

Características fisiográficas e de uso e cobertura da terra da bacia do Tapajós

Physiographic characteristics and land use and cover of the Tapajós watershed

Lorena Conceição Paiva de Ataíde¹

Francisco Carlos Lira Pessoa²

Resumo

A bacia hidrográfica desempenha papel central na gestão ambiental e territorial, pois seus componentes fisiográficos — como topografia, tipo de solo, cobertura vegetal e uso do solo — estão diretamente relacionados à biodiversidade local. A caracterização da fisiografia da bacia do Tapajós, bem como a análise do uso e cobertura da terra (LULC), foi realizada com o auxílio de sistemas de informações geográficas (SIG) e ferramentas de geoprocessamento. Observou-se uma declividade média de 303,71 metros, predominância dos solos latossolo (42,64%) e argissolo (28,86%), além de uma precipitação média anual de 2000 mm. As alterações no LULC foram principalmente impulsionadas pelo avanço da pastagem e da agricultura irrigada, resultando na perda de mais de 50% da vegetação nativa da Amazônia e do Cerrado. Esses dados indicam que o crescimento do agronegócio na bacia do Tapajós ocorre de forma insustentável.

Palavras-Chave: Dinâmica ambiental; Uso do solo; Geoprocessamento; Sensoriamento remoto.

Abstract

The hydrographic basin plays a central role in environmental and territorial management, as its physiographic components—such as topography, soil type, vegetation cover, and land use—are directly related to local biodiversity. The characterization of the physiography of the Tapajós basin, as well as the analysis of land use and land cover (LULC), was carried out with the aid of geographic information systems (GIS) and geoprocessing tools. An average slope of 303.71 meters was observed, with a predominance of latosol (42.64%) and argilosol (28.86%) soils, in addition to an average annual rainfall of 2000 mm. Changes in LULC were mainly driven by the advance of pasture and irrigated agriculture, resulting in the loss of more than 50% of the native vegetation of the Amazon and Cerrado. These data indicate that the growth of agribusiness in the Tapajós basin is unsustainable.

Keywords: Environmental dynamics; Land use; Geoprocessing; Remote sensing.

1 Discente de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará (UFPA). lorenaataide07@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2022-6798>

2 Docente da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará (UFPA). fclpessoa@ufpa.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6496-9043>

Introdução

A bacia hidrográfica se destaca como unidade territorial fundamental para o planejamento e a gestão das águas. Além disso, representa o principal cenário de interação entre os ecossistemas terrestres, englobando dinâmicas urbanas, florestais, agrícolas, fluviais, lacustres e pantanosas. A intensidade da ocorrência de cada componente é diretamente relativa as características fisiográficas da bacia: relevo, topografia, cobertura vegetal, tipo de solo, geologia, presença de áreas urbanas, atividades agropecuárias ou industriais, entre outras (KOBAYAMA et al., 2011).

Conforme Machado et al. (2018) a caracterização fisiográfica de uma bacia é o procedimento fundamental para elaboração e instalação de projetos de infraestrutura e investigação de água no solo. Para Villota (1992) trata-se de um método de interpretação de imagens da superfície terrestre, que se baseia na relação fisiografia-solo. Esse tipo de estudo fornece subsídios técnicos que permitem compreender a hidrologia da bacia, possibilitando a adoção de medidas preventivas para minimizar impactos ambientais e reduzir os riscos de desastres naturais.

Atualmente, a análise fisiográfica de bacias é realizada por meio da incorporação de informações sobre topografia, hidrografia, solos, uso e cobertura da terra, entre outros, utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG). De acordo com Kumar et al. (2011) a tecnologia SIG oferece alternativas robustas para o gerenciamento de grandes bancos de dados e a integração com o sensoriamento remoto (SR) provou ser uma ferramenta eficiente para caracterização de bacias.

O SR fornece imagens multiespectrais que permitem verificar padrões de uso da terra, bem como a detecção de mudanças ambientais ao longo do tempo. Sobre isso, Goswami et al. (2022) enfatizam que o SR desempenha um papel significativo em uma gama de aplicação, incluindo classificação da cobertura do solo, desmatamento, monitoramento de desastres, gestão de geleiras e análise da expansão urbana. Os autores complementam que compreender as ligações e interações entre fenômenos humanos e naturais e promover uma melhor tomada de decisão requer a identificação rápida e acurada das mudanças na superfície da Terra.

Segundo McDonald et al. (2016) a cobertura natural do solo nas bacias hidrográficas urbanas fornece importantes serviços ecossistêmicos. No entanto, quando ocorre a conversão da cobertura natural da terra para outros usos, como agricultura ou moradia, diminui a provisão desses serviços e o uso antropogênico aumenta a poluição. Corroborando, Silva Jr. et al. (2021) explana que a antropização altera a paisagem, a vegetação e o clima, resultando em mudanças no balanço hídrico.

Para Abbott et al. (2019) a ação antrópica afeta a bacia hidrográfica de maneiras distintas, porém inter-relacionadas: Primeiramente, os humanos apropriam-se da água através da pecuária, cultivo e uso do solo, retirando a água necessária para assimilar a poluição. Em seguida, as atividades que incluem agricultura, desmatamento e destruição de zonas úmidas causam uma perturbação em aproximadamente 3/4 da superfície terrestre livre de gelo, alterando a evapotranspiração, a recarga das águas subterrâneas, a vazão dos rios e a precipitação em escalas regionais.

Na Amazônia legal, a taxa anual de desmatamento aumentou 185% de 2012 à 2021, ano com maior índice de desflorestamento desde 2007, conforme dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2022). Esse avanço tornou-se mais expressivo a partir do segundo semestre de 2018, associado a mudanças no cenário político nacional decorrentes das eleições presidenciais, o que contribuiu para a intensificação das atividades no denominado "Arco do Desmatamento", região que engloba os estados do Acre, Rondônia, Mato Grosso, Pará e Maranhão.

Estudos apontam que a combinação entre o desmatamento e a expansão da fronteira agrícola tem gerado consequências ambientais significativas para a Amazônia (FEARNSIDE, 2006; AGUIAR et al., 2016; FARINOSI et al., 2019; CARRERO et al., 2020; SOUZA et al., 2022; SERRÃO et al., 2023). Entre os principais impactos estão o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), a fragmentação de habitats e a perda acelerada da vegetação nativa.

Localizada no centro do arco do desmatamento, a bacia hidrográfica do rio Tapajós representa uma região de alta vulnerabilidade ambiental, pois faz parte do ecótono Cerrado-Amazônia, habitat de espécies endêmicas e em risco de extinção. Além disso, a bacia enfrenta um processo de transição nas suas características fisiográficas, impulsionado por um rápido

desenvolvimento econômico, com expansão contínua de terras para agricultura e o incremento de infraestrutura para sustentá-la.

De acordo com Fearnside (2009) os impactos ambientais, econômicos, sociais e culturais, causados pelas grandes empresas na bacia do rio Tapajós, comprometem a vida humana, animal e vegetal. E ainda, afetam os recursos naturais, contaminam a água, terra, floresta, ar e destroem e violam os direitos das comunidades locais. Diante disso, compreender e quantificar os impactos decorrentes da variação no uso e cobertura da terra nas bacias hidrográficas é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão ambiental.

