

BACIA DA FOZ DO AMAZONAS (2000–2023): DINÂMICA DE USO DO SOLO E SENSIBILIDADE CLIMÁTICA DO DOSSEL POR SENSORIAMENTO REMOTO

Giuliana Dos Santos Coelho¹

Livânia Norberta de Oliveira²

Gabriel Alves Veloso³

RESUMO

A análise da Bacia da Foz do Amazonas, cuja matriz florestal convive com pressões antrópicas pontuais e variabilidade hidroclimática nos últimos anos. A metodologia integrou dados do MapBiomass C9 (2000, 2010, 2020, 2023), NDVI/MODIS anual (2001–2023) e CHIRPS (2001–2023) no Google Earth Engine. Verificou-se que a paisagem manteve predominância de florestas (~98%), com discreto aumento de pastagens e lavouras (+1,24 pp). O NDVI apresentou valores elevados e tendência positiva (Theil–Sen = +0,00050 ano⁻¹; τ = 0,343; p = 0,0229), embora tenha registrado anomalia negativa em 2023 ($\approx -1,21\sigma$) durante ano seco (CHIRPS $\approx -13,5\%$). A correlação anual NDVI–precipitação foi modesta, sugerindo respostas intra-anuais não capturadas. Conclui-se que a bacia combina estabilidade estrutural, mudanças localizadas e sensibilidade climática detectável, destacando a necessidade de monitoramento contínuo.

Palavras-chave: Bacia da Foz do Amazonas, Impactos ambientais, Sensoriamento remoto

FOZ DO AMAZONAS BASIN (2000–2023): LAND USE DYNAMICS AND CANOPY CLIMATE SENSITIVITY VIA REMOTE SENSING

ABSTRACT

This study analyzes the Foz do Amazonas Basin where a largely intact forest matrix coexists with localized anthropogenic pressures and hydroclimatic variability. Integrating MapBiomass C9 (2000, 2010, 2020, 2023), annual NDVI/MODIS (2001–2023), and CHIRPS (2001–2023) datasets within Google Earth Engine, the landscape was found to remain predominantly forested (~98%), with a slight increase in pasture and cropland areas (+1.24 pp). NDVI values were high and showed a positive trend (Theil–Sen = +0.00050 yr⁻¹; τ = 0.343; p = 0.0229), though a negative anomaly was observed in 2023 ($\approx -1.21\sigma$) during a dry year (CHIRPS \approx

¹Graduanda em Geografia pela Universidade Federal do Pará - UFPA, Laboratório de Geografia Física e Cartografia (LAGEO), Altamira/PA, Brasil, Email: giuliana.coelho@altamira.ufpa.br

²Doutora em Geografia, Professora no Departamento de Geografia da Universidade Federal do Pará - UFPA, Altamira/PA, Brasil, Email: livania.norberta@ufpa.br

³Doutor em Geografia, Professor no Departamento de Geografia da Universidade Federal do Pará - UFPA, Altamira/PA, Brasil, Email: gveloso@gmail.com

–13.5%). The annual NDVI–precipitation correlation was modest, indicating intra-annual responses not captured by the annual aggregation. Overall, the basin exhibits structural stability alongside localized changes and detectable climate sensitivity, underscoring the importance of continuous monitoring.

Keywords: Foz do Amazonas Basin, Environmental impacts, Remote sensing

CUENCA DE LA BOCA DEL AMAZONAS (2000–2023): DINÁMICA DEL USO DEL SUELO Y SENSIBILIDAD CLIMÁTICA DEL DOSSEL MEDIANTE TELEDETECCIÓN.

RESUMEN

Este estudio analiza la Cuenca de la Boca del Amazonas, donde una matriz forestal predominantemente intacta convive con presiones antrópicas puntuales y variabilidad hidrológica. Integrando los conjuntos de datos MapBiomás C9 (2000, 2010, 2020, 2023), NDVI/MODIS anual (2001–2023) y CHIRPS (2001–2023) en Google Earth Engine, se encontró que el paisaje se mantiene mayoritariamente forestal (~98%), con un ligero aumento de pastizales y cultivos (+1,24 pp). Los valores de NDVI fueron altos y mostraron una tendencia positiva (Theil–Sen = +0,00050 año⁻¹; $\tau = 0,343$; $p = 0,0229$), aunque se registró una anomalía negativa en 2023 ($\approx -1,21\sigma$) durante un año seco (CHIRPS $\approx -13,5\%$). La correlación anual NDVI–precipitación fue modesta, indicando respuestas intra-anales no captadas por la agregación anual. En conjunto, la cuenca combina estabilidad estructural, cambios localizados y sensibilidad climática detectable, destacando la necesidad de monitoreo continuo..

Palabras clave: Cuenca de la Foz del Amazonas, Impactos ambientales, Teledetección.

INTRODUÇÃO

A Bacia da Foz do Amazonas (BFAM), situada ao longo das regiões costeiras-estuarinas do Amapá e do Pará, constitui um dos sistemas naturais mais singulares da margem equatorial brasileira (Figueiredo; Zalán; Soares, 2007). A combinação da elevada descarga de sedimentos do rio Amazonas, da dinâmica de marés e da plataforma continental rasa resulta em um mosaico ambiental que inclui florestas de terra firme, florestas alagáveis e extensos sistemas estuarinos (Ribeiro, 2021). Nesse espaço de transição entre continente e oceano, gradientes de hidrossedimentos e salinidade modulam processos ecológicos e geomorfológicos, sustentando elevada produtividade e biodiversidade (Fearnside, 2019; Moura et al., 2016).

Paralelamente, a região enfrenta pressões antrópicas difusas e cumulativas, ainda relativamente modestas, derivadas da expansão agropecuária e da urbanização pontual de

núcleos costeiros e ribeirinhos (Chelala; Chelala, 2024). Em face da variabilidade climática e das mudanças ambientais, compreender a dinâmica da paisagem e a resposta da vegetação a anos mais úmidos ou secos é essencial para o planejamento ambiental e a gestão de risco (Becker, 2001; MMA, 2022).

Nesse contexto, as geotecnologias oferecem ferramentas robustas para integrar de forma transparente e reprodutível dados de uso e cobertura da terra, índices de vigor da vegetação e séries climáticas. O sensoriamento remoto, com observação sinótica e multitemporal, é adequado para detectar transformações lentas e pulsos rápidos em áreas remotas, onde o monitoramento de campo é oneroso (Otake, 2015; Veloso, 2022). Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e plataformas de processamento em nuvem, como o *Google Earth Engine* (GEE), permitem padronizar rotinas de filtragem, composição de imagens, aplicação de máscaras de qualidade e cálculo de estatísticas zonais, ampliando rastreabilidade e minimizando vieses (INPE, 2023; MapBiomas, 2023).

Três conjuntos de dados se destacam pela consistência e abrangência: o MapBiomas, que fornece mapas anuais de uso e cobertura da terra derivados de séries Landsat e validados por bioma (MapBiomas, 2023); o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), obtido de produtos *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e amplamente utilizado em análises de vigor do dossel (Xavier; Fortes, 2023); e o *Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS), estimativa quase global de precipitação que combina sensores orbitais e estações em superfície, adequada para caracterizar variabilidade hidroclimática interanual e sazonal (Funk et al., 2015).

