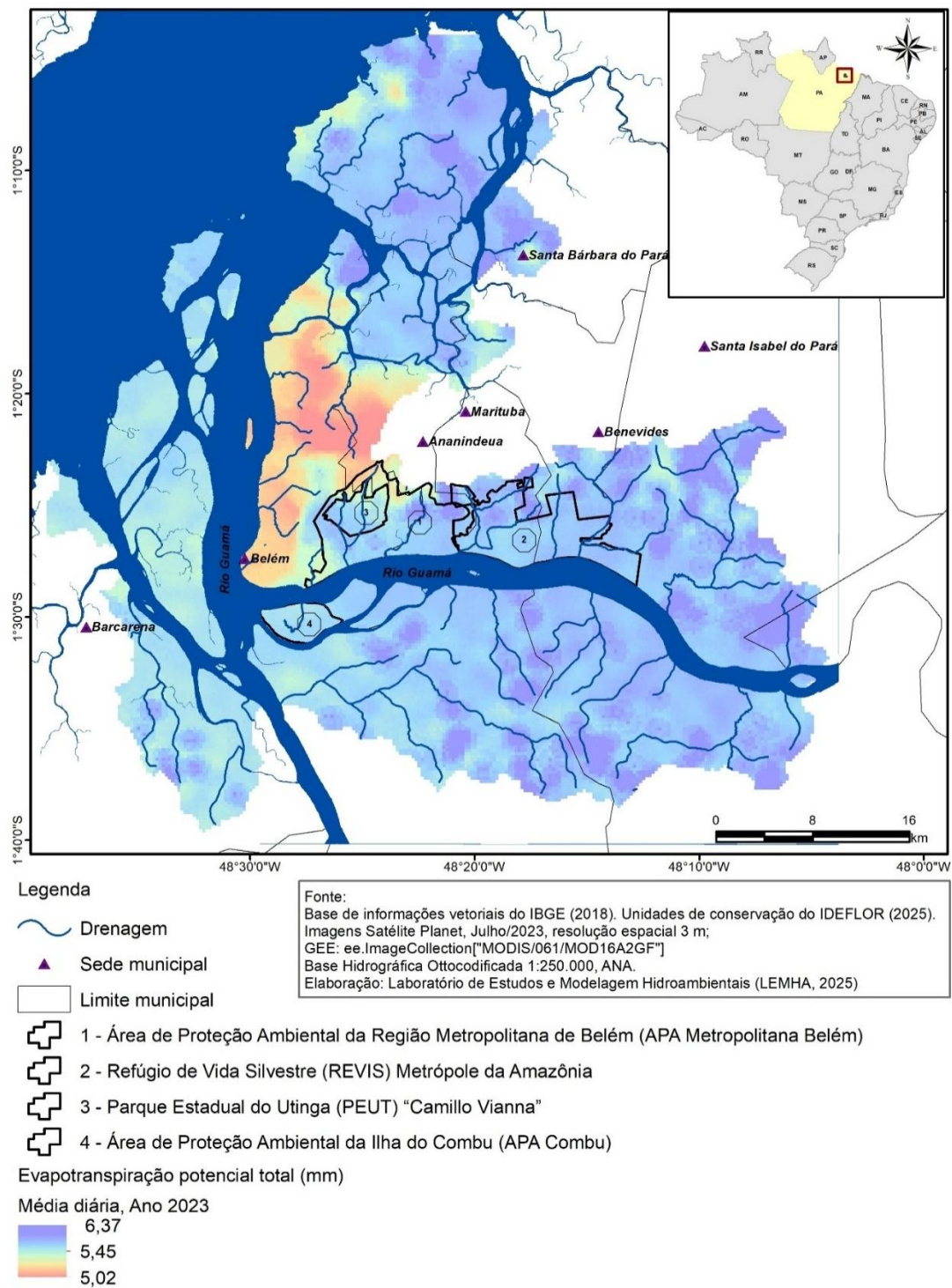
Considerando apenas a região interna que envolve a APA Belém, o PEUT e a REVIS (136,18 km²) observa-se na área a predominância de cobertura florestais, porém ainda assim, a presença de outras classes: (1) Áreas de cobertura vegetal incluindo florestas primárias e a vegetação ripária (105,97 km²; 77,81%); (2) Áreas alteradas, incluindo as destinadas a agropecuária e demais usos da terra do setor produtivo (11,95 km²; 8,77%); (3) Áreas de praias (0,48 km²; 0,35%); (4) Áreas urbanizadas e de solo exposto (14,73 km²; 10,82%); e (5) Corpos hídricos, incluindo canais e lagos (3,06 km²; 2,25%). Indicando que apesar do papel de conservação das UCs, a ocupação antrópica ainda ocorre de forma expressiva sobre as áreas protegidas, demandando estratégias de gestão integrada que contenham a degradação ambiental e garantam a sustentabilidade hídrica e ecológica da região estuarina.