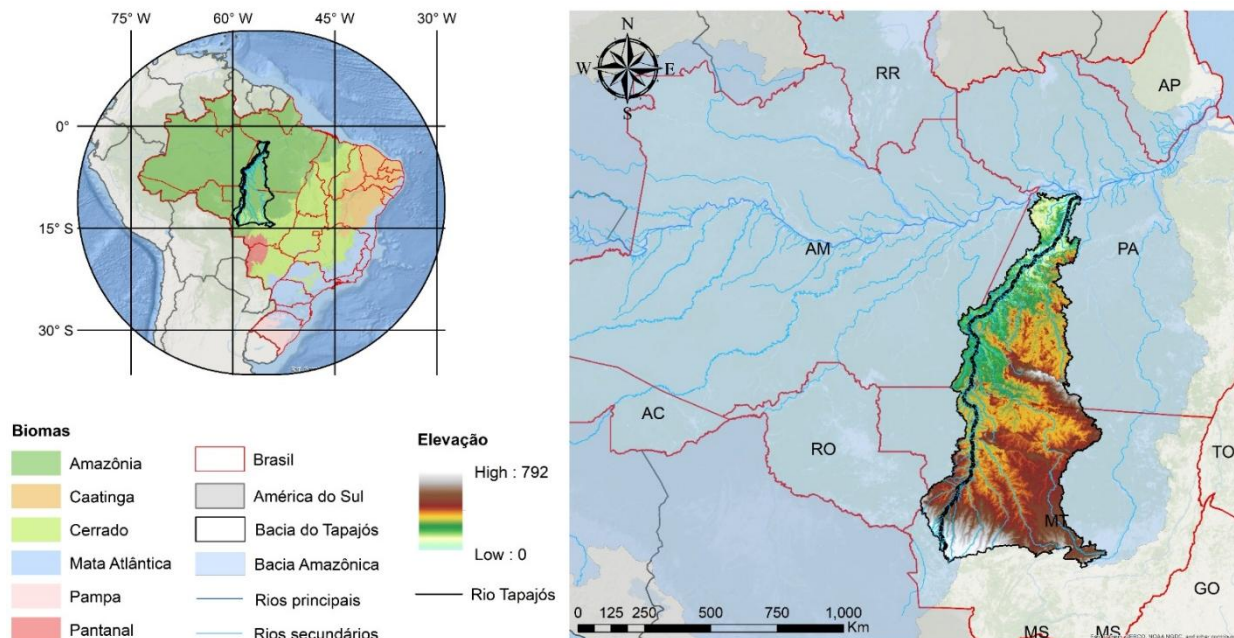
Nesse contexto, o estudo tem como objetivo avaliar as características fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Tapajós, bem como as mudanças ocorridas no uso e cobertura da terra ao longo das últimas décadas. A análise visa fornecer subsídios técnicos e científicos que contribuam para o planejamento territorial e o desenvolvimento sustentável da região. Para isso, adotar-se uma abordagem integrada, considerando os aspectos topográficos, pedológicos e climáticos da bacia, por meio da aplicação de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, gerando uma representação abrangente da sua heterogeneidade ambiental.

Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi elaborada para Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós (BHRT), um dos principais afluentes da bacia amazônica oriental (Figura 1), localizada nas coordenadas 02°11'12,11" - 14°55'14,72" Sul (Latitude) e 53°49'46,37" - 60°07'06" Oeste (Longitude). A bacia possui área de drenagem de 492.263 km² (ANA, 2012) e representa cerca de 6% do território brasileiro, abrangendo os Estados do Mato Grosso (59%), Pará (38%), Amazonas (3%) e uma pequena parte de Rondônia, constituindo-se uma bacia federal (por drenar mais de um Estado).

O Rio Tapajós nasce na fronteira do Mato Grosso com o Pará, da confluência dos rios Juruena e Teles Pires (ou São Manuel), seus principais afluentes, além dos rios Jamanxim e Crepori, e deságua à cerca de 840 km no Rio Amazonas, próximo à Cidade de Santarém, onde está situado o Distrito de Alter do Chão, um dos destinos turísticos mais procurados da região.

Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós.



Elaborado pelos autores.

De acordo com estudo produzido pelo WWF (2016) as cabeceiras dos rios Jurueña e Teles Pires estão no bioma Cerrado, já bastante alterado pela atividade antrópica, visto que a presença humana e a atividade econômica estão irreversivelmente consolidadas. Todavia, a bacia agrega uma rica diversidade de fauna e flora que representa os ecossistemas de cerrado e floresta, identificada como mundialmente significativa devido às suas diversas e raras espécies terrestres e aquáticas (TNC, 2019). Além disso, o rio Tapajós é o único dos grandes afluentes da margem direita do rio Amazonas que ainda não foi represado para produção de eletricidade em grande escala.

Metodologia

As características fisiográficas da bacia hidrográfica foram obtidas a partir da integração de mapas temáticos, imagens de satélite, bases cartográficas, camadas de informação e dados tabulares, utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e ferramentas de geoprocessamento no software ArcGIS 10.4.

Modelo Digital de Elevação

O Modelo Digital de Elevação (MDE) consiste na representação dos valores de elevação em diferentes pontos de uma área geográfica, como a topografia da Terra ou objetos nela localizados (GUTH et al., 2021). Segundo Sofia (2020), o MDE é uma reprodução numérica de uma superfície, disposta em um conjunto de grades regulares de coordenadas tridimensionais (3D). Dessa forma, a precisão e a resolução espacial refletem diretamente nos índices hidrológicos e topográficos gerados.

O MDE utilizado foi o NASADEM, um reprocessamento dos dados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) que apresenta maior precisão altimétrica e de dados de elevação, disponibilizados com resolução espacial de 1 arco-segundo (30m). Em comparação ao SRTM, o NASADEM oferece melhor desempenho devido a aprimoramentos no processamento de radar, correções de alinhamento geográfico e recalibração vertical, com o apoio de dados auxiliares do ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e do ICESat/GLAS (*Ice, Cloud, and land Elevation Satellite / Geoscience Laser Altimeter System*) (VARNIER; WEBER, 2025).

As cenas do produto NASADEM foram adquiridas por meio da plataforma Earthdata/NASA, uma plataforma que disponibiliza os dados em padrões abertos, acompanhados de metadados completos, o que assegura rastreabilidade e qualidade para aplicações em uma gama de estudos. Após o download, realizou-se o mosaico das cenas para integração das imagens e o recorte do raster final, delimitando a área da bacia do rio Tapajós. Todas as etapas de tratamento de dados foram conduzidas em ambiente SIG, garantindo a padronização espacial e a consistência cartográfica necessárias às análises subsequentes.

Tipos de Solo

A classificação e o mapeamento dos tipos de solos foram obtidos a partir do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), disponibilizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2018), referência nacional para padronização e atualização da informação pedológica. Os dados cartográficos foram acessados no formato vetorial (*Shapefile*), em escala de 1:5.000.000, com sistema de referência geodésico SIRGAS 2000.

Após a aquisição, as camadas foram integradas ao banco de dados geoespacial do estudo, por meio das ferramentas *Define Projection* e *Project*, assegurando conformidade com o sistema de referência adotado (SIRGAS 2000). Em seguida, realizou-se o recorte do *shapefile* de solos utilizando a ferramenta *Clip*, a partir do limite vetorial da bacia hidrográfica, garantindo a consistência espacial e a compatibilidade cartográfica com as demais camadas temáticas empregadas nas análises.

O mapeamento pedológico é uma etapa fundamental pois reflete como diferentes classes de solos apresentam comportamentos distintos frente aos processos hidrológicos. Segundo Tucci (2008), a ocupação acelerada das bacias hidrográficas modifica a cobertura vegetal e expõe o solo, reduzindo sua capacidade natural de infiltração e aumentando o escoamento superficial. Essas alterações impactam o balanço hídrico e o comportamento hidrossedimentológico dos sistemas fluviais, reforçando a importância da caracterização do solo no diagnóstico ambiental da área.

Precipitação

De acordo com Silva et al. (2018), a ausência de monitoramento pluviométrico é um dos principais desafios enfrentados em estudos de precipitação, dificultando o conhecimento sobre a variabilidade espaço temporal da chuva. Nesse contexto, produtos derivados de sensoriamento remoto destacam-se como alternativas para suprir essa lacuna. As estimativas de precipitação anual para o período de 1981 a 2020 foram obtidas por meio do produto CHIRPS (*Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations*), que apresenta resolução espacial de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ (5 km).

A partir da plataforma de computação em nuvem Google Earth Engine (GEE), foi calculado o volume anual acumulado de precipitação para a bacia do rio Tapajós, por meio da soma da precipitação diária pixel a pixel ao longo do período analisado. Em seguida, os resultados foram exportados como arquivo *raster*, permitindo a espacialização da precipitação climatológica na área de estudo (Figura 3). O script utilizado no processamento encontra-se disponível no GEE, através do link: <https://code.earthengine.google.com/6312e713d239e21fc8a932f8f6ad81af?noload=true>

O CHIRPS integra informações de sensores infravermelhos com dados de estações pluviométricas, proporcionando uma base consistente para estudos hidrológicos e climatológicos

devido sua cobertura temporal extensa e desempenho satisfatório em regiões tropicais. Segundo Shen et al. (2020), o CHIRPS demonstrou desempenho superior na estimativa de precipitação em comparação com outros produtos ao longo de 36 anos. Essa confiabilidade torna o CHIRPS uma ferramenta muito utilizada em modelagem de bacias e análise de eventos extremos.

Uso e Cobertura da Terra

A análise temporal das mudanças no uso e na cobertura da terra (*Land Use and Land Cover* – LULC) nos anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2024 foram analisadas com base nos dados disponibilizados pelo projeto MapBiomas, Coleção 10.0, com resolução espacial de 30 metros e geradas a partir de imagens dos satélites da série *Landsat*, processadas por meio da plataforma de computação em nuvem GEE utilizando linguagem de programação *JavaScript*.

A cartografia resultante foi elaborada em ambiente SIG, onde as classes originais do MapBiomas foram reclassificadas com o objetivo de reduzir a quantidade de categorias e, assim, obter uma tipologia mais homogênea. O MapBiomas distingue diversos usos agrícolas — como soja, cana-de-açúcar e algodão — porém, todas essas tipologias foram agrupadas na classe Agricultura.

Da mesma forma, as classes Formação Campestre, Formação Savânica e Afloramento Rochoso foram consolidadas na categoria Cerrado, visando representar de forma integrada as formações naturais predominantes no bioma. Por fim, as classes Floresta Alagável, Áreas Alagadas e Corpos d'Água foram agrupadas na classe Área Pantanosa, dada sua relação funcional com ambientes inundáveis e sazonalmente úmidos.

Essa estratégia de reagrupamento segue a abordagem proposta por Overbeck et al. (2022), que enfatiza a organização das formações naturais do Cerrado a partir de tipologias amplas e ecologicamente coerentes, facilitando sua interpretação em estudos regionais. É importante destacar que a cobertura da terra se refere às características da superfície da Terra (MARTINEZ e MOLLICONE, 2012). Por outro lado, o uso da terra está relacionado às interações humanas realizadas sobre essa superfície, como agricultura, pastagem, áreas urbanas e outras formas de manejo e ocupação do solo (PATEL et al., 2019).

Estatística não Paramétrica

A utilização de estatística não paramétrica é fundamental em estudos ambientais, pois as séries temporais raramente constituem uma distribuição normal, podendo incluir tendência, autocorrelação e valores extremos. Dessa forma, os testes tornam-se adequados, uma vez que não dependem de pressupostos rígidos e são menos sensíveis a outliers, conferindo maior robustez às análises. Essa abordagem permite identificar tendências significativas de longo prazo, mesmo em séries com variações naturais elevadas, como é típico em bacias hidrográficas da região amazônica.

Primeiramente, foi computado o teste de Mann-Kendall, um método robusto e sequencial utilizado para determinar se a série de dados possui uma tendência temporal de alteração estatisticamente significativa. O método baseia-se em rejeitar ou não a hipótese nula (H_0), adotando-se um nível de significância (α), igual a 5% (Equação 1).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

Em que: n : número de dados, x_i e x_j : valores da sequência i e j ($j > i$); e $\text{sgn}(x_j - x_i)$ dada por:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \{+1, \text{se } x_j - x_i > 0\}$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \{0, \text{se } x_j - x_i = 0\}$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \{-1, \text{se } x_j - x_i < 0\}$$

Mann (1945) e Kendall (1975) explicitam que a estatística S segue aproximadamente uma distribuição normal para $n \geq 8$ para dados sem elementos vinculados (Equação 2).

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (2)$$

Em que: q : n° de grupos contendo valores iguais; e t_p : n° de dados com valores iguais no grupo p .

Se não houver valores iguais, a variância da estatística S é simplificada (Equação 3).

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

Quando $n > 10$, o valor de S se aproxima de uma distribuição normal, permitindo o uso do teste Z , onde valores positivos indicam tendência crescente e negativos, tendências decrescentes:

$$Z = \frac{S - 1}{\sqrt{Var(S)}}, \text{ se } S > 0$$

$$Z = 0, \text{ se } S = 0$$

$$Z = \frac{S + 1}{\sqrt{Var(S)}}, \text{ se } S < 0$$

O teste de Mann-Kendall não fornece a magnitude, sendo complementado pelo estimador de declive de Sen (1968) (Equação 4). Este é mais robusto do que a regressão linear, pois reduz o efeito dos outliers, mesmo para dados normalmente distribuídos (WELDEGERIMA et al., 2018).

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (4)$$

Em que: β : representa a mediana dos valores de inclinação entre x_i e x_j no tempo i e j , sendo ($i < j$).

O teste de Pettitt (1979) identifica o ponto de descontinuidade da série (Equação 5).

$$U_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

Sendo $\text{sgn}(x_j - x_i)$ a função sinal, definida por:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = 1, \text{ se } x_j > x_i$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = 0, \text{ se } x_j = x_i$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = -1, \text{ se } x_j < x_i$$

A estatística k (Equação 6) é definida como o máximo valor absoluto de U_t , representando o ponto de ruptura na série.

$$k = \max_{1 \leq t < n} |U_t| \quad (6)$$

A significância estatística da ruptura (Equação 7), fornece uma aproximação para o valor-p associada à estatística k:

$$p \cong 2 \exp \left\{ \frac{-6k^2}{T^3 + T^2} \right\} \quad (7)$$

Em uma hipótese nula, o teste assume que não há ponto de mudança e a hipótese alternativa considera uma data em que há uma mudança nos dados. Se o valor de p for menor que o nível de significância de 0,05, a hipótese nula é rejeitada para aceitar a alternativa (TEKLEAB et al., 2013).

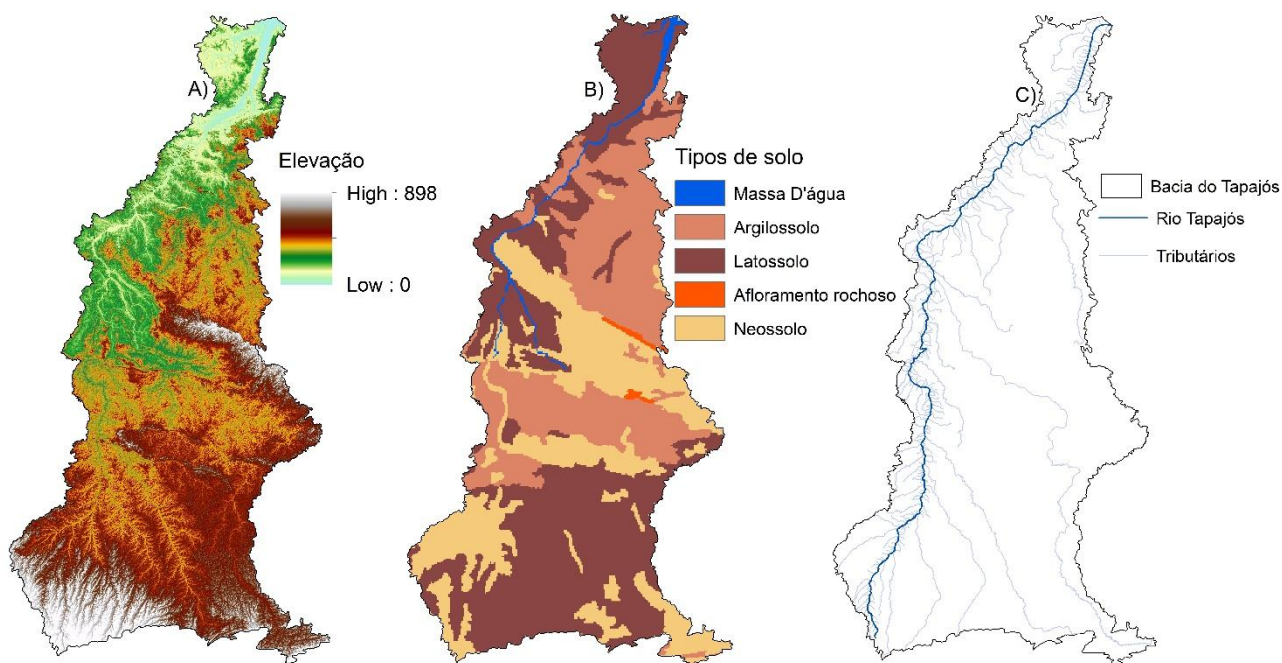
Resultados e discussões

A partir do MDE (Figura 2 - A), foi possível identificar uma variação topográfica significativa na BHRT, com altitudes que variam de 0 a 898 m e elevação média de 303,71 m, permitindo compreender como o relevo condiciona a dinâmica hidrológica da bacia frente às propriedades dos solos ao regime de chuvas: áreas mais inclinadas favorecem maior velocidade de escoamento superficial e maior suscetibilidade à erosão, enquanto regiões de relevo suavizado apresentam maior potencial de infiltração e retenção hídrica.

Segundo Scoles (2016), o rio Tapajós configura-se como uma ampla planície aluvial, com margens arenosas, ladeadas por um planalto rebaixado com cotas altimétricas em torno de 100 m. Destaca-se, no centro da bacia, uma zona de elevações mais acentuadas que indicam uma transição brusca de relevo, caracterizada pela presença de corredeiras e cachoeiras que dificultam ou até mesmo impossibilitam a navegação.

Com base nesses dados, é possível realizar o particionamento da bacia em sub-bacias hidrográficas, baseadas nos principais tributários (Figura 2 - C), facilitando o planejamento de ações locais de conservação. Conforme apontam Kobiyama et al. (2011), a aplicação do MDE permite avaliar o comportamento da bacia frente a diferentes cenários e eventos extremos, sendo essencial para o desenvolvimento de estratégias de conservação e controle de impactos ambientais.

Figura 2 - A) Modelo Digital de Elevação; B) Classificação dos tipos de solo; C) Rede de drenagem.



Elaborado pelos autores.

A rede de drenagem (Figura 2-C), derivada do gradiente altimétrico, evidencia o fluxo predominante do Sul para o norte e a forte dependência dos principais tributários — especialmente o rio Teles Pires, o qual apresenta elevada antropização. Essa configuração hidrográfica reforça a importância da BHRT como um corredor hídrico estratégico da Amazônia, cuja integridade influencia diretamente o regime de vazões, o transporte de sedimentos e os ecossistemas associados.

O posicionamento assimétrico do rio Tapajós dentro da bacia e seu formato alongado indicam maior tempo de concentração e menor propensão a cheias abruptas. Entretanto, a implantação de grandes empreendimentos, como o Complexo Tapajós, tende a alterar esse equilíbrio, modificando padrões de vazão, conectividade fluvial e processos geomorfológicos, sobretudo aqueles relacionados à estabilidade das margens, dinâmica de sedimentos e evolução do leito. Essa análise reforça a relevância da caracterização fisiográfica, que fornece uma base técnica indispensável para avaliar futuras mudanças hidrológicas e seus efeitos socioambientais.

A distribuição espacial dos solos (Figura 2-B) demonstra a predominância de Latossolos (42,64%), seguidos por Argissolos (28,86%) e Neossolos (26,74%). Também foram classificadas áreas de Massa d'água (1,30%), correspondentes aos corpos hídricos, e Afloramento Rochoso (0,46%), associado às regiões de alto relevo, indicado pelo MDE. Essa condição edáfica influencia a ocupação do território: áreas de Latossolos e Argissolos são frequentemente alvo de expansão agropecuária, enquanto Neossolos, mais rasos e suscetíveis à erosão, degradam-se rapidamente quando convertidos para uso antrópico. Assim, a própria configuração dos solos condiciona os padrões de uso da terra observados na bacia, ao mesmo tempo em que sofre impactos dessa ocupação.

Os Latossolos, encontrados nos topos de planaltos e áreas de várzea, são muito profundos, porosos, bem drenados e apresentam textura média a muito argilosa. Possuem alta biomassa, favorecendo a ciclagem de nutrientes e a presença de espécies como sumaúma, açacu, andiroba e copaíba (PEREIRA-FILHO et al., 2024; SCOLES, 2016). Enquanto que os Argissolos, predominantes na porção norte da bacia, apresentam perfis profundos e bem desenvolvidos, classificados como distróficos. Segundo Gama et al. (2020), suas limitações ao uso agropecuário, como acidez elevada e baixa fertilidade, podem ser superadas com o uso adequado de corretivos e fertilizantes.

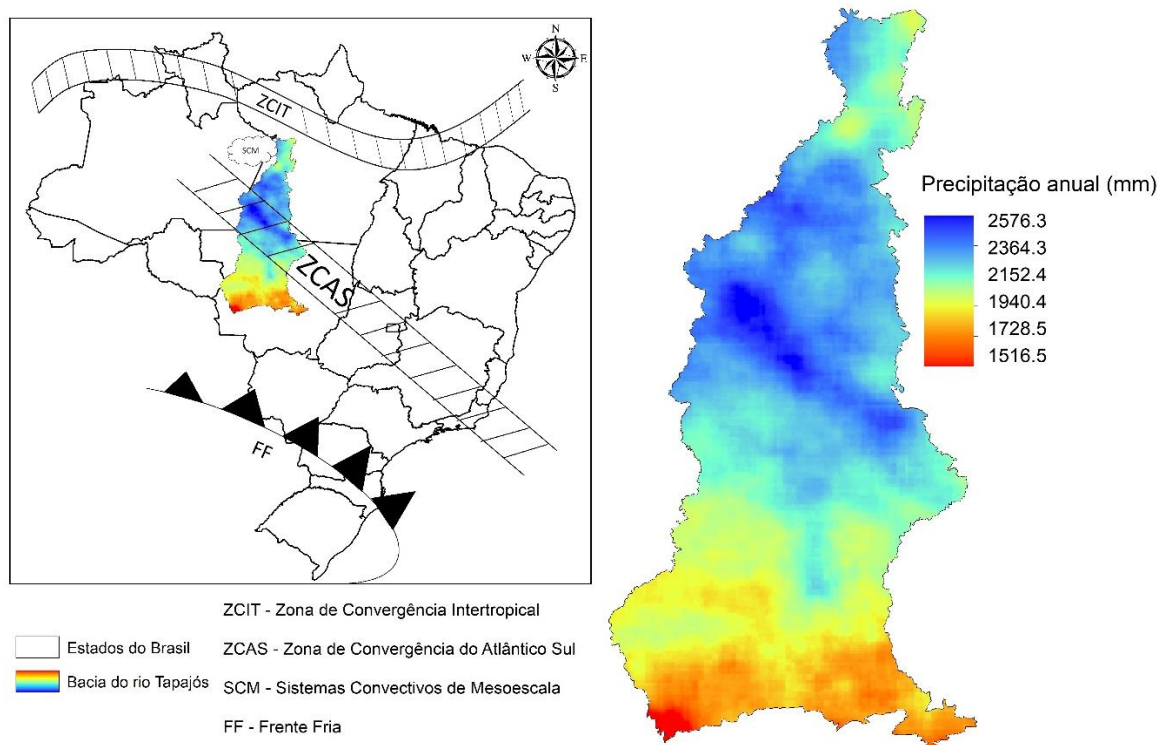
Já o Neossolo é pouco evoluído, está associado às áreas de planície, parcialmente concordantes com a presença de marcas do cerrado. Apresenta textura de areia grossa e fina em todos os horizontes, além de 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala (EMBRAPA, 2018). Devido à sua alta suscetibilidade à erosão, seu uso deve ser restrito nas proximidades de cursos d'água, em função do risco de assoreamento (GAMA et al., 2020).

A interação entre os tipos de solo e precipitação revelam o potencial de recarga hídrica da BHRT, visto que, durante a estação chuvosa, solos mais profundos e porosos tendem a amortecer o impacto das chuvas, favorecendo a infiltração. Em contraste, áreas dominadas por Argissolos e Neossolos apresentam resposta mais sensível, com maior propensão ao escoamento superficial, à erosão e ao transporte de sedimentos.

A variabilidade da distribuição espacial da precipitação na BHRT (Figura 3) é atribuída à sua ampla extensão territorial e à heterogeneidade de uso e cobertura da terra. Adicionalmente, a

sazonalidade pluviométrica é fortemente influenciada pela atuação de diferentes sistemas atmosféricos, tais como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Frentes Frias (FF) e Sistemas Convectivos De Mesoescala (SCM).

Figura 3 - Espacialização da precipitação anual climatológica na bacia hidrográfica do rio Tapajós.



Elaborado pelos autores.

A média anual de precipitação é de 2.000 mm, enquanto que a precipitação máxima é de aproximadamente 2.600 mm/ano, acumulada no centro da bacia, onde ainda predomina uma significativa cobertura vegetal. Já os menores índices pluviométricos, em torno de 1.500 mm/ano, ocorrem no setor sul da bacia, área caracterizada pela extensiva presença do agronegócio. Resultados semelhantes foram reportados por Santos et al. (2015), cujos dados indicam variações entre 1.474 mm e 2.512 mm anuais, sendo as menores médias observadas na região sul da bacia.

Dessa forma, a BHRT apresenta dois regimes pluviométricos distintos: no centro-sul (MT), predominam menores índices de precipitação associados ao clima Aw (clima quente de monção),

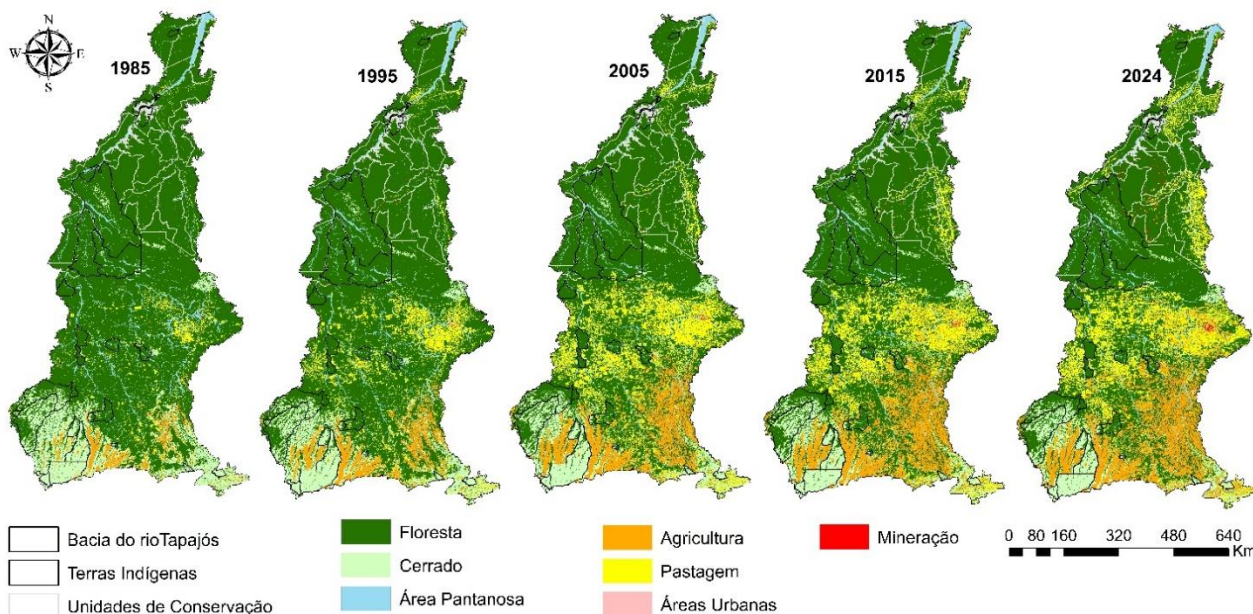
enquanto o centro-norte (PA) registra volumes mais elevados, característicos do clima Am (clima quente sem estação seca). Essa distinção também foi identificada por Lira (2019), que agrupou a região em áreas homogêneas com amplitudes de de 1.000 mm no Mato Grosso e 3.000 mm no Pará.

Os elevados índices de precipitação no setor norte resultam de um centro de convecção quase permanente e da intensa reciclagem de umidade por evapotranspiração local (MARENGO; HASTENRATH, 1993). Além disso, brisas marinhas, linhas de instabilidade e circulações de mesoescala contribuem para a formação de chuvas (NOBRE et al., 2009), enquanto as condições do Atlântico modulam a posição da ZCIT e o transporte de umidade para a região (LIMBERG; SILVA, 2016). A atuação da ZCAS também exerce influência sazonal, formando uma faixa persistente de nebulosidade que atravessa o Brasil central e alcança o sul da Amazônia.

A distribuição espacial da chuva também pode sofrer variações em decorrência das pressões exercidas pelas atividades humanas, pois a mudança no uso e cobertura da terra altera o balanço de energia, a evapotranspiração e, conseqüentemente, o ciclo hidrológico regional. Deste modo, a transição da cobertura vegetal na BHRT é marcada pela substituição progressiva da floresta amazônica por usos antrópicos entre 1985 e 2024 (Figura 4). Essas transformações repercutem diretamente na conservação dos recursos hídricos do Tapajós, bacia que desempenha papel estratégico para geração hidrelétrica, conservação da biodiversidade e manutenção dos modos de vida tradicionais. A intensificação do uso agropecuário sem manejo adequado pode comprometer processos hidrológicos essenciais, especialmente em sub-bacias mais sensíveis à alteração do solo.

As mudanças LULC são mais expressivas no sul do Pará e norte do Mato Grosso, região do Arco do Desmatamento, que contorna a borda sudeste da floresta amazônica. Segundo o ICV (2023), o avanço do desmatamento na bacia do Tapajós tem sido impulsionado por atividades legais e ilegais de extração de recursos naturais e expansão da agropecuária. Grandes projetos, como a Ferrogrão, associados à ocupação desordenada ao longo das BR-163 e BR-230, aumentam a fragmentação da paisagem e ampliam as pressões sobre os sistemas hidrológicos e ecológicos da bacia.

Figura 4 – Evolução do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Tapajós.



Elaborado pelos autores.

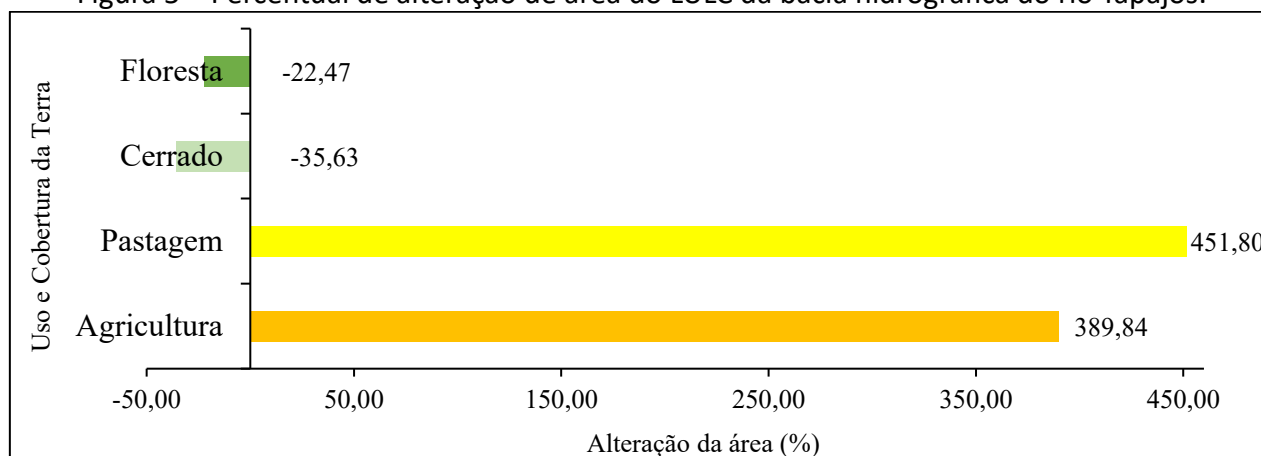
Em 1985, a floresta nativa e o Cerrado ocupavam 76,87% e 10,49% da BHRT, respectivamente, configurando uma paisagem ainda amplamente preservada. Nas décadas seguintes, a expansão de atividades agropecuárias promoveu a redução contínua desses biomas — que passaram para 72% e 10% em 1995, e para 64% e 8% em 2005, processo inserido em um contexto histórico de disputas fundiárias na Amazônia, envolvendo conflitos entre indígenas, grileiros, garimpeiros e posseiros (IPEA, 2022).

Em 2024, esses valores caem para 59,60% e 7,69%, evidenciando perdas superiores a 50% ao longo da série histórica. Paralelamente, agricultura e pastagem, que representavam 2,60% e 2,69% da área em 1985, aumentaram para 12,74% e 14,85% em 2024, respectivamente, demonstrando a intensificação da conversão antrópica e seus impactos sobre a dinâmica ambiental da BHRT.

Esses aumentos evidenciam a intensificação das atividades agropecuárias na bacia e a pressão crescente sobre as áreas de vegetação nativa (Figura 5), demonstrando o papel dominante do setor agropecuário na transformação da paisagem regional. Estudos recentes alertam para o risco

de “savanização” da floresta amazônica, resultado da intensificação do desmatamento e das mudanças no uso da terra, podendo comprometer a segurança alimentar das populações indígenas e tradicionais, e a produtividade agropecuária regional (International Rivers, 2022).

Figura 5 – Percentual de alteração de área do LULC da bacia hidrográfica do rio Tapajós.

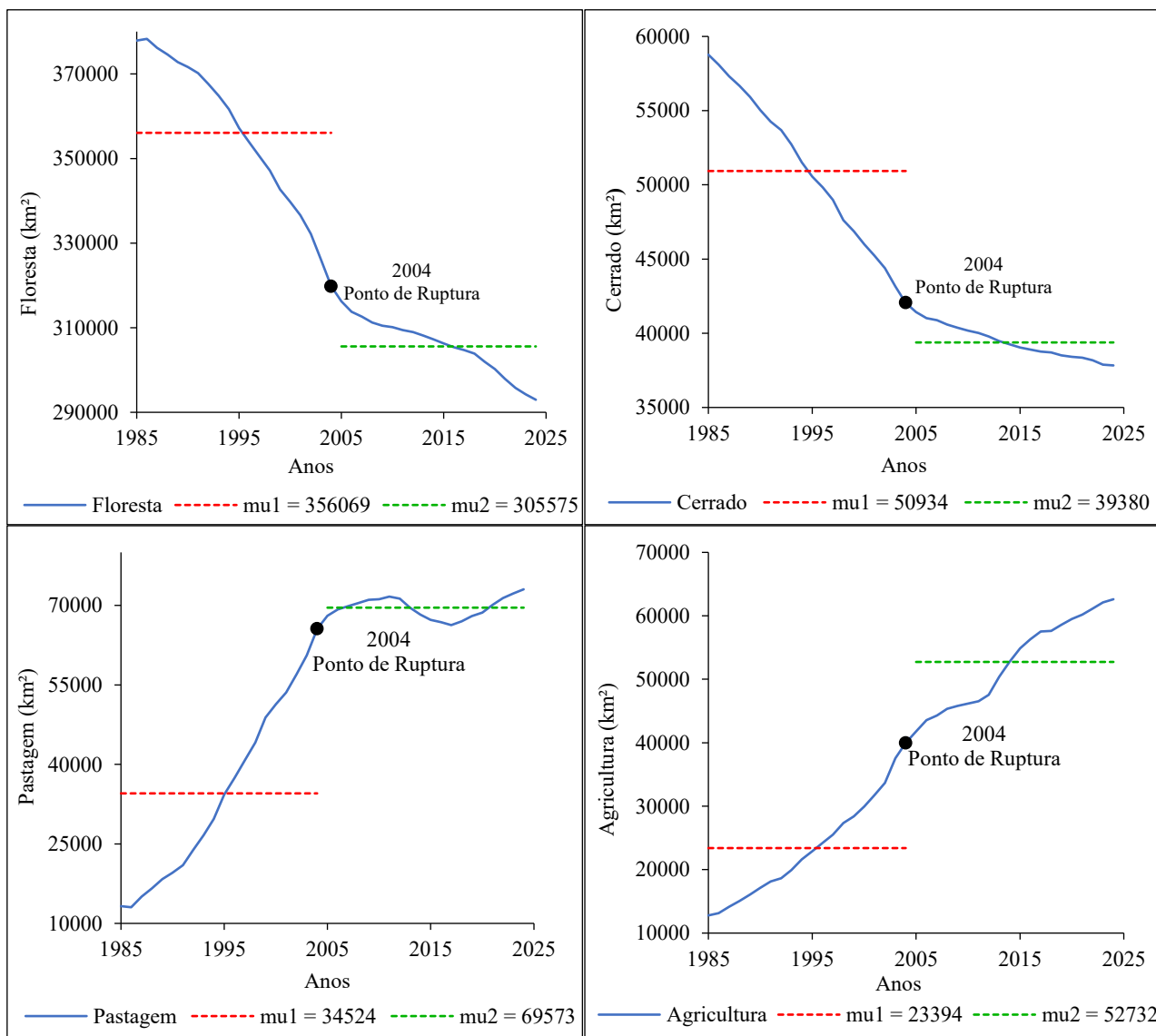


Elaborado pelos autores.

Tais tendências indicam transformações estruturais no território, e não variações pontuais, evidenciando a crescente pressão antrópica sobre a bacia. Borges et al. (2022) apontam que cerca de 60% do Planalto do Tapajós já foi convertido em pastagens e culturas anuais, corroborando resultados de Oliveira et al. (2016), que registraram a expansão da pastagem em mais de 976 mil hectares para pecuária extensiva. Rivero (2009) reforça esse padrão ao demonstrar forte correlação ($r = 0,73$) entre o avanço da pecuária bovina e o desmatamento nos municípios amazônicos.

Frente ao ritmo acelerado das mudanças no LULC, tornam-se indispensáveis políticas de ordenamento territorial, certificação da produção e fortalecimento do monitoramento ambiental. Nesse contexto, a aplicação do teste de Mann-Kendall ganha relevância ao permitir a detecção estatística de tendências consistentes na expansão agrícola, redução de vegetação nativa e intensificação de áreas antrópicas. Assim, a análise não paramétrica fornece suporte técnico para compreender a evolução do uso da terra e identificar possíveis pontos de ruptura nos padrões observados (Figura 6).

Figura 6 - Testes não paramétricos para os LULC da bacia hidrográfica do rio Tapajós.



Elaborado pelos autores.

Os resultados do teste de Pettitt, que identificaram um ponto de ruptura significativo em 2004 ($K = 400$; $p < 0,0001$), indicam que esse ano marca uma mudança estrutural no comportamento das séries de uso da terra. Em termos ambientais, essa ruptura coincide com o início de um período em que as condições físicas e socioeconômicas da BHRT se alinharam para favorecer a intensificação da conversão das áreas naturais. Nessa época, a combinação entre solos férteis (Latosolos e

Argissolos) e relevo suavemente ondulado, conforme observado no MDE, aumentou a atratividade da região para agricultura mecanizada, contribuindo para a mudança expressiva detectada pelo teste.

Da mesma forma, os resultados do teste de Mann-Kendall revelam tendências estatisticamente significativas que reforçam o diagnóstico ambiental. Os valores positivos de S para pastagem ($S = 612$) e agricultura ($S = 780$) apontam para um crescimento contínuo dessas classes ao longo da série, com inclinações de Sen superiores a $1.400 \text{ km}^2/\text{ano}$.

Em contrapartida, os valores negativos de S para floresta ($S = -778$) e cerrado ($S = -780$), com perdas anuais expressivas — $-2.368 \text{ km}^2/\text{ano}$ e $-557,7 \text{ km}^2/\text{ano}$, respectivamente — indicam um processo acelerado de substituição da cobertura natural por classes antrópicas. Esse declínio está alinhado à dinâmica pluviométrica regional, marcada por chuvas abundantes, mas também por uma estação seca mais bem definida após os anos 2000, favorecendo o cultivo de espécies adaptadas ao regime sazonal de chuvas.

Assim, a tendência estatística detectada denota o aumento do escoamento superficial e do aporte de sedimentos aos cursos d'água, fenômenos que se intensificam com o avanço das áreas abertas. A perda da cobertura vegetal reduz a infiltração e a proteção do solo, o que aumenta ainda mais o impacto da erosão – retroalimentando a degradação nas áreas convertidas, exatamente como sugerem os declínios detectados pelo Mann-Kendall.

Em conjunto, os testes estatísticos não apenas confirmam a existência de mudanças abruptas e tendências persistentes, mas também demonstram que essas mudanças são coerentes com os fatores físicos (solo e relevo), climáticos (chuva) e econômicos que moldam o uso da terra na BHRT. A interpretação conjunta evidencia que o período pós-2004 representa uma fase de transformação acelerada, na qual a pressão antrópica sobre os remanescentes naturais se intensificou e alterou profundamente os processos ambientais da bacia.

Considerações finais

As características fisiográficas da bacia hidrográfica do Tapajós evidenciam sua marcante heterogeneidade, com altitudes que variam de 900 metros, nas nascentes, até níveis próximos ao

mar na foz, em Santarém. A cobertura pedológica é dominada por Latossolos e Argissolos, ambos com elevada capacidade de infiltração e fertilidade natural, favorecendo atividades agropecuárias.

O regime pluviométrico apresenta forte gradiente espacial, com volumes anuais superiores a 2.600 mm ao norte e cerca de 1.500 mm ao sul da bacia, refletindo a transição entre climas úmido e seco. Essa disponibilidade hídrica sustenta múltiplos serviços, como abastecimento, navegação, geração de energia, pesca, lazer e manutenção da biodiversidade.

Entretanto, a expansão acelerada do agronegócio tem intensificado os processos de desmatamento, especialmente sobre os biomas Amazônia e Cerrado, resultando em degradação ambiental, aumento da frequência de eventos extremos e riscos à qualidade dos solos, da atmosfera e dos recursos hídricos.

Referências

ABBOTT, B. W.; BISHOP, K.; ZARNETSKE, J. P. et al. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. **Nature Geoscience**, v. 12, p. 533–540, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0374-y>

AGUIAR, A. P. D.; VIEIRA, I. C. G.; ASSIS, T. O.; DALLA-NORA, E. L.; TOLEDO, P. M.; OLIVEIRA SANTOS-JUNIOR, R. A.; et al. Land use change emission scenarios: anticipating a forest transition process in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 22, p. 1821–1840, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13134>

ANA – Agência Nacional de Águas. Plano estratégico de recursos hídricos dos afluentes da margem direita do rio Amazonas: resumo executivo. Brasília (DF), 2012. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/arquivos/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2013/planoEstrategicoDeRecursos.pdf>. Acesso em: 15 jun. 25.

BORGES, G. A.; MANCILLA, G.; SIQUEIRA, A. B.; VANCINE, M. H.; RIBEIRO, M. C.; MAIA, J. C. de S. The fate of vegetation remnants in the southern Amazon's largest threatened hotspot: part (I) a 33-year analysis of LULCC in the Tapajos River basin, Brazil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i10.32553>.

CARRERO, G. C.; FEARNSIDE, P. M.; VALLE, D. R. do; et al. Deforestation trajectories on a development frontier in the Brazilian Amazon: 35 years of settlement colonization, policy and economic shifts, and land accumulation. **Environmental Management**, v. 66, p. 966–984, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01354-w>.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação dos solos. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 355 f. Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>.

Acesso em: 15 jun. 2025.

FARINOSI, F.; ARIAS, M. E.; LEE, E.; LONGO, M.; PEREIRA, F. F.; LIVINO, A.; et al. Future climate and land use change impacts on river flows in the Tapajós Basin in the Brazilian Amazon. **Earth's Future**, v. 7, p. 993–1017, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019EF001198>.

FEARNSIDE, P. M. Cartilha Tapajós Vivo para sempre: água para vida e não para a morte. 2009. Disponível em: http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Dossie/Tap/Outros%20documentos/CARTILHA%20TAPAJOS%20VIVO.pdf. Acesso em: 15 jun. 2025.

GAMA, J. R. N. F.; VALENTE, M. A.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; CRAVO, M. S.; CARVALHO, E. J. M.; RODRIGUES, T. E. Solos do estado do Pará. In: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIEGAS, I. J. M. (Ed.). Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020.

GOSWAMI, A.; SHARMA, D.; MATHUKU, H.; GANGADHARAN, S. M. P.; YADAV, C. S.; SAHU, S. K.; PRADHAN, M. K.; SINGH, J.; IMRAN, H. Change detection in remote sensing image data comparing algebraic and machine learning methods. **Electronics**, v. 11, n. 3, p. 431, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11030431>.

GUTH, P. L.; VAN NIEKERK, A.; GROHMANN, C. H.; MULLER, J.-P.; HAWKER, L.; FLORINSKY, I. V.; GESCH, D.; REUTER, H. I.; HERRERA-CRUZ, V.; RIAZANOFF, S.; et al. Digital elevation models: terminology and definitions. **Remote Sensing**, Basel, v. 13, n. 18, p. 3581, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13183581>.

ICV - Instituto Centro de Vida. Mapeamento sociocultural, econômico e ambiental do Tapajós. World Wide Fund for Nature/World Wildlife Fund (WWF), 2023. Disponível em: <https://www.icv.org.br/website/wp-content/uploads/2023/03/mapeamento-sociocultural-w5104258-alt12-web.pdf>. Acesso em: 18 de jun. de 2025.

IMAZON - Instituto do Homem e Meio Ambiente Da Amazônia. Pecuária na Amazônia: tendências e implicações para conservação ambiental. 2015. Disponível em: <https://imazon.org.br/pecuaria-na-amazonia-tendencias-e-implicacoes-para-a-conservacao-ambiental/>. Acesso em: 18 de jun. de 2025.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Projeto PRODES – Monitoramento do desmatamento na Amazônia Legal por satélite. São José dos Campos, SP, 2022. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 15 jun. 2025.

International Rivers. Tapajós sob o sol - mergulho nas características ecológicas, socioculturais e econômicas da bacia hidrográfica. 2022. Disponível em: <https://www.internationalrivers.org/wp-content/uploads/sites/86/2022/02/TAPAJÓS-SOB-O-SOL.pdf>. Acesso em: 18 de jun. de 2025.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Agricultura e diversidades: trajetórias, desafios regionais e políticas públicas no Brasil. Organização: Gesmar Rosa dos Santos e Rodrigo Peixoto da Silva. Rio de Janeiro: IPEA, 2022.

KENDALL, M. G. Rank correlation methods. London: Charles Griffin, 1975.

KOBIYAMA, M.; GRISON, F.; MOTA, A. A. Curso de capacitação em hidrologia e hidrometria para conservação de mananciais. 3. ed. Florianópolis (SC): UFSC/CTC/ENS/LabHidro, 2011.

KUMAR, D.; DHALOIYA, A.; NAIN, A. S.; SHARMA, M. P.; SINGH, A. Prioritization of watershed using remote sensing and geographic information system. **Sustainability**, v. 13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13169456>.

LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 20, n. 3, p. 657-675, 2016.

LIRA, B. R. P. **Avaliação do comportamento e da tendência pluviométrica na Amazônia Legal no período de 1986 a 2015**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

MACHADO, L. N.; LOSS, A.; BACIC, I. L.; DORTZBACH, D.; CAMPOS LALANE, H. de. Characterization and mapping of soil classes of the Lajeado Pessegueiro watershed in Santa Catarina, Brazil. **Acta Agronômica**, v. 67, n. 2, p. 289-296, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15446/acag.v67n2.66131>.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica**, v. 13, p. 245-259, 1945.

MARENGO, J. A.; HASTENRATH, S. Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin. **Journal of Climate**, v. 6, p. 617-627, 1993.

MARTINEZ, S.; MOLLICONE, D. From land cover to land use: a methodology to assess land use from remote sensing data. **Remote Sensing**, v. 4, p. 1024-1045, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs4041024>.

MCDONALD, R. I.; WEBER, K. F.; PADOWSKI, J.; BOUCHER, T.; SHEMIE, D. Estimating watershed degradation over the last century and its impact on water-treatment costs for the world's large cities. **PNAS**, v. 113, n. 32, p. 9117-9122, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.160535411>.

NOBRE, C. A.; OBREGÓN, G. O.; MARENGO, J. A.; FU, R.; POVEDA, G. Characteristics of Amazonian climate: main features. **Geophysical Monograph Series**, v. 186, p. 149-162, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008GM000720>.

OLIVEIRA, R. R. S.; VENTURIERI, A.; SAMPAIO, S. M. N.; LIMA, A. M. M.; ROCHA, E. J. P. Dinâmica de uso e cobertura da terra das regiões de integração do Araguaia e Tapajós/PA, para os anos de 2008 e 2010. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68/7, p. 1411-1424, Rio de Janeiro, jul./ago. 2016.

- OVERBECK, G. E.; VÉLEZ-MARTIN, E.; MENEZES, L. S.; ANAND, M.; BAEZA, S.; CARLUCCI, M. B.; DECHOUM, M. S.; DURIGAN, G.; FIDELIS, A.; GUIDO, A.; MORO, M. F.; MUNHOZ, C. B. R.; REGINATO, M.; RODRIGUES, R. S.; ROSENFELD, M. F.; SAMPAIO, A. B.; SILVA, F. H. B.; SILVEIRA, F. A. O.; SOSINSKI JR., Ê. E.; STAUDE, I. R.; MÜLLER, S. C. Placing Brazil's grasslands and savannas on the map of science and conservation. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 56, p. 125687, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2022.125687>
- PATEL, S. K.; VERMA, P.; SINGH, S. G. Agricultural growth and land use land cover change in peri-urban India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7736-1>.
- PEREIRA-FILHO, J.; KATO, E.; SILVA, R. A. B.; LIMA, F. S.; OLIVEIRA, P. F. Litter stock and nutrients under different restoration methods in the Eastern Amazon. **Peer Review**, v. 6, n. 3, p. 1–15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.53660/PRW-1804-3429>.
- PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2346729>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- RIVERO, S.; ALMEIDA, O.; ÁVILA, S.; OLIVEIRA, W. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia. **Nova Economia**, v. 19, n. 1, p. 41-66, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-63512009000100003>.
- SANTOS, C. A.; ARAÚJO, I. B.; WANZELER, R. T. S.; SERRÃO, E. A. O.; FARIAS, M. H. C. S.; LIMA, A. M. M. Regionalização hidroclimatológica da bacia hidrográfica do rio Tapajós. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 9, n. 1, 2015.
- SCOLES, R. Características biogeográficas da bacia do Tapajós. In: ALARCON, D. F.; MILLINKAN, B.; TORRES, M. (Orgs.). *Ocekad: hidrelétricas, conflitos socioambientais e resistência na Bacia do Tapajós*. Brasília, DF: International Rivers Brasil; Santarém, PA: Programa de Antropologia e Arqueologia da Universidade Federal do Oeste do Pará, p. 29-42, 2016.
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, p. 1379-1389, 1968. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>.
- SERRÃO, E. A. O.; SILVA, M. T.; FERREIRA, T. R.; XAVIER, A. C. F.; SANTOS, C. A.; ATAIDE, L. C. P.; PONTES, P. R. M.; SILVA, V. P. R. Climate and land use change: future impacts on hydropower and revenue for the Amazon. **Journal of Cleaner Production**, v. 385, p. 135700, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135700>.
- SHEN, Z.; YONG, B.; GOURLEY, J. J.; QI, W.; LU, D.; LIU, J.; REN, L.; HONG, Y.; ZHANG, J. Recent global performance of the Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP) with Stations (CHIRPS). **Journal of Hydrology**, v. 591, p. 125284, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125284>.
- SILVA JÚNIOR, R. O.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; SALOMÃO, G. N.; TAVARES, A. L.; SANTOS, J. F.; SANTOS, D. C.; DIAS, L. C.; SILVA, M. S.; MELO, A. M. Q.; COSTA, C. E. A.; ROCHA, E. J. P. Response of water

balance components to changes in soil use and vegetation cover over three decades in the Eastern Amazon. **Frontiers in Water**, v. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.749507>.

SILVA, M. N. A.; PESSOA, F. C. L.; SILVEIRA, R. N. P. O.; ROCHA, G. S.; MESQUITA, D. A. Determinação da homogeneidade e tendência das precipitações na bacia hidrográfica do rio Tapajós. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 4, p. 665-675, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786334008>.

SOFIA, G. Combining geomorphometry, feature extraction techniques and Earth-surface processes research: The way forward. **Geomorphology**, v. 355, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107055>.

SOUZA, G. C. P. de; MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. Impactos econômicos e ambientais de uma política de desmatamento zero e reflorestamento na região do arco do desmatamento. In: *Prêmio BNDES pelo Clima*. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, p. 65–117, 2022.

TEKLEAB, S.; MOHAMED, Y.; UHLENBROOK, S. Hydro-climatic trends in the Abay/Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Journal of Physics and Chemistry of the Earth**, v. 61, p. 32–42, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.04.017>.

TNC – The Nature Conservancy. Conservação da Bacia do Tapajós: uma visão de sustentabilidade. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.tnc.org.br/content/dam/tnc/nature/en/documents/brasil/conservacaobaciatapajos-metodologia.pdf>. Acesso em: 15 jun. 25

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

VARNIER, M.; WEBER, E. J. Variáveis espaciais e modelos de mudanças de uso do solo: estudo sobre padrões condicionantes de supressão e persistência de vegetação natural. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 77, n. especial, 2025. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv77n0a-76156>.

VILLOTA, H. El sistema CIAf de clasificación fisiográfica del terreno. **Revista CIAF**, v. 13, n. 1, p. 55-70, 1992.

WELDEGERIMA, T. M.; ZELEKE, T. T.; BIRHANU, B. S.; ZAITCHIK, B. F.; FETENE, Z. A. Analysis of rainfall trends and its relationship with SST signals in the Lake Tana Basin, Ethiopia. **Journal of Advanced Meteorology**, p. 1–10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/5869010>.

WWF – World Wide Fund For Nature. Nas mãos do mercado: o futuro do Cerrado. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/areas_prioritarias/cerrado/manifestodocerrado/#:~:text=A%20principal%20causa%20de%20desmatamento,agroneg%C3%B3cio%20sobre%20a%20vegeta%C3%A7%C3%A3o%20nativa. Acesso em: 15 de jun. 2025.