



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO (PRPG)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

IGOR BOSON SCHETINE

**Estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio
Araguaia: qualificação e modelagem de dados hidrológicos**

GOIÂNIA - GO

2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
GERÊNCIA DE CURSOS E PROGRAMAS INTERDISCIPLINARES

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☒ Dissertação ☐ Tese ☐ Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Igor Boson Schetine

3. Título do trabalho

Estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio Araguaia: qualificação e modelagem de dados hidrológicos

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Igor Boson Schetine, Discente**, em 08/06/2026, às 08:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maximiliano Bayer, Professor do Magistério Superior**, em 08/06/2026, às 10:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6135850** e o código CRC **5C35FC1B**.

IGOR BOSON SCHETINE

Estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio Araguaia: qualificação e modelagem de dados hidrológicos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, da Pró-reitoria de Pós-graduação (PRPG) da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Estrutura e Dinâmica Ambiental

Orientador(a): Dr. Maximiliano Bayer

GOIÂNIA

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Schetine, Igor Boson

Estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio Araguaia: qualificação e modelagem de dados hidrológicos [Manuscrito] / Igor Boson Schetine. - 2026.

89 f.: 2026

Orientador: Prof. Dr. Maximiliano Bayer

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Pró-reitoria de Pós-graduação (PRPG), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Goiânia, 2026.

Bibliografia.

Inclui: lista de figuras, lista de tabelas.

1. Bacia do Rio Araguaia. 2. Precipitação. 3. Gestão de Recursos Hídricos.

I. Bayer, Maximiliano, orient. II. Título.

CDU 5



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

GERÊNCIA DE CURSOS E PROGRAMAS INTERDISCIPLINARES

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº **DM005/2026** da sessão de **Defesa de Dissertação** de **Igor Boson Schetine**, que confere o título de **Mestre em Ciências Ambientais**, na área de concentração em **Estrutura e Dinâmica Ambiental**.

Ao(s) **vinete e nove dias de abril de dois mil e vinte e seis**, a partir das **quatorze horas**, na sala de reuniões do **Centro de Documentação, Informação e Memória (CDIM)**, realizou-se a sessão pública de **Defesa de Dissertação** intitulada “**Estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio Araguaia: qualificação e modelagem de dados hidrológicos**”. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientador(a), **Maximiliano Bayer (IESA/UFG)**, com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: **Márcio Henrique de Campos Zancopé (IESA/UFG)**, **membro titular externo**; **Gislaine Cristina Luiz (IESA/UFG)**, **membro titular externo**. Durante a arguição, os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração no título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta para concluir o julgamento da **Dissertação**, tendo o(a) candidato(a) sido **aprovado(a)** pelos seus membros.

Proclamados os resultados por **Maximiliano Bayer (IESA/UFG)**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos membros da Banca Examinadora, ao(s) **vinete e nove dias de abril de dois mil e vinte e seis**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Maximiliano Bayer, Professor do Magistério Superior**, em 29/04/2026, às 16:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Henrique De Campos Zancopé, Professor do Magistério Superior**, em 29/04/2026, às 16:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gislaine Cristina Luiz, Professora do Magistério Superior**, em 29/04/2026, às 16:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6135833** e o código CRC **A53E042C**.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUÇÃO	9
1.1 REFERENCIAL TEÓRICO	11
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 OBJETIVOS	15
2. MATERIAIS E MÉTODOS	16
2.1 ÁREA DE ESTUDO	16
2.2 BASE DE DADOS	29
2.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	31
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
3.1 INVENTÁRIO E QUALIFICAÇÃO DA REDE: A “ECONOMIA DOS DADOS”	40
3.2 DINÂMICA PLUVIOMÉTRICA: ASSINATURAS E VARIABILIDADE REGIONAL	45
3.3 VARIABILIDADE TEMPORAL: TENDÊNCIAS E ANOMALIAS HISTÓRICAS	55
3.4 INTEGRAÇÃO FISIAGRÁFICA: O PAPEL DO USO DO SOLO E O RELEVO	63
3.5 IMPLICAÇÕES HIDROLÓGICAS	71
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), pelo suporte financeiro e pela concessão da bolsa de mestrado viabilizada através do projeto Saúde Única, cujo investimento foi o alicerce para a execução desta pesquisa.

À Universidade Federal de Goiás (UFG), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (CIAMB) e ao Instituto de Estudos Socioambientais (IESA), pela excelência acadêmica e por disponibilizarem a infraestrutura necessária para o meu amadurecimento como pesquisador.

Expresso minha gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Maximiliano Bayer, pelas orientações fundamentais que permitiram observar a complexidade da bacia do Araguaia com o devido rigor científico. Estendo este reconhecimento aos demais professores e professoras do programa, cujos ensinamentos expandiram significativamente meus horizontes sobre as Ciências Ambientais, e aos meus colegas de curso pela colaboração técnica e pela troca de experiências que tornaram a jornada acadêmica mais leve e gratificante.