O estudo utiliza essa abordagem para caracterizar a estrutura e a dinâmica recentes da BFAM, bem como avaliar a sensibilidade climática do dossel em escala anual. Foram analisados quatro marcos temporais de uso e cobertura da terra (2000, 2010, 2020 e 2023), a série anual de NDVI (2001–2023) e a série anual de precipitação CHIRPS (2001–2023). A escolha das janelas temporais e da agregação anual equilibra amplitude temporal, comparabilidade e clareza interpretativa, preservando robustez na análise das classes e minimizando ruídos mensais, particularmente em regiões com nebulosidade persistente (Fonseca et al., 2021).

Hipotetiza-se que a matriz florestal e alagável da Foz do Amazonas apresenta estabilidade estrutural em larga escala, com mudanças localizadas em bordas de conversão

influenciadas pela ocupação humana (Santos, 1996; Fonseca et al., 2021; Gonçalves, 2024; Chelala; Chelala, 2024). O NDVI tende a manter-se elevado, respondendo a anos com anomalias pluviométricas negativas (Xavier; Fortes, 2023; Barbosa et al., 2020).

O MapBiomas oferece séries anuais auditáveis e legendas padronizadas, permitindo análise multitemporal confiável (MapBiomas, 2023). Em áreas costeiras-estuarinas, pequenas oscilações são interpretadas com cautela (Silva Filho, 2024). O NDVI processado no GEE indica o vigor médio anual do dossel, enquanto o CHIRPS fornece o contexto hidroclimático para diferenciar anos úmidos e secos (Xavier; Fortes, 2023; Barbosa et al., 2020; Costa et al., 2021).

A relevância aplicada da abordagem reside na construção de uma linha de base reprodutível, que permite avaliar futuros desvios climáticos ou antrópicos com maior precisão (Fearnside, 2019; Greenpeace Brasil, 2024). Em regiões de alta sensibilidade ecológica, a detecção de anos secos com redução moderada do NDVI atua como teste de estresse do sistema, oferecendo alertas precoces de risco ecológico (IBAMA, 2023; IBAMA, 2024; Silva et al., 2019).

O estudo concentra-se na escala anual e no nível de síntese das classes do MapBiomas e do NDVI médio anual. Embora processos intra-anuais sejam relevantes, à escala anual permite identificar a dominância persistente de florestas de terra firme e alagáveis, incrementos localizados de uso antrópico e tendências positivas de longo prazo no NDVI, sensíveis a anomalias pluviométricas em anos secos (Fonseca et al., 2021; Xavier; Fortes, 2023; Barbosa et al., 2020).

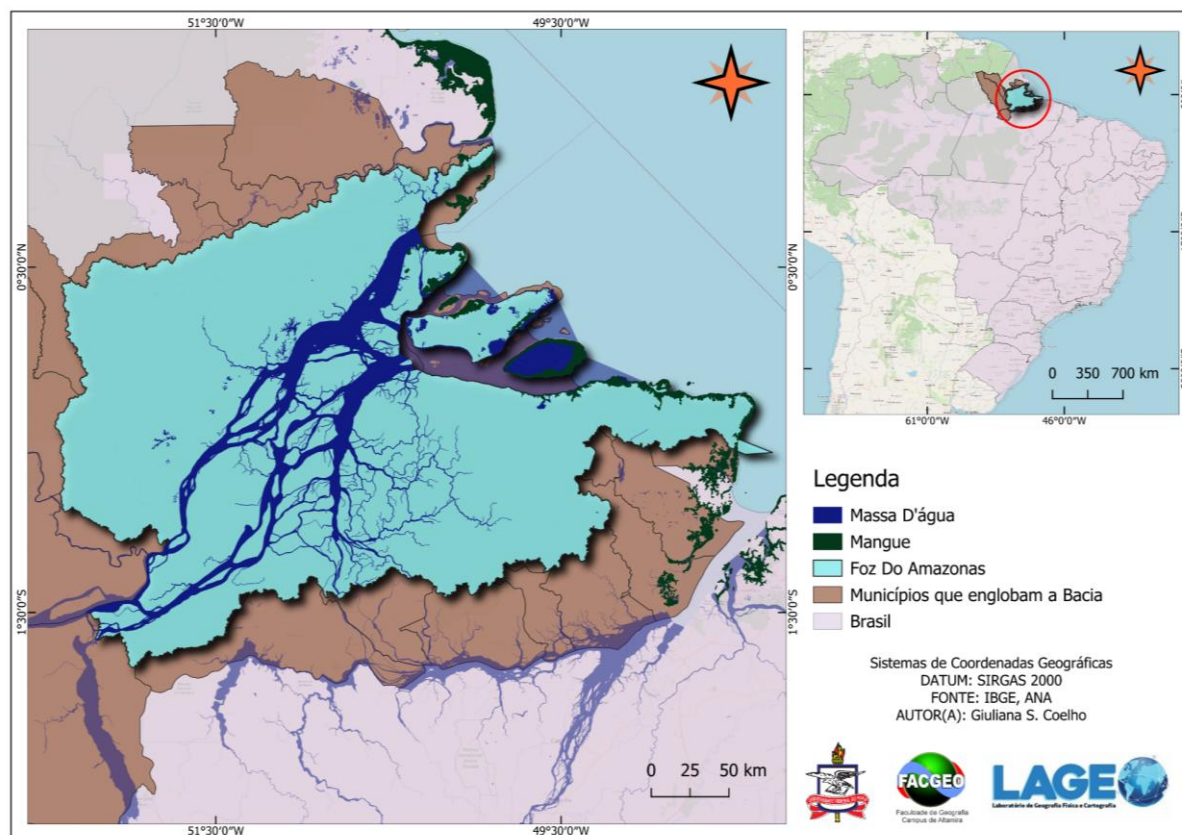
A questão central é: em que medida a BFAM manteve estabilidade de cobertura entre 2000 e 2023 e como o vigor da vegetação respondeu às anomalias interanuais de precipitação, especialmente em anos secos como 2023, quando se observou recuo moderado do NDVI em relação à climatologia? Essa pergunta sintetiza a ambição e os limites do estudo: caracterizar a paisagem e sua sensibilidade climática com dados consistentes e métodos reprodutíveis, fornecendo diagnóstico robusto e operacional para a gestão ambiental (MapBiomas, 2023; Xavier; Fortes, 2023; Barbosa et al., 2020).

METODOLOGIA

Área de Estudo.

A Bacia da Foz do Amazonas é a bacia sedimentar mais ao norte da margem continental brasileira, estendendo-se ao longo de todo o litoral do estado do Amapá e parte do noroeste do Pará, com área aproximada de 283.000 km² (Figura 1), que inclui a plataforma continental, o talude e as reas de águas profundas e ultraprofundas. Sua formação está fortemente ligada à sedimentação promovida pelo rio Amazonas, cuja descarga contribuiu para a constituição de um extenso cone submarino, conhecido como Cone do Amazonas, composto por depósitos fluviais, deltáicos e marinhos profundos (Figueiredo; Zalán; Soares, 2007; ANP, 2021).