Observa-se que uma parte considerável da população está concentrada próximo às UCs, especialmente na APA Belém, em que são identificadas várias áreas desprovidas de vegetação, resultado de fragmentação da vegetação nativa e da expansão de áreas antropizadas sem cobertura florestal. Esse cenário impacta não apenas sobre a vegetação remanescente que está sendo afetada, mas também os corpos hídricos, pela crescente pressão urbana nas APAs, resultando no aumento dos resíduos sólidos e efluentes descartados no rio Guamá, o que prejudica a qualidade dos corpos hídricos nestas áreas legais de proteção ambiental.

Conjuntamente a análise espacial da evapotranspiração média diária na região da foz do rio Guamá demonstra padrões variados que retratam as diferenças no uso e cobertura da terra, e a complexa relação entre urbanização e cobertura vegetal. Ressalta-se que, tanto no interior quanto no entorno da APA Belém e do PEUT, é possível identificar valores bem reduzidos de evapotranspiração (Figura 6) condizentes com áreas antropizadas que exercem pressão sobre essas UCs, inclusive pelos efeitos de borda. Apesar disso, as UCs destacadas exibiram em sua maior parte evapotranspiração média a alta, sugerindo que estes espaços mantêm funções ecológicas, como a regulação do ciclo hidrológico. Os valores obtidos são compatíveis com Viana et al. (2022) e Barata et al. (2024) que avaliaram a evapotranspiração de referência para a Região Metropolitana de Belém, observada a distribuição segundo a média diária.

Porém, em função das diferenças entre os métodos (Thornthwaite-Mather e Penman-Monteith) e escalas de análise, obteve-se uma distribuição maior em torno da média (mensal) para o produto MODIS/Penman-Monteith (média de 179,94 mm e desvio padrão de 35,3 em 2003; a média de 182,11 mm e desvio padrão de 38,07 em 2023), do que para o resultado da aplicação do HidroBio/Thornthwaite-Mather (média de 210,14 mm e desvio padrão de 6,01 em 2003; a média de 209,96 mm e 6,05 em 2023). Em ambas as situações os valores mantiveram-se na mesma faixa, com um R² (correlação linear) de 0,51 para o ano de 2003 e 0,62 para 2023 (Figura 7).

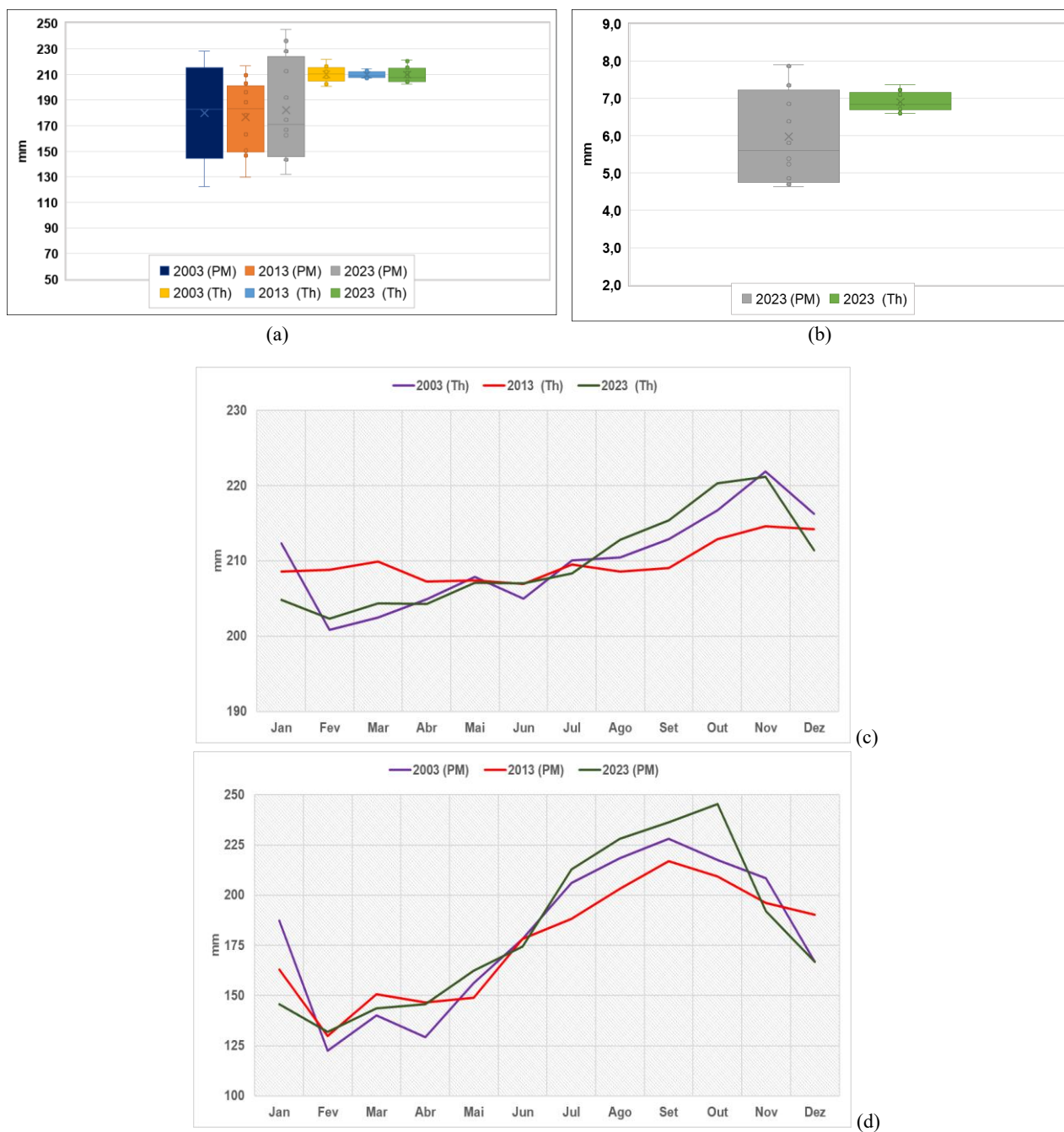
Figura 6 - Evapotranspiração média diária na região da foz do rio Guamá em 2023.
Figure 6 - The average daily evapotranspiration in the region around the mouth of the Guamá River in 2023.



Fonte: Autores (2025).
Source: Authors (2025).

Figura 7 - Evapotranspiração potencial total (a) Média mensal para 2003, 2013 e 2023; (b) Média diária para 2023, segundo (c) Thornthwaite-Mather (Th) e (d) Penman-Monteith (PM).

Figure 7 - Total potential evapotranspiration (a) Monthly average for 2003, 2013 and 2023; (b) Daily average for 2023, according to (c) Thornthwaite-Mather (Th) and (d) Penman-Monteith (PM).



Fonte: Autores (2025).
Source: Authors (2025).

Estimativas superiores de evapotranspiração obtidas pelo método Thornthwaite-Mather (Th) também foram verificadas em Kruse et al. (2010) em comparação ao Penman-Monteith (PM). Syperreck et al. (2008) apresentam um fator de correlação (linear), R^2 de 0,728, entre os dois métodos com dados obtidos de estação meteorológica. Ongaratto e Bortolin (2021) obtiveram correlações entre os valores de estimativa da evapotranspiração de referência observados e estimados pelos métodos avaliados na escala diária com R^2 de 0,44 e na escala mensal com R^2 de 0,77. As Figuras 7c e 7d apresentam um comportamento também observado a partir de dados de estação meteorológica em Souza et al. (2019) com o deslocamento entre os meses de máximos e mínimos dos dois métodos (Th x PM), além do maior desvio padrão dos valores associado ao Penman-Monteith, com R^2 de 0,76 para valores diários.

As diferenças observadas entre o desenvolvido para análise da foz do rio Guamá e os trabalhos que usam apenas dados de estações meteorológicas pontuais é decorrente do emprego de produtos de satélite (evapotranspiração, temperatura e precipitação pluviométrica) de resolução moderada disponíveis globalmente (plataforma do Google Earth Engine), o que representa uma diferença na forma de quantificação do dado, que passa a ter o pixel amostrado como unidade de referência da informação. O comportamento global descrito por estes indica a influência sobre a evapotranspiração das mudanças de cobertura vegetal, dando ênfase a necessidade de sistematização de modelos de previsão das mudanças futuras no ciclo de energia e água (Zhang et al., 2016; Gan et al. 2018, Zhang et al., 2019).