Por fim, dedico esta conquista à minha família e aos meus amigos. Agradeço aos meus pais e ao meu irmão pelo apoio incondicional, pela compreensão nas ausências e por serem minha base de inspiração e incentivo em todos os momentos da vida.

RESUMO

A bacia do rio Araguaia, situada em uma zona estratégica de transição entre o Cerrado e a Amazônia, desempenha um papel regulador vital para a estabilidade ambiental e econômica do Brasil Central. Contudo, o sistema enfrenta pressões sem precedentes devido à rápida expansão da fronteira agropecuária, que converteu massivamente a vegetação nativa em áreas de uso intensivo. Esta pesquisa objetivou qualificar a rede de dados históricos e modelar a dinâmica pluviométrica da bacia entre 1975 e 2023, identificando tendências de longo prazo integradas às características de relevo e uso do solo. A metodologia fundamentou-se no processamento computacional em linguagem R para a execução de rotinas automatizadas de saneamento algorítmico, o que permitiu reduzir o inventário inicial de 209 estações pluviométricas para apenas 91 unidades estatisticamente aptas, revelando uma “economia de dados” que impõe vácuos críticos de monitoramento. A análise temporal aplicou o Índice de Anomalia de Chuva e os testes não paramétricos de Mann-Kendall e Estimador de Sen, cruzando os resultados com modelos digitais de elevação e séries históricas do MapBiomas. Os resultados demonstram um processo de ressecamento estrutural na bacia com uma taxa de redução pluviométrica de -25,49 mm/ano, tendo o ano de 2007 como o marco de inflexão definitiva para um bloco ininterrupto de anos classificados como “Muito Secos”. Espacialmente, observou-se uma grave polarização: as cabeceiras e zonas de recarga no setor Sul sofrem um acentuado “secamento de topo”, com as maiores quedas ocorrendo em chapadas acima de 500 metros de altitude. A substituição do Cerrado por pastagens desativou a “bomba biótica” e removeu o “freio hidráulico” natural, favorecendo o escoamento superficial violento em detrimento da infiltração profunda. Conclui-se que a falha na recarga das cabeceiras meridionais ameaça diretamente o pulso de inundação da Ilha do Bananal, evidenciando a “morte da estacionariedade” na gestão hídrica regional. O modelo de planejamento atual gera o risco iminente de emissão de “outorgas de papel”, exigindo uma transição urgente para modelos de governança adaptativos e a proteção rigorosa das áreas de recarga nas chapadas.

Palavras-chave: Bacia do rio Araguaia; Precipitação; Gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

The Araguaia River basin, situated in a strategic transition zone between the Cerrado and the Amazon, plays a vital regulatory role in the environmental and economic stability of Central Brazil. However, the system faces unprecedented pressures due to the rapid expansion of the agricultural frontier, which has massively converted native vegetation into intensive land-use areas. This research aimed to qualify the historical data network and model the basin's rainfall dynamics between 1975 and 2023, identifying long-term trends integrated with relief and land-use characteristics. The methodology was based on computational processing using the R language to execute automated algorithmic data cleaning routines, which allowed for the reduction of the initial inventory of 209 rain gauges to only 91 statistically suitable units, revealing a “data economy” that imposes critical monitoring gaps. Temporal analysis applied the Rainfall Anomaly Index and non-parametric tests, such as Mann-Kendall and Sen's Slope Estimator, cross-referencing the results with digital elevation models and MapBiomass historical series. The results demonstrate a structural drying process in the basin with a rainfall reduction rate of -25.49 mm/year, with the year 2007 marking the definitive inflection point for an uninterrupted block of years classified as “Very Drey”. Spatially, a severe polarization was observed: headwaters and recharge zones in the Southern sector suffer from pronounced “top-drying” with the sharpest declines occurring on plateaus above 500 meters in altitude. The replacement of the Cerrado with pastures deactivated the “biotic pump” and removed the natural “hydraulic brake”, favoring violent surface runoff at the expense of deep infiltration. It is concluded that the recharge failure of the southern headwaters directly threatens the flood pulse of Bananal Island, evidencing the “death of stationarity” in regional water management. The current planning model creates an imminent risk of issuing “paper water entitlements”, necessitating an urgent transition to adaptive governance models and the rigorous protection of recharge areas on the plateaus.