O rio Amazonas, maior curso d'água do Brasil, exerce papel central no transporte de sedimentos e nutrientes para o Atlântico, apresentando vazão média de cerca de 300 milhões de litros de água por segundo. Essa descarga forma uma pluma sedimentar que pode alcançar até 200 km mar adentro, alterando a salinidade e estimulando a produtividade biológica marinha (Espaço Ecológico, s.d.; INPE, 2023).

Figura 1: Mapa de Localização da Bacia Foz do Amazonas.

Fonte: Autor(a) 2024

Análise espacial e geoprocessamento.

O recorte espacial corresponde à Bacia da Foz do Amazonas e sua faixa costeiro-estuarina adjacente. Para garantir a comparabilidade entre fontes e evitar vieses de área, todas as operações métricas (cálculo de hectares e estatísticas zonais) foram executadas em projeção equivalente (igual-área) com datum SIRGAS 2000, harmonizando resolução e sistema de referência por conjunto de dados antes de qualquer agregação. As métricas de área foram reportadas em hectares (ha) e, quando pertinente, em percentuais relativos ao total do recorte em cada ano analisado..

Todo o processamento foi realizado na plataforma do *Google Earth Engine* (GEE), assegurando a rastreabilidade do fluxo de trabalho: seleção de coleções, filtragem temporal e espacial, aplicação de máscaras de qualidade, composição de imagens, estatísticas zonais e

exportação de tabelas e figuras (Santos, 2024; Silva Filho, 2024). *Scripts* (com parâmetros de datas, bandas, máscaras e reamostragens) foram versionados e anotados para reprodutibilidade.

Conjuntos de dados:

- Uso e cobertura da terra – MapBiomas Coleção 9 (1985–presente; resolução nominal 30 m). Foram extraídos quatro marcos temporais: 2000, 2010, 2020 e 2023, empregando a legenda harmonizada do MapBiomas para as classes de interesse (Formação Florestal, Floresta Alagável, Mangue, Pastagem, Outras Lavouras Temporárias, Área Urbanizada) (MapBiomas, 2023).
- Vigor da vegetação – NDVI estimado a partir de imagens MODIS (produto de vegetação do sensor Terra), com composição anual no período 2001–2023. Empregou-se a série padronizada de NDVI do MODIS disponível no GEE (escala de fator aplicada, resultando em valores na faixa $[-1, 1]$).
- Precipitação – CHIRPS ($0,05^\circ$), com agregação mensal e anual no período 2001–2023. Usou-se a soma mensal (mm/mês) e o total anual (mm/ano) no recorte espacial (Funk et al., 2015).

Os rasters anuais foram recortados ao limite da área de estudo e reprojetados para a projeção equivalente definida para cálculos de área. Para cada ano (2000, 2010, 2020, 2023), calculou-se a estatística zonal de área por classe (ha) utilizando a equação 1. A fim de evitar artefatos de comparabilidade decorrentes de pequenas variações de máscara ou mosaico entre anos, os percentuais foram normalizados por ano (Google Earth Engine, 2023). Equação 1:

$$\%classes_{ano} = \frac{\text{área da classe, ano}}{\sum \text{todas as classes, ano}} \times 100$$

Essa normalização assegura que as somas anuais de percentuais se aproximam de 100%, como se espera para classes mutuamente exclusivas.

A série de NDVI foi construída a partir de composições anuais para 2001–2023. No GEE, aplicou-se a máscara de qualidade (banda(s) de QA do produto de vegetação) para excluir pixels com nuvem, sombra, neve/gelo ou baixa confiabilidade, seguindo a documentação do produto MODIS (Didan, 2015). Após a máscara, as imagens foram combinadas por média anual no recorte espacial. Como o NDVI do MODIS já é fornecido como índice espectral pré-

computado, não se recalculou $(NIR-RED)/(NIR+RED)$; apenas aplicou-se o fator de escala e as máscaras de qualidade. A série anual resultante (NDVI médio por ano) fundamenta as análises de tendência e as comparações com CHIRPS.

Os dados CHIRPS (resolução $0,05^\circ$) foram filtrados para o recorte espacial e agregados por mês (soma em mm) (Funk et al., 2015). A partir da série mensal (2001–2023), obteve-se o total anual (soma de janeiro a dezembro de cada ano). Para análises de anomalia (quando empregadas), calculou-se a climatologia mensal de 2001–2020 (média por mês) e derivaram-se anomalias absolutas e padronizadas (z-score) por mês (equação 2). Equação 2:

$$anomalias_m = CHIRPS_m - \overline{CHIRPS}_{m,clima}, \quad z_m = \frac{anomalias_m}{\sigma_{m,clima}}$$

Essas anomalias foram utilizadas para contextualizar anos secos/úmidos e, quando aplicável, discutir a coerência com o NDVI anual.

Para cada marco temporal (2000, 2010, 2020, 2023), foram produzidas: (i) áreas por classe (ha) e percentuais normalizados; (ii) mudança líquida por classe (2000→2023); e (iii) variação em pontos percentuais (pp) entre 2000 e 2023. Opcionalmente (material suplementar), estruturou-se uma matriz de transição entre os marcos (2000→2010→2020→2023) a fim de explicitar origens e destinos das mudanças líquidas (por exemplo, transições Formação Florestal → Pastagem/Outras Lavouras Temporárias) (MapBiomass, 2023).

A tendência do NDVI anual (2001–2023) foi estimada com abordagem robusta e não paramétrica:

- Declive (magnitude): estimador Theil–Sen, reportado como variação por ano e, para facilitar a interpretação, por década (multiplicação por 10).
- Monotonicidade (significância): teste Mann–Kendall (nível de significância $\alpha = 0,05$), com relato de estatística (τ) e valor-p.
- Climatologia e anomalias: a climatologia do NDVI para 2001–2020 (média e desvio-padrão) serviu de referência para a anomalia anual (diferença entre o valor do ano e a média climatológica) e para a anomalia padronizada (z-score) do ano de 2023, permitindo qualificar o sinal de “ano seco” observado.

A partir dos totais anuais de CHIRPS (2001–2023), descreveu-se a variabilidade interanual (média, desvio-padrão, anos extremos) e testou-se a relação com o NDVI anual médio:

- Correlação anual (lag 0): coeficiente de Pearson entre NDVI anual e CHIRPS anual correspondentes (2001–2023), com relato de r , p e n .
- Correlação anual defasada (lag 1): Pearson entre NDVI de t e CHIRPS de $t-1$, explorando possível memória hídrica interanual.

Como a resposta ecofisiológica da vegetação amazônica frequentemente se manifesta em janelas mensais/estacionais e defasagens curtas (semanas a poucos meses), a análise em escala anual tende a subestimar a força do acoplamento de clima–vegetação. Por isso, a correlação anual é apresentada como diagnóstico geral e coerente com o escopo do estudo; análises com NDVI mensal e lags 0–3 meses podem ser agregadas futuramente para refinar a leitura mecanística.

Para evitar inconsistências decorrentes de resoluções e grids distintos, adotou-se o seguinte protocolo no GEE: (i) as métricas de área (MapBiomas) foram extraídas no grid nativo (30 m) e calculadas após reprojeção para CRS igual-área; (ii) a série NDVI (MODIS) foi analisada em seu grid nativo, com reamostragem bilinear apenas para fins cartográficos quando exibida lado a lado com outras camadas; (iii) a série CHIRPS (0,05°) foi mantida no grid original, uma vez que a variável é integrada por soma (mm) antes de qualquer comparação com NDVI.

Em todos os casos, máscaras de qualidade foram aplicadas conforme disponível: classes vazias ou não definidas no MapBiomas; pixels com baixa confiabilidade ou contaminados no NDVI (QA do produto de vegetação MODIS); e valores ausentes no CHIRPS. Pixels mascarados não contribuíram para médias/áreas.

Além das estatísticas descritivas (média, desvio-padrão, extremos), reportamos:

- Mudanças absolutas e relativas no uso/cobertura: Δha (2023–2000) e Δpp (pontos percentuais).
- Tendência do NDVI: declive Theil–Sen (ano^{-1} e década^{-1}), τ e p de Mann–Kendall.
- Associação climática: r , p e n para as correlações NDVI×CHIRPS nos esquemas lag 0 e lag 1.

Unidades, intervalos e critérios de decisão ($\alpha = 0,05$) são informados nos resultados. Quando a interpretação depende de anomalias (NDVI ou CHIRPS), estas são explicitamente referenciadas à climatologia 2001–2020 do próprio conjunto.

Três fontes centrais de incerteza foram consideradas na interpretação: (i) ambientes costeiro-estuarinos (manguezais) são faixas estreitas sujeitas a maré, nebulosidade persistente e mistura espectral, o que pode induzir oscilações de baixa amplitude na série de classes do MapBiomas; (ii) diferenças residuais de máscara/mosaico entre anos motivam a normalização de percentuais por um denominador anual comum; (iii) agregações anuais de NDVI e CHIRPS tendem a diluir relações ecofisiológicas de curta defasagem; por isso, os resultados anuais são interpretados como um diagnóstico sinótico e coerente com o escopo do estudo, não como estimativa do acoplamento máximo possível entre clima e vegetação.

Mapas temáticos (uso/cobertura nos marcos 2000, 2010, 2020, 2023; série NDVI anual) foram gerados no GEE com paletas padronizadas e grade de referência constante, exportados em resolução compatível com impressão (300 dpi). As tabelas de áreas (ha), percentuais normalizados (%), tendência do NDVI e séries anuais (NDVI, CHIRPS) foram exportadas em formato .csv a partir das coleções reduzidas no GEE, assegurando integridade numérica entre figuras e texto.

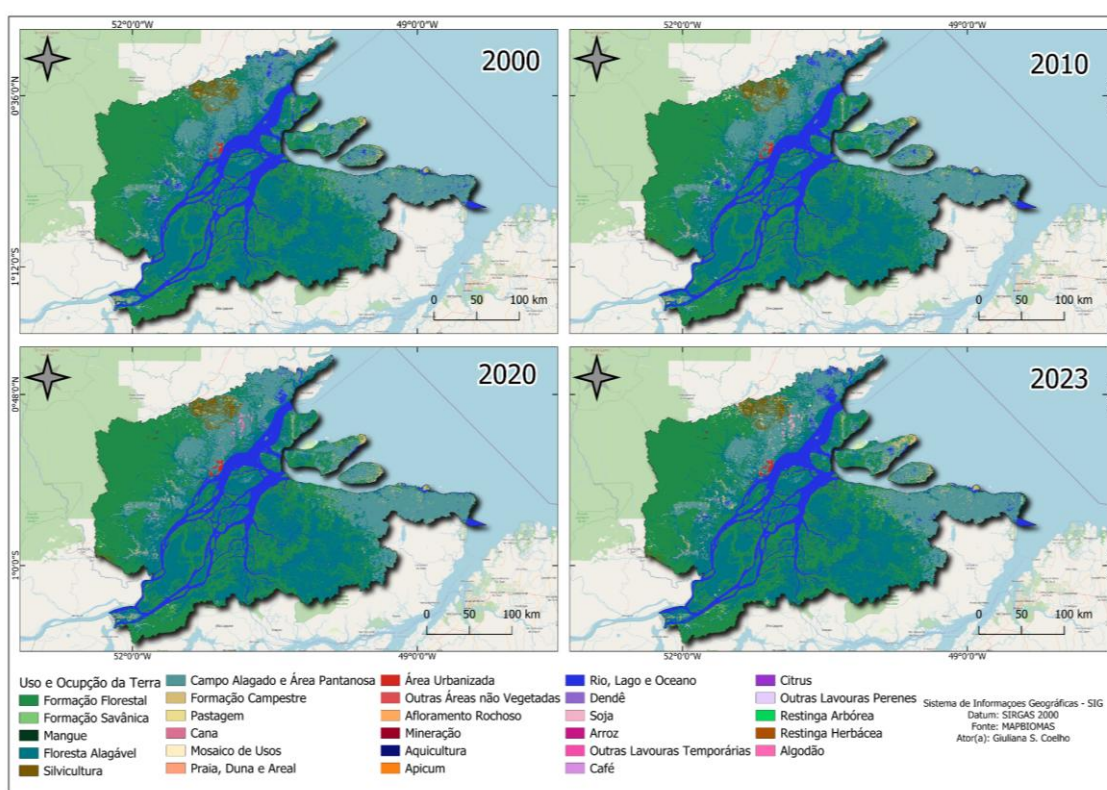
RESULTADOS E DISCUSSÕES

A integração de dados multitemporais de sensoriamento remoto, análises climáticas e sobreposições espaciais possibilitou uma caracterização abrangente da dinâmica ambiental da Bacia da Foz do Amazonas entre 2000 e 2023, evidenciando um cenário de estabilidade ecológica aparente, mas marcado por pressões antrópicas crescentes e vulnerabilidade cumulativa em zonas de transição entre ambientes terrestres, costeiros e marinhos (Silva et al., 2019).

A análise conjunta de uso e cobertura da terra (MapBiomas, Coleção 9), vigor da vegetação (NDVI a partir de imagens MODIS) e precipitação (CHIRPS) (Funk et al., 2015) revela estabilidade estrutural em larga escala, coexistindo com alterações localizadas em classes antrópicas e sensibilidade climática mensurável do dossel em anos de déficit hídrico. Para assegurar comparabilidade entre os marcos temporais de uso e cobertura (2000, 2010, 2020 e

2023), os percentuais foram normalizados por ano com base no mesmo denominador (soma das classes no recorte), garantindo que as participações relativas reflitam coerentemente a composição da paisagem em cada período (Santos, 1996; Santos, 2024). Esse cuidado metodológico minimiza artefatos e permite interpretar tendências discretas sem distorções causadas por inconsistências de máscara ou mosaico.

Figura 2: Mapa de Uso e Ocupação da Terra da Bacia Foz do Amazonas (2000, 2010, 2020 e 2023).



No recorte analisado, a paisagem é dominada por Formação Florestal e Floresta Alagável em todo o período. De acordo com a tabela 1, em 2000, as participações normalizadas foram de 55,13% e 44,24%, respectivamente; em 2023, 53,97% e 44,15%. Em termos absolutos, isso corresponde a variações modestas -12.797 ha na formação florestal e +32.965 ha na floresta alagável entre 2000 e 2023 compatíveis com uma matriz ecológica resiliente, fortemente condicionada pela hidrodinâmica regional, pela conectividade fluvial-estuarina e

pelo aporte sedimentar (Espaço Ecológico, s.d.). A distribuição espacial dessas classes segue a lógica do sistema: as florestas alagáveis se concentram nas faixas adjacentes aos grandes cursos d'água e nos estuários, formando mosaicos contínuos que sustentam produtividade elevada e funcionam como amortecedores de extremos (AMBIENTEBRASIL, 2025; Becker, 2001).

Tabela 1: Áreas(ha) das Classe de Uso/Cobertura da Bacia Foz do Amazonas (2000, 2010, 2020 e 2023).

Classe de Uso/Cobertura	2000 (ha)	2010 (ha)	2020 (ha)	2023 (ha)
Formação Florestal	2788484,72	2784284,79	2780759,22	2775687,63
Floresta Alagável	2237653,36	2240105,24	2243115,86	2270618,81
Pastagem	13176,05	17977,33	19014,92	38912,26
Área Urbanizada	10038,65	10924,82	12128,70	12470,82
Mangue	6000,11	5.575,31	3.782,75	4.865,96
Outras Lavouras Temporárias	2.592,40	521,89	7.452,74	40.749,72

Fonte: MapBiomass, Coleção 9.0, 2025.

Elaborado pelos autores, 2025

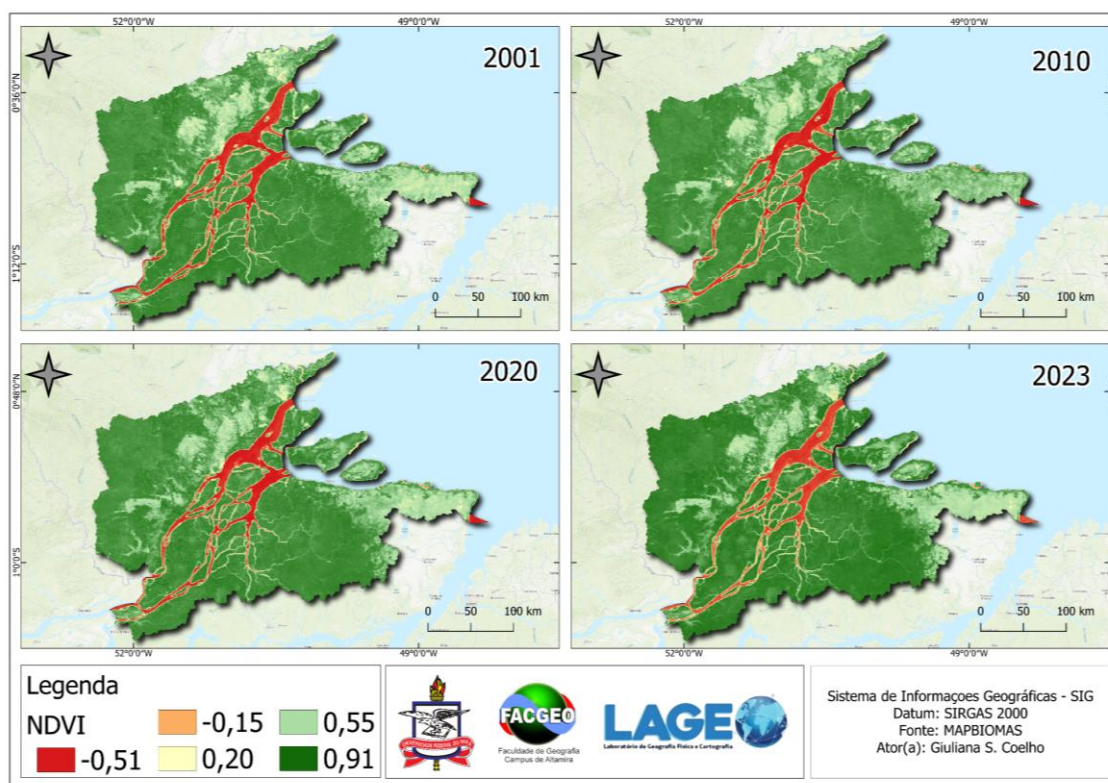
As classes antrópicas exibem crescimento localizado, ainda que partindo de bases mínimas. A Pastagem passa de 13.176 ha (0,26%) para 38.912 ha (0,76%), um incremento de 25.736 ha (+0,50 ponto porcentual), com taxa média anual aproximada de +4,8% a.a. “Outras Lavouras Temporárias” evoluem de 2.592 ha (0,05%) para 40.750 ha (0,79%), ou +38.157 ha (+0,74 pp), ritmo médio de +12,7% a.a. a partir de valores muito pequenos. A Área Urbanizada cresce de 10.039 ha (0,20%) para 12.471 ha (0,24%), acréscimo de 2.432 ha (+0,04 pp; ~+0,95% a.a.). Tomadas em conjunto, essas mudanças adicionam cerca de +1,24 pp às classes antrópicas entre 2000 e 2023 (Silva Filho, 2024; Gonçalves, 2024). Embora pequenas em participação relativa, estas podem reconfigurar processos à escala local, sobretudo nos contatos entre terra firme e várzea, onde crescem bordas, alteram fluxos de água e sedimentos e modulam a pressão sobre ambientes úmidos.

O comportamento da classe “Mangue” merece análise cautelosa. A série mostra oscilação de baixa amplitude de 6.000 ha (0,12%) em 2000 e 4.866 ha (0,09%) em 2023, diferença de -1.134 ha (-0,02 pp). Esse sinal discreto é plausível em um litoral dominado por maré e pluma fluvial (Ribeiro, 2021; Moura et al., 2016), mas também é sensível a limitações

inerentes a mapeamentos ópticos em faixas costeiras estreitas (nebulosidade persistente, mistura espectral, variação de nível d'água). Por isso, a interpretação privilegia o padrão multi-ano e a coerência espacial, reconhecendo que oscilações pontuais não necessariamente traduzem mudança ecológica substantiva no terreno. Esse entendimento não dilui a relevância da classe, crítica para a biodiversidade e a proteção costeira, apenas exige prudência na leitura fina de variações pequenas em séries anuais (Greenpeace Brasil, 2019; ICMBIO, 2021).

A análise multitemporal de uso e cobertura sustenta a percepção de uma paisagem estruturalmente estável na escala de bacia, mas sujeita a pressões difusas e cumulativas nas bordas de conversão. Essa estabilidade não implica estagnação: esta coexiste com incrementos antrópicos discretos e espacialmente concentrados, onde a acessibilidade, o relevo local e a proximidade de eixos hidrográficos favorecem a abertura de áreas ou a intensificação de usos (ANP, 2021; Chelala; Chelala, 2024). Uma matriz de transição entre 2000→2010→2020→2023 quando incluída como material suplementar ajuda a explicitar origens e destinos dessas mudanças líquidas, distinguindo, por exemplo, conversões de formações florestais para pastagens de rearranjos entre classes abertas (Santos, 1996; Santos, 2024).

No eixo da vegetação, o NDVI anual (MODIS) sustenta o argumento de resiliência média-alta do dossel, com tendência positiva estatisticamente significativa ao longo de 2001–2023 (Figura 3). O estimador de Theil–Sen indica +0,00050 por ano (IC95%: +0,00010 a +0,00083), equivalente a +0,0050 por década; o teste de Kendall apresenta $\tau = 0,343$ com $p = 0,0229$, evidenciando monotonia crescente (Funk et al., 2015).

Figura 3: Mapa de NDVI da Bacia Foz do Amazonas (2001, 2010, 2020 e 2023).

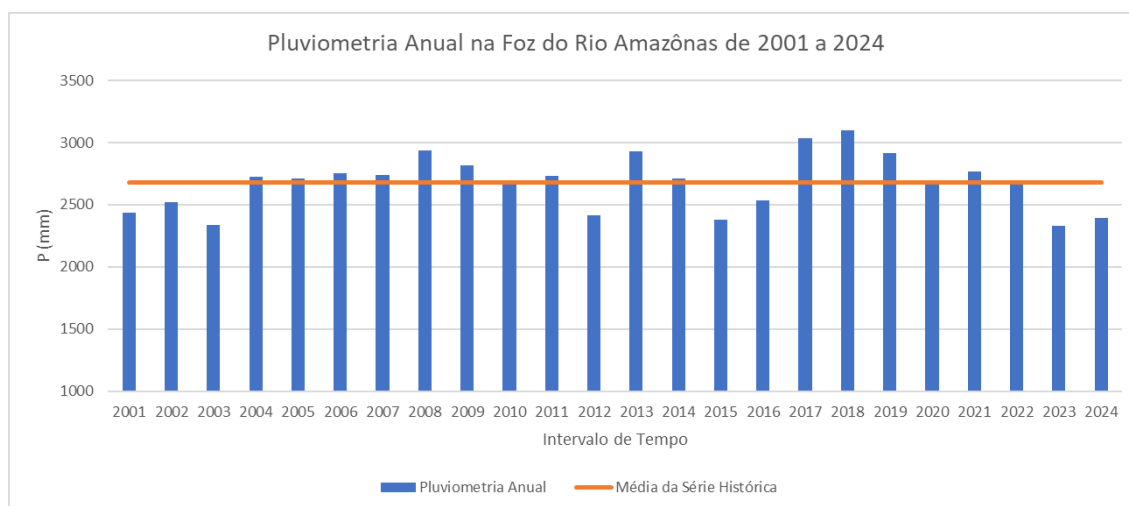
Fonte: Autor(a) 2025.

O intervalo de valores anuais é estreito e compatível com dossel denso: mínimo em 2009 (0,674) e máximo em 2019 (0,702). Em 2023, o NDVI observado foi 0,683, abaixo da climatologia 2001–2020 (média 0,6905; dp 0,00619), o que corresponde a uma anomalia de $-0,0075$ ($\sim -1,21 \sigma$). Essa redução moderada, sem quebrar a tendência de longo prazo, sugere uma sensível resposta ao contexto hidroclimático de 2023, sinalizando que a vegetação, mesmo em ambiente hiperúmido, experimenta “testes de estresse” em anos com precipitações aquém da média (AMBIENTEBRASIL, 2025; IBAMA, 2024a).

A série anual de precipitação (CHIRPS) fornece o pano de fundo climático dessa resposta. Entre 2001 e 2023 (Figura 4), os totais anuais apresentam média de $\approx 2.690,9$ mm/ano e desvio-padrão de $\approx 216,7$ mm, com alternância de anos úmidos e secos típica da região (Funk et al., 2015; IBGE, 2023). No recorte, 2018 se destaca como o mais úmido (3.098,2 mm), enquanto 2023 desponta como o mais seco (2.326,3 mm), cerca de $-13,5\%$ abaixo da média de longo prazo e com z-score aproximado de $-1,68$. O emparelhamento entre esse mínimo pluviométrico e a anomalia negativa do NDVI em 2023 reforça a coerência da leitura integrada:

a disponibilidade hídrica, ainda que abundante em média, não é irrelevante; em anos de déficit, seus efeitos emergem de forma mensurável na fisiologia do dossel (AMBIENTEBRASIL, 2025; Fonseca et al., 2021).

Figura 4: Gráfico da Pluviometria Anual da Bacia Foz do Amazonas (2001 a 2024).



Fonte: Chirps, 2025

Elaborado pelos autores, 2025

Ao investigar a associação entre NDVI e chuva em escala anual, observa-se correlação positiva, mas não significativa no recorte ($r = 0,302$, $p = 0,161$, $n = 23$), e praticamente nula quando testada uma defasagem interanual ($\text{NDVI}_t \times \text{CHIRPS}_{\{t-1\}}$: $r = -0,040$, $p = 0,861$, $n = 22$) (Funk et al., 2015). Esses resultados não contradizem o papel do clima; pois refletem a conhecida limitação da agregação anual para capturar processos ecofisiológicos que operam em janelas mensais/estacionais e com defasagens curtas (semanas a poucos meses) entre rápido ajuste hídrico, pulso de inundação, radiação e resposta espectral da vegetação (Fearnside, 2019). Em termos práticos, o agregado anual tem boa capacidade de sinalizar “anos fora da curva” como 2023, mas tende a subestimar a força do acoplamento em períodos intra-anuais, quando o sinal climático é mais puro e menos diluído por compensações sazonais (IBAMA, 2024b).

Essa combinação de evidências, estabilidade estrutural; incrementos pontuais em usos antrópicos; tendência de NDVI positiva no longo prazo; e anomalia negativa em 2023 em sincronia com ano seco, ajuda a qualificar o funcionamento recente da paisagem na Foz da Bacia do Amazonas. Na escala de bacia, a matriz florestal e alagável se mantém dominante, em

sintonia com a lógica de áreas úmidas tropicais, em que a periodicidade de cheias e vazantes promove produtividade e confere resiliência ao sistema (ANP, 2021; Becker, 2001). Na escala local, porém, as frentes de conversão, ainda que pequenas em termos relativos, podem desempenhar papel desproporcional ao reorganizar bordas, reduzir áreas-núcleo e intensificar a exposição de ambientes úmidos a pressões difusas (Silva Filho, 2024; Gonçalves, 2024).

Do ponto de vista da coerência interna, há consonância entre o “estado” da paisagem, descrito pelo uso e cobertura, e a “dinâmica” captada por NDVI e CHIRPS. A tendência positiva do NDVI, aliada à manutenção das formações naturais, reforça a noção de um dossel maduro e funcional, capaz de atravessar oscilações interanuais sem perda estrutural significativa. Em anos de precipitação reduzida, como 2023, o NDVI registra anomalia negativa moderada, mas clara, sem indicar mudança de regime (IBAMA, 2024c; Oliveira, 2023). Isso sugere que políticas de monitoramento podem se beneficiar do acompanhamento do NDVI como indicador de risco ecológico relativo, especialmente em transições floresta–várzea e em áreas próximas a expansões antrópicas (Funk et al., 2015; MapBiomás, 2023).

Existem implicações importantes quanto à escala e à métrica. Séries anuais, embora adequadas ao escopo deste estudo, não capturam totalmente o acoplamento clima–vegetação, que em ambientes úmidos ocorre principalmente em escala mensal ou sazonal (Fearnside, 2019; AMBIENTEBRASIL, 2025). Análises com anomalias mensais padronizadas e defasagens de 0–3 meses, estratificadas por ambientes, podem revelar correlações mais fortes. Da mesma forma, pequenas mudanças em métricas de paisagem, como densidade de bordas e tamanho médio de manchas em classes antrópicas emergentes, podem alterar a conectividade de corredores ecológicos e impactar biodiversidade e serviços ecossistêmicos (IBAMA, 2023; Greenpeace Brasil, 2024).

Outra faceta relevante é a assimetria do risco ecológico em anos anômalos. Em 2023, ano mais seco, o NDVI registrou recuo detectável no agregado anual ($\sim -1,21\sigma$), mas a paisagem não apresentou alterações abruptas em uso e cobertura. Isso indica que o sistema possui estoques e mecanismos de compensação, como estrutura radicular, plasticidade fenológica e heterogeneidade microambiental, capazes de amortecer choques climáticos de curta duração (AMBIENTEBRASIL, 2025; Becker, 2001). Entretanto, a repetição de anos secos ou a combinação de seca com pressões antrópicas localizadas — como pastagens em margens ou intensificação agrícola próxima a igarapés — pode gerar efeitos cumulativos que só se tornam

evidentes ao cruzar métricas de estado (uso/cobertura), função (NDVI) e clima (CHIRPS) em janelas móveis plurianuais (Silva Filho, 2024; Gonçalves, 2024).

A análise da classe “Mangue” segue uma lógica de prudência, considerando que pequenas oscilações podem refletir tanto processos ecológicos de curto prazo — como variações de salinidade, sedimentação e inundação — quanto limitações de detecção e mistura espectral em pixels que capturam água, lama e vegetação simultaneamente (Ribeiro, 2021; Moura et al., 2016). Por isso, priorizamos padrões espaciais robustos, como estabilidade das manchas principais, conectividade com canais de maré e coerência com a morfodinâmica costeira, sugerindo, quando possível, complementação com sensores de radar, menos sensíveis a nuvens e mais aptos a discriminar estrutura em ambientes úmidos (Greenpeace Brasil, 2019; ICMBIO, 2021).

Do ponto de vista metodológico, o uso de métricas robustas de tendência (Theil–Sen) e testes não paramétricos de monotonicidade (Mann–Kendall) fortalece as inferências, especialmente em séries com *outliers*, sazonalidade ou autocorrelação (Funk et al., 2015). Ao reportar declives anuais e por década, intervalos de confiança e p-valores, e ao normalizar percentuais de uso e cobertura por ano em áreas projetadas equivalentes, a análise garante consistência numérica e transparência interpretativa (Santos, 1996; Santos, 2024).

Em síntese, a Bacia da Foz do Amazonas combina estabilidade estrutural em larga escala com sinais localizados de mudanças antrópicas e respostas climáticas detectáveis no vigor da vegetação em anos secos (Figueiredo; Zalán; Soares, 2007; Silva et al., 2019). Essa visão integrada — uso e cobertura praticamente estáveis nos núcleos naturais, NDVI com tendência positiva ao longo de duas décadas, mas declínio moderado em 2023, e precipitação suficiente para impor “testes de estresse” ao dossel — caracteriza um sistema resiliente, porém sensível, que requer monitoramento com escalas temporais mais finas e métricas complementares de estrutura de paisagem (AMBIENTEBRASIL, 2025; IBAMA, 2024a; MapBiomass, 2023).

A abordagem apresenta dupla utilidade operacional: fornece diagnóstico confiável para a gestão ambiental e estabelece uma linha de base reprodutível para avaliar futuras oscilações climáticas ou de uso com rigor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo fornece um retrato integrado e reproduzível da dinâmica recente da Bacia da Foz do Amazonas, combinando MapBiomas C9 (uso e cobertura, 2000, 2010, 2020, 2023), NDVI/MODIS anual (2001–2023) e precipitação CHIRPS (2001–2023), processados no Google Earth Engine. Foi possível avaliar a estabilidade da cobertura e a resposta do dossel às anomalias pluviométricas, mostrando que a paisagem se mantém estruturalmente estável em larga escala, enquanto mudanças antrópicas discretas se acumulam nas bordas de conversão.

A composição do uso e cobertura confirmou a predominância de formações florestais e florestas alagáveis (~98%). Entre 2000 e 2023, pastagens e lavouras temporárias cresceram +1,24 pp, representando incrementos localizados que, embora modestos, podem ampliar bordas e pressionar ambientes úmidos. Manguezais exibiram flutuações pequenas, interpretadas de forma conservadora devido a limitações de detecção em faixas estreitas.

O dossel manteve NDVI anual elevado e tendência positiva significativa (Theil–Sen = +0,00050 ano⁻¹; $\tau = 0,343$; $p = 0,0229$). No ano seco de 2023 (CHIRPS $\approx -13,5\%$ da média), observou-se anomalia negativa do NDVI ($\approx -1,21\sigma$), indicando estresse climático detectável sem ruptura estrutural. A correlação anual NDVI–precipitação foi modesta ($r \approx 0,302$, $p \approx 0,161$), compatível com respostas intra-anuais diluídas em agregados anuais.

A principal contribuição do estudo é a construção de uma linha de base replicável, integrando estado (uso e cobertura), função (NDVI) e condição (chuva), com metodologias transparentes: normalização anual, máscaras de qualidade e análise robusta de tendências. Limitações incluem detecção de manguezais com dados ópticos, pequenas variações de mosaico e subestimação de respostas ecofisiológicas curtas. Refinamentos futuros podem incluir análises mensais com defasagens de 0–3 meses, métricas de fragmentação e validação com SAR em ambientes costeiros.

Diante dos resultados, verificou-se que a Bacia da Foz do Amazonas combina estabilidade estrutural em larga escala com sinais localizados de conversão e sensibilidade climática mensurável do dossel em anos secos. Por apresentar rica biodiversidade e interesses de explorações futuras para fins petroleiros, sugere-se continuidade de estudos que descrevam seus aspectos naturais e capacidade de resiliência.

REFERÊNCIAS:

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Bacia da Foz do Amazonas: Sumário Geológico e Setores em Oferta*. Superintendência de Avaliação Geológica e Econômica – SAG, 2021.

AMBIENTEBRASIL. *Floresta Amazônica – Clima e Hidrografia*. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/amazonia/bacia_do_rio_amazonas/floresta_amazonica_-_clima_e_hidrografia.html Acesso em: 13 fev. 2025.

BARBOSA, I. C. C. da; SILVA, E. R. M. da; SILVA, H. J. F. da; COSTA, L. G. S.; VITORINO, M. I.; SOUSA, A. M. L. Avaliação da precipitação baseada em dados do CHIRPS e GPCC com medições na superfície para a sub-bacia do rio Guamá no Nordeste Paraense. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 42, p. e32, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X42094>.

BECKER, B. K. *Amazônia: geopolítica na virada do III milênio*. Rio de Janeiro: Garamond, 2001.

COSTA, J.; PEREIRA, G.; SIQUEIRA, M. E.; CARDOZO, F.; SILVA, V. V. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 24, 2021. DOI: 10.5380/abclima.v24i0.60237.

CHELALA, C. A.; CHELALA, C. M. S. C. Exploração de petróleo na Bacia Foz do Amazonas: impactos socioeconômicos e considerações ambientais. *Revista PPC – Políticas Públicas e Cidades*, Curitiba, v. 13, n. 2, p. 01-21, 2024.

DIDAN, K. *MOD13 Vegetation Indices (NDVI/EVI) User Guide (Collection 6)*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/>. Acesso em: 1 set. 2025.

ESPAÇO ECOLÓGICO. Água e sedimentos do rio Amazonas penetram milhares de quilômetros no oceano. *Espaço Ecológico*, [s.d.]. Disponível em: <https://espacoecologico.com.br/agua-e-sedimentos-do-rio-amazonas-penetram-milhares-de-quilometros-no-oceano/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

FEARNSIDE, P. M. Environmental services as a strategy for sustainable development in rural Amazonia. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.102>.

FIGUEIREDO, J. J. P.; ZALÁN, P. V.; SOARES, E. F. Bacia da Foz do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 299–309, 2007.

FONSECA, S. M. et al. Impactos da sedimentação na navegação costeira na região da Foz do Amazonas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 51, p. 113-129, 2021.

FUNK, C. et al. The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations – A New Environmental Record for Monitoring Extremes. *Scientific Data*, Londres, v. 2, p. 150066, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.

GOOGLE EARTH ENGINE. *Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone*. Mountain View, CA: Google, 2023. Disponível em: <https://earthengine.google.com/>. Acesso em: 1 set. 2025.

GREENPEACE BRASIL. *Explorar petróleo na Foz do Amazonas escancara contradição entre a decisão política e a realidade climática*. 2024. Disponível em: <https://www.greenpeace.org/brasil/imprensa/explorar-petroleo-na-foz-do-amazonas-escancara-contradicao-entre-a-decisao-politica-e-a-realidade-climatica/>. Acesso em: 3 abr. 2025.

GREENPEACE BRASIL. *Recifes da Amazônia: oásis ameaçado*. São Paulo: Greenpeace, 2019. Disponível em: <https://www.greenpeace.org/brasil/recifes-amazonia/>. Acesso em: 22 ago. 2025.

GONÇALVES, V. V. C. *Impactos socioambientais em áreas de várzea: transformações na paisagem pela perda de floresta na Amazônia Central*. 2024. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2024. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/10705>. Acesso em: 21 ago. 2025.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Foz do Amazonas: estudos ambientais apresentados são insuficientes, conclui Parecer Técnico do Ibama. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/copy_of_notas/foz-do-amazonas-estudos-ambientais-apresentados-sao-insuficientes-conclui-parecer-tecnico-do-ibama. Acesso em: 3 abr. 2025.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Ibama prevê impacto ambiental em nível máximo em exploração de petróleo na Foz do Amazonas. 2024a. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/copy_of_notas/ibama-preve-impacto-ambiental-em-nivel-maximo-em-exploracao-de-petroleo-na-foz-do-amazonas. Acesso em: 3 abr. 2025.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Ibama rejeita estudo para exploração de petróleo na Foz do Amazonas. 2024b. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/copy_of_notas/ibama-rejeita-estudo-para-exploracao-de-petroleo-na-foz-do-amazonas. Acesso em: 3 abr. 2025.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. Nota técnica sobre monitoramento climático na Margem Equatorial. 2024c.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Biomass and Coastal-Marine System of Brazil: compatible with the scale 1:250.000.* 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 16 fev. 2025.

ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. *Plano de Ação Nacional para a Conservação dos Ambientes Marinhos Amazônicos.* Brasília: ICMBio, 2021.

MAPBIOMAS. *Coleção 9.0 – Uso e Cobertura da Terra no Brasil.* 2023. Disponível em: <https://mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas>. Acesso em: 1 set. 2025.

MOURA, R. L. et al. An extensive reef system at the Amazon River mouth. *Science Advances*, v. 2, n. 4, e1501252, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501252>.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Relatório de Avaliação Ambiental da Região Norte.* Brasília: MMA, 2022.

OLIVEIRA, D. Litoral do Amapá: como é a bacia da foz do Rio Amazonas, alvo de disputa entre Ibama e Petrobras. *Portal Amazônia*, 24 maio 2023. Disponível em: <https://portalamazonia.com/meio-ambiente/litoral-do-amapa-como-e-a-bacia-da-foz-do-rio-amazonas-alvo-de-disputa-entre-ibama-e-petrobras/>. Acesso em: 13 fev. 2025.

OTAKE, Maisa Yurika Ferreira. Análise por sensoriamento remoto de áreas de açais em florestas de várzea no município de Mazagão (Amapá). Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical) – Departamento de Pós-Graduação, Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2015. Disponível em: <http://repositorio.unifap.br:80/jspui/handle/123456789/486>. Acesso em: 1 set. 2025

SANTOS, M. *A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção.* São Paulo: Hucitec, 1996.

SANTOS, S. N. *Dinâmica espaço-temporal do uso e cobertura da terra e seus reflexos sobre a qualidade da água da bacia no Rio Tarumã-Açu.* 2024. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2024. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/10571>. Acesso em: 21 ago. 2025.

SILVA, A. C. et al. O Cone do Amazonas, bacia da Foz do Amazonas: uma nova discussão. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 72, n. 1, p. 49–56, 2019. DOI: <https://www.scielo.br/j/rem/a/KWCB3nMj3Z5SrXNzS9RKfDm>. Acesso em: 13 fev. 2025.

SILVA FILHO, L. C. P. *Análise espacial do uso e cobertura do solo em áreas de preservação permanente na Bacia Hidrográfica do Rio Sororó.* 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Energias Renováveis) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2024. Disponível em: <http://bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/3520>. Acesso em: 1 set. 2025.

VELOSO, G. A.; FERREIRA, M. E.; SILVA, B. B.; SILVA, L. A. P. Por uma maior eficiência das pastagens brasileiras: análise da produtividade primária bruta com o modelo CASA-SEBAL e dados de satélite. *Caderno de Geografia*, v. 32, n. 71, p. 1149, 2022. DOI: 10.5752/P.2318-2962.2022v32n71p1149. Acesso em: 2 set. 2025.

XAVIER, P. A. A.; FORTES, M. Aplicação do índice NDVI na bacia hidrográfica dos Educandos em Manaus. *Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade*, v. 5, n. 2, p. 174-192, 2023. DOI: <https://doi.org/10.46551/rvg2675239520232174192>. Acesso em: 1 set. 2025.