3.4 Variabilidade hidroclimática, pressões climáticas e impactos da urbanização nas Áreas de Proteção Ambiental (APAs)

A variabilidade interanual de precipitação demonstrada neste estudo reflete um padrão comum ao já observado em regiões tropicais fortemente influenciadas por fenômenos climáticos globais, como El Niño e La Niña. Estudos mostram que esses eventos extremos estão associados a alterações significativas nos regimes hidrológicos da Amazônia, resultando em períodos de seca severa ou de precipitação excessiva que afetam a disponibilidade hídrica, a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos regionais (Coutinho et al., 2018; Ferreira et al., 2022; Marengo et al., 2024). Mesmo a Amazônia sendo uma região conhecida por sua alta pluviosidade, a análise de 21 anos destacou que na foz do rio Guamá, há períodos críticos de estresse hídrico, particularmente entre os meses de agosto a novembro, onde o déficit hídrico pode ultrapassar -170 mm em determinados meses, direcionando a sazonalidade climática como um fator determinante nas condições climáticas locais e consequentemente nas vulnerabilidades ambientais.

Além disso, eventos extremos como os associados ao El Niño, intensificam os desequilíbrios hídricos, resultando em impactos que vão desde a redução da biodiversidade até a limitação do abastecimento hídrico. Tais evidências reforçam a necessidade de ferramentas de monitoramento que combinem dados históricos e projeções climáticas, permitindo a formulação de políticas públicas mais proativas (Coutinho et al., 2018).

Ademais, a análise espacial da evapotranspiração média diária demonstrou variações interessantes entre as zonas de várzea e as áreas urbanizadas, bem como a dinâmica relacionada às UCs, todas bastante relacionadas as formas de uso e ocupação da terra, sendo a ausência de vegetação e disponibilidade hídrica fatores determinantes para essa resposta (Oliveira et al., 2018).

Faz-se necessário futuramente a inclusão de análises que capturem as variações microclimáticas dentro das áreas urbanas, que podem ser necessárias para melhor compreender a dinâmica hídrica desses ambientes altamente ocupados, impermeabilizados e geralmente com baixa cobertura vegetal. A integração de sensores e dados meteorológicos locais podem complementar o sensoriamento remoto e dar mais precisão a heterogeneidade térmica e hídrica dentro das APAs urbanas, permitindo diagnósticos mais precisos da pressão antrópica sobre esses ecossistemas urbanos e periférico da foz do Guamá.

As APAs Belém e Ilha do Combu ilustram os desafios para a conservação de ecossistemas críticos em áreas de crescimento urbano descontrolado. O processo de expansão urbana nessas zonas tem sido

acompanhado pela substituição e fragmentação da vegetação nativa e pela poluição dos corpos hídricos e redução da capacidade de regulação hídrica, impactos estes frequentemente associados ao crescimento populacional e ao uso inadequado do solo (Amorim e Carlo, 2017). Além disso, esse cenário de adensamento urbano ao redor das APAs, acentua os efeitos de borda e compromete a integridade dos ecossistemas florestais, afetando a funcionalidade ecológica e a resiliência dessas áreas quando expostas a pressões constantes (Haddad et al., 2015).

Trabalhos que investigam infiltração e a recarga dos aquíferos em ambientes urbanos tem notado comportamentos em que a urbanização afeta a forma como dinâmica hídrica local, mostrando que os tipos de cidades com muito asfalto e pouca vegetação original, diminuem bastante a infiltração da chuva e prejudicam a recarga da água subterrânea (Oliveira et al., 2019; Seraphim e Bezerra, 2019). Modelos urbanos com diferentes usos, maior permeabilidade, malhas viárias adaptadas ao relevo e áreas vegetadas são benéficas para a conservação hídrica e estratégicas para restaurar a funcionalidade hidrológica urbana especialmente em áreas sensíveis, como é o caso das UCs deste estudo (Seraphim e Bezerra, 2019).

O planejamento urbano sustentável em zonas de várzea depende de estratégias integradas que considerem a regeneração da cobertura vegetal e a mitigação de pressões antrópicas (Silva et al., 2022). Este estudo reafirma essa necessidade, evidenciando que as zonas protegidas têm sido progressivamente convertidas em extensões das áreas urbanas, prejudicando sua capacidade de regular ciclos hídricos e fornecer serviços ecossistêmicos (Virtanen, 2020).

3.5 Gestão da sensibilidade bioclimática e soluções baseadas na natureza

A identificação de áreas de alta sensibilidade bioclimática na foz do rio Guamá sugere que estratégias de adaptação baseadas nos ecossistemas podem ser fundamentais para melhorar a resiliência da região. Tais estratégias incluem a criação de zonas de amortecimento ao redor das APAs, reflorestamento e implementação de práticas de manejo integrado dos recursos hídricos, que são medidas já propostas em outros contextos tropicais, mostram-se eficazes para reduzir os impactos de eventos climáticos extremos e restaurar a conectividade ecológica (Cardenas-Jiron e Morales-Salinas, 2019).

A análise do uso da terra revelou uma alta concentração populacional próxima aos corpos hídricos e às zonas protegidas, indicando que políticas de ordenamento territorial precisam priorizar o controle da ocupação urbana e a recuperação ambiental dessas áreas. Por exemplo, a implementação de soluções baseadas na natureza, como corredores ecológicos e sistemas de drenagem sustentável, pode mitigar a degradação ambiental e garantir a funcionalidade das APAs (Souza, 2020). Para as APAs analisadas, essas soluções devem acompanhar-se de políticas de ordenamento territorial que são integradas com aspectos físicos, sociais e ecológicos das áreas de várzea, pois estas não devem ter apenas ações estruturais, mas também o reconhecimento do papel das comunidades locais na conservação ambiental. A co-gestão das UCs deve fortalecer-se com a participação na tomada de decisões por populações extrativistas e ribeirinhas, pois tais grupos são estratégicos para proteção de recursos naturais, sobretudo nas APAs do estudo que sofrem crescente pressão urbana.

Apesar dos avanços metodológicos apresentados neste estudo, algumas limitações devem ser destacadas. A resolução espacial e temporal dos dados climáticos utilizados, provenientes de sensoriamento remoto, pode não capturar microclimas urbanos ou dinâmicas locais em detalhes suficientes. Essa limitação foi também observada por Virtanen (2020), que ressaltam a importância de integrar dados de campo às análises climáticas para maior precisão.

No entanto, os resultados reforçam a relevância de abordagens integradas para o planejamento territorial na Amazônia. Estudos futuros devem expandir essa análise, incluindo variáveis socioeconômicas que possam oferecer uma melhor compreensão sobre como as comunidades locais interagem com o ambiente e quais estratégias são mais eficazes para promover a sustentabilidade.

Este estudo tem implicações diretas para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à gestão sustentável dos recursos naturais. A criação de incentivos para práticas de conservação, como o pagamento por serviços ambientais e o uso de créditos de carbono, pode estimular a proteção das áreas mais vulneráveis, como as APAs analisadas (Neiva, 2025). A integração de ferramentas de monitoramento climático em escala local e regional é essencial para mitigar os impactos das mudanças climáticas e promover a adaptação das comunidades. A presença das UCs na RMB mostra-se de fundamental relevância para o desenvolvimento de um padrão bioclimático que fortaleça o desenvolvimento urbano mais resiliente às condições de variabilidade do clima e propicie à população residente e aos ecossistemas envolvidos condições mais harmônicas e de benefício mútuo.

4. Conclusão

A análise da sensibilidade bioclimática na foz do rio Guamá evidencia um cenário de crescente vulnerabilidade ambiental, resultado da interação entre variabilidade climática, pressões antrópicas e ocupação desordenada do território. Os dados de 21 anos apontam para a existência de déficits hídricos sazonais recorrentes, inclusive em uma região historicamente caracterizada por elevada pluviosidade.

As Áreas de Proteção Ambiental analisadas (APA Belém e APA Ilha do Combu) demonstram fragilidade frente à expansão urbana, à fragmentação da vegetação nativa e à intensificação da impermeabilização do solo. A evapotranspiração reduzida nas zonas urbanas, observada na análise espacial, reflete essa perda de funcionalidade ecológica. Em contrapartida, as áreas de várzea ainda mantêm parte de sua capacidade de regulação ambiental, especialmente onde há cobertura vegetal remanescente.

Para enfrentar esses desafios, torna-se essencial adotar uma abordagem integrada de planejamento e gestão ambiental. Isso inclui: o fortalecimento da co-gestão das Unidades de Conservação com participação comunitária; a aplicação de estratégias de adaptação baseadas na natureza, como zonas de amortecimento e reflorestamento; e o aprimoramento do monitoramento climático com dados locais de alta resolução. Além disso, é fundamental considerar a dimensão social e o papel das populações extrativistas e ribeirinhas na conservação e manejo sustentável dessas áreas.

A foz do rio Guamá representa, assim, um território-chave para se compreender os efeitos locais de pressões ambientais globais. As soluções devem ser multiescalares, intersetoriais e fundamentadas em ciência, com vistas à construção de um modelo de ocupação urbana mais resiliente, ecológico e socialmente justo.

5. Agradecimentos

Ao Laboratório de Estudos e Modelagem Hidroambientais, pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro por meio do Programa Institucional de bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

6. Referências

- Amini, S., Saber, M., Rabiei-Dastjerdi, H., & Homayouni, S. (2022). Urban land use and land cover change analysis using random forest classification of landsat time series. **Remote Sensing**, 14(11), 2654. <https://doi.org/10.3390/rs14112654>
- Amorim, A. C., & Carlo, J. C. (2017). Análise das propostas de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro: estudo de caso de Colatina, ES. **Ambiente Construído**, 17(1), 373-39. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000100140>

- Barata, G. B. C., Coelho, M. B. C., Beltrão, N. E. S., & Gomes, D. J. C. (2024). Variabilidade espaço-temporal da evapotranspiração da superfície urbana na Região Metropolitana de Belém. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, 15(1), 96-113, 2024.
- Battisti, A. (2020). Bioclimatic Architecture and Urban Morphology: Studies on Intermediate Urban Open Spaces. **Energies**, 13(21), 5819. <https://doi.org/10.3390/en13215819>
- Cámara Artigas, R., Martínez Batlle, J. R., & Díaz Del Olmo, F. (2024). **Plantilla de Balances Hídrico y Bioclimático**. Grupo de Trabalho de Estudios Tropicales y Cooperación al Desarrollo (Estudos Tropicais e Cooperação para o Desenvolvimento).
- Cámara Artigas, R., Salvà, M., Borja Barrera, C., & Salvador Franch, F. (2014). Análisis comparado del balance hídrico del suelo y bioclimático de la estación del Palacio de Doñana con los datos termohigrométricos del Sabinar del Marqués (Parque Nacional de Doñana). **Publicaciones de la Asociación Española de Climatología**, Serie A; 9.
- Cárdenas-Jirón, L. A., & Morales-Salinas, L. (2019). Urbanismo bioclimático en Chile: propuesta de biozonas para la planificación urbana y ambiental. **EURE**, 45(136), 135-162. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612019000300135>
- Cetin, M., Adiguzel, F., Kaya, O., & Sahap, A. (2018). Mapping of bioclimatic comfort for potential planning using GIS in Aydin. **Environ Dev Sustain**, 20, 361-375. <https://doi.org/10.1007/s10668-016-9885-5>
- Coutinho, E. C., Rocha, E. J. P., Lima, A. M. M., Ribeiro, H. M. C., Gutierrez, L. A. C. L., Barbosa, A. J. S., PAES, G., Bispo, C. & Tavares, P. A. (2018). Variabilidade climática da precipitação na bacia Amazônica Brasileira. **Revista Brasileira de Climatologia**, 22. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.46074>
- Chondrogianni, D. V., & Stephanedes, Y. J. (2022). Evaluation of urban planning methods toward bioclimatic and resilient urban spaces. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, 49(5), 1354-1370. <https://doi.org/10.1177/23998083211063220>
- Duan, J., Cao, Y., Yu, S., Fang, X., Li, R., Xu, Z., Long, C., Wang, J., & Wang, P. (2024). Incorporating Bioclimatic Zones into Informing Ecological Networks for Better Biodiversity Conservation. **Remote Sensing**, 16(1), 85. <https://doi.org/10.3390/rs16010085>
- EMBRAPA. (2005). **Boletim agrometeorológico de 2004 para Belém, PA**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental.
- EMBRAPA. (2021). **Boletim agrometeorológico de 2012 para Belém, PA**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental.
- EMBRAPA. (2025). **Boletim agrometeorológico de 2023 para Belém, PA**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental.
- European Space Agency. (2020). **Copernicus Digital Elevation Model (DEM)**. Disponível em: <https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65>. Acesso em: 20 maio 2025.
- Ferreira, L. C. V., Batista, G. R., de Souza Costa, C. E. A., de Miranda, S. B. D. A., & de Moraes Dias, G. F. (2022). Os índices de anomalia de chuva e sua relação com o El Niño oscilação sul na bacia hidrográfica do rio Tapajós. **Research, Society and Development**, 11(17), e169111738004-e169111738004. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i17.38004>

- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, 2(1), 1-21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gan, R., Zhang, Y., Shi, H., Yang, Y., Eamus, D., Cheng, L., Chiew, F., & Yu, Q. (2018). Use of satellite leaf area index estimating evapotranspiration and gross assimilation for Australian ecosystems. **Ecohydrology**, 11(5), e1974. <https://doi.org/10.1002/eco.1974>
- Gregório, A. M. D. S., & Mendes, A. C. (2009). Batimetria e sedimentologia da baía do Guajará, Belém, estado do Pará, Brasil. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, 5(9), 53-72.
- Gutierrez, C. B. B., Lima, A. M. M., Palidori, L., & Souza, E. B. (2021). Dinâmica multitemporal da urbanização na região metropolitana de Belém: evidências de antropismo em um cenário Amazônico. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, 12(10), 258-272. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.010.0022>
- Gutierrez, C. B., Souza, E. B., & Gutierrez, D. M. (2022). Global/regional impacts on present and near-future climate regimes in the metropolitan region of Belém, eastern Amazon. **Atmosphere**, 13(7), 1077. <https://doi.org/10.3390/atmos13071077>
- Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., ... & Townshend, J. R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. **Science advances**, 1(2), e1500052. <https://doi/full/10.1126/sciadv.1500052>
- Instituto de Desenvolvimento Florestal e da Biodiversidade do Estado do Pará (IDEFLOR-Bio). (2025). **Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém**. Disponível em: <https://ideflorbio.pa.gov.br/area-de-protecao-ambiental-da-regiao-metropolitana-de-belem/>. Acesso em: 27 abr. 2025.
- Kruse, E. E., Laurencena, P. C., Deluchi, M., Forte Lay, J. A., & Rojo, A. (2010). **Estimación de los excesos hídricos en la cuenca del Arroyo El Pescado (Provincia de Buenos Aires)**. In: Varni, M., Entraigas, I. y Vives, L. (editores). Libro de Actas del I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Mar del Plata, Editorial Martin.
- Lima, M. W. D., Rodrigues, S. T., Pereira, J. A. R., Lopes, D. F., El-Robrini, M., Blanco, C. J. C., & Santos, M. D. L. S. (2023). Influência da hidrodinâmica do rio Guamá na dispersão da carga orgânica do Igarapé Tucunduba, Belém, Estado do Pará (Brasil). **RBRH**, 28, e30. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.282320230032>
- Lopes, H. S., Remoaldo, P. C., Ribeiro, V., & Martin-Vide, J. (2022). Análise do ambiente térmico urbano e áreas potencialmente expostas ao calor extremo no município do Porto (Portugal). **Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía**, 31(2), 281-302. <https://doi.org/10.15446/redg.v31n2.91309>
- Lopes, M. N. G., Souza, E. B., & Silva Ferreira, D. B. (2013). Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, 12, 84-102. <https://doi.org/10.5380/abclima.v12i1.31402>
- MAPBIOMAS. (2024). **Coleção 9 da série anual de mapas de cobertura e uso da terra do Brasil**. [S.l.]: MapBiomias. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 20 maio 2025.
- Marengo, J. A., Espinoza, J. C., Fu, R., Jimenez Muñoz, J. C., Alves, L. M., Rocha, H. R., & Schöngart, J.

(2024). Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: A review. **Acta Amazonica**, 54(spe1), e54es22098.

Moraes, B. C. D., Costa, J. M. N. D., Costa, A. C. L. D., & Costa, M. H. (2005). Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônica**, 35(2), 207-214. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000200010>

Neiva, R. M. S., & Nóbrega, W. R. D. M. (2025). Turismo e desenvolvimento: opiniões e pontos de vista dos diferentes atores na Área de Proteção Ambiental Ilha do Combu - Belém do Pará, Brasil. **Turismo: Visão e Ação**, 27, e20068. <https://doi.org/10.14210/tva.v27.20068>

Oliveira, A. N., Koide, S., Costa, M. E. L., & de Lima Bezerra, M. D. C. (2019). Padrões urbanos facilitadores da recarga de aquíferos. **Revista de Morfologia Urbana**, 7(2), e00117-e00117. <https://doi.org/10.47235/rmu.v7i2.117>

Oliveira, B. F. A., Bottino, M. J., Nobre, P., & Nobre, C. A. (2021). Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. **Communications Earth & Environment**, 2(1), 207. 7 <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00275-8>

Oliveira, J. V., Ferreira, D. B. D. S., Sahoo, P. K., Sodré, G. R. C., Souza, E. B., & Queiroz, J. C. B. (2018). Differences in precipitation and evapotranspiration between forested and deforested areas in the Amazon rainforest using remote sensing data. **Environmental Earth Sciences**, 77(6), 239. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7411-9>

Ongaratto, J. M., & Bortolin, T. A. (2021). Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referência no município de São José dos Ausentes (RS), Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 26, 979-987. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190196>

Rocha, N. C., Lima, A. M., & Adami, M. (2021). Forest Fragmentation and landscape structure in the Guamá River Basin, Eastern Amazon. **Geography, Environment, Sustainability**, 14(3), 32-40. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-130>

Rocha, Y. A. D. S., Lima, A. M. M. D., Silva, C. M. S. E., Franco, V. D. S., Raiol, L. L., Oliveira, I. S. D., Dias, M. L. N. & Beltrão Júnior, P. R. E. (2025). Hydro-meteorological dynamics of rainfall erosivity risk in the Amazon River Delta-Estuary. **Journal of Water and Climate Change**, 16(5), 1673-1694. <https://doi.org/10.2166/wcc.2025.544>

Seraphim, A. P. A. C. C., & Bezerra, M. D. C. L. (2019). Cidade e água: Relações entre tipologias de ocupação urbana e recarga de aquíferos. **Cuadernos de Investigación Urbanística**, (126), 1-74. <https://doi.org/10.20868/ciur.2019.126.4369>

Silva, V. C. D., Nascimento, R. D. S., Lopes, J. P., Miranda, J. R., Lopes, F. F. D. M., & Furtado, D. A. (2022). Bioclimatic zoning for quails in the dry period in the state of Paraíba, Brazil. **Revista Ceres**, 69(2), 125-130. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269020001>

Souza, A., Pavão, H. G., Lastoria, G., Garcia Gabas, S., Cavazzana, G. H., & Paranhos Filho, A. C. (2010). Modelo de Thom para o zoneamento bioclimático de Mato Grosso do Sul. **Revista de Geografia Norte Grande**, (46), 137-147. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000200008>

Souza, B. A. (2020). **Gestão de áreas protegidas e a conservação da biodiversidade: uma análise da Área de Proteção Ambiental Ilha do Combú, Belém-Pará-Amazônia-Brasil**. 2020. 112 f. Dissertação de

mestrado, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Souza, E. B., Carmo, A. M. C., Moraes, B. C., Nacif, A., Silva Ferreira, D. B., Rocha, E. J. P., & Souza, P. J. D. O. P. (2016). Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia legal brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo REGCM4. **Revista Brasileira de Climatologia**, 18, 293-306. <https://doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43711>

Souza, E. B., Ferreira, D. B., Anjos, L. J., Cunha, A. C., Silva Jr, J. A., Coutinho, E. C., Sousa, A. M. L., Souza, P. J. O. P., Correa, W. P. M., Dias, T. S. S., Carmo, A., Gutierrez, C., Sodré, A., Lima, A., Rocha, E., Moraes, B., Pezzi, L., & Ambrizzi, T. (2024). Intensification of Natural Disasters in the State of Pará and the Triggering Mechanisms Across the Eastern Amazon. **Atmosphere**, 16(1), 7. <https://doi.org/10.3390/atmos16010007>

Souza, T. S. D., Eichenberger, A. M. R. M., & Nascimento, P. D. S. (2019). Estudo comparativo de diferentes metodologias na determinação da evapotranspiração de referência em Feira de Santana-BA. **Revista Brasileira de Climatologia**, 25, 737-754.

Syperreck, V. L. G., Klosowski, E. S., Greco, M., & Furlanetto, C. (2008). Avaliação de desempenho de métodos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 30, 603-609. <https://doi.org/10.1590/S1807-86212008000500001>

Viana, L. S., Araújo, G., Maryjane, D., Silva Alves, E., Martins do Carmo, A. P., Queiroz de Souza, V., & Silva Freitas, L. (2022). Variabilidade temporal da evapotranspiração de referência para a Mesorregião Metropolitana de Belém-PA. **Brazilian Journal of Irrigation & Drainage**, 27(1). <https://doi.org/10.15809/irriga.2022v27n1p111-123>.

Virtanen, K. (2020).  reas protegidas e urbanização: o caso da APA da ilha do Comb , Belém (PA). **Cadernos de Estudos Sociais**, 35(2). [https://doi.org/10.33148/CES25954091V35n2\(2020\)1890](https://doi.org/10.33148/CES25954091V35n2(2020)1890)

Wan, Z.; Hook, S.; Hulley, G. (2021). **MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061** [conjunto de dados]. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A1.061>. Acesso em: 19 maio 2025.

Zhang, Y., Kong, D., Gan, R., Chiew, F. H., McVicar, T. R., Zhang, Q., & Yang, Y. (2019). Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017. **Remote sensing of environment**, 222, 165-182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.031>

Zhang, Y., Peña-Arancibia, J. L., McVicar, T. R., Chiew, F. H., Vaze, J., Liu, C., Miralles, D. G., & Pan, M. (2016). Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. **Scientific Reports**, 6(1), 19124. <https://doi.org/10.1038/srep19124>