Keywords: Araguaia River basin; Precipitation; Water resource management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Uso e ocupação do solo no Cerrado.	18
Figura 2. Localização da bacia hidrográfica do rio Araguaia.	19
Figura 3. Características da bacia hidrográfica do rio Araguaia.	21
Figura 4. Caracterização físico-geográfica da bacia hidrográfica do rio Araguaia.	23
Figura 5. Padrões pedológicos e de cobertura vegetal (2023) da bacia hidrográfica do rio Araguaia.	25
Figura 6. Caracterização geológica e geomorfológica da bacia hidrográfica do rio Araguaia.	27
Figura 7. Uso e Ocupação da bacia hidrográfica do rio Araguaia.	28
Figura 8. Fluxograma metodológico do processamento, qualificação e análise estatística dos dados pluviométricos.	33
Figura 9. Distribuição espacial das estações pluviométricas inventariadas na bacia do rio Araguaia.	41
Figura 10. Mapas de distribuição espacial comparativa: Redes Inventariada e Qualificada (Aptas).	43
Figura 11. Detalhamento espacial da rede de monitoramento qualificada.	44
Figura 12. Variabilidade pluviométrica da precipitação anual por compartimento da bacia do rio Araguaia.	48
Figura 13. Espacialização da precipitação média anual na bacia do rio Araguaia.	49
Figura 14. Regime pluviométrico médio (sazonalidade) nas sub-bacias do rio Araguaia.	50
Figura 15. Distribuição da magnitude dos eventos pluviométricos extremos diários por compartimento da bacia do rio Araguaia.	52
Figura 16. Mapa de calor da constância pluviométrica mensal, intermitência e estiagem na bacia do rio Araguaia.	54
Figura 17. Índice de Anomalia de Chuva (IAC) na bacia do rio Araguaia (1975-2023).	56
Figura 18. Distribuição espacial das tendências pluviométricas na bacia do rio Araguaia.	60
Figura 19. Distribuição espacial das tendências e variações pluviométricas na bacia do rio Araguaia.	61
Figura 20. Mapas de tendências e uso e ocupação do solo.	65
Figura 21. Relação entre altitude e tendência de precipitação.	68
Figura 22. Variabilidade das tendências de precipitação em função do status de conservação da paisagem na bacia do rio Araguaia (1985 - 2023).	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatísticas de uso e ocupação do solo no bioma Cerrado.	17
Tabela 2. Estatísticas de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Araguaia.	29
Tabela 3. Distribuição espacial densidade de estações pluviométricas por sub-bacia.	41
Tabela 4. Metadados e qualificação de amostra das estações pluviométricas.	42
Tabela 5. Síntese do gradiente pluviométrico (extremos) das estações qualificadas.	45
Tabela 6. Estatísticas consolidadas de precipitação média anual e eventos extremos (P90) por compartimento da bacia do rio Araguaia.	46
Tabela 7. Resultados do teste de Mann-Kendall e Estimador de Sen para a precipitação média da bacia (1975 - 2023).	58
Tabela 8. Síntese da dinâmica climática na bacia do rio Araguaia (1985 - 2023).	74

1. INTRODUÇÃO

As savanas estão entre os biomas mais relevantes do planeta, ocupando extensas áreas nas regiões tropicais e subtropicais. Globalmente, esses ecossistemas são definidos por sua estrutura vegetal singular, caracterizada pela co-dominância entre um dossel arbóreo descontínuo e um estrato herbáceo contínuo composto majoritariamente por gramíneas (RATNAM et al., 2011). A manutenção dessa fisionomia aberta, especialmente em savanas méxicas onde a precipitação supera os 650 mm/ano, não é governada apenas pelo clima, mas por um equilíbrio dinâmico de distúrbios como o fogo e a herbivoria, que impedem o fechamento do dossel florestal (SANKARAN et al., 2005; HOFFMANN et al., 2012). Esses ecossistemas possuem representantes fundamentais em diversos continentes, sendo o Neotrópico representado majoritariamente pelo Cerrado brasileiro, o Lavrado em Roraima e áreas dispersas de savana na Amazônia (RIBEIRO e WALTER, 2008). Além da sua biodiversidade singular, esses ambientes desempenham um papel fundamental na regulação do clima, na manutenção dos ciclos hidrológicos e no suporte a atividades econômicas e culturais que sustentam populações locais e regionais.

A disponibilidade de água é um dos fatores críticos para a estabilidade das savanas. Em sistemas áridos, a água é o limitante primário da cobertura lenhosa, contudo, em savanas úmidas como as do Brasil Central, a precipitação abundante permite uma complexa regulação térmica via calor latente, tornando a compreensão de “como chove” - ou seja, a distribuição temporal e a intensidade dos eventos - determinante para a resiliência do bioma (LEHMANN et al., 2011; ARCHIBALD et al., 2019). A água sustenta uma série de atividades humanas, desde o abastecimento público até a agropecuária, a geração de energia e os processos industriais (IBGE, 2021). No Brasil, esse recurso é gerido sob a égide da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), que estabelece a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, tendo na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) o braço regulador e no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) o suporte geoestatístico para a gestão do território.

No contexto brasileiro, o Cerrado se destaca como uma das savanas mais biodiversas do mundo, cobrindo cerca de 23% do território nacional. Sua importância hidrológica é estratégica, pois abriga as nascentes de três das maiores bacias hidrográficas da América do

Sul - Paraná-Paraguai, Araguaia-Tocantins e São Francisco - além de contribuir para sub-bacias da Amazônica (LATRUBESSE et al., 2019). Embora as savanas maduras (*old-growth*) possuam alta resiliência a distúrbios endógenos como o fogo, elas são extremamente vulneráveis a distúrbios exógenos causados pela ação humana, que destroem a biomassa subterrânea e alteram permanentemente o ciclo do carbono e da água (BUISSON et al., 2018; OSBORNE et al., 2018). Nas últimas décadas, o bioma tornou-se a principal fronteira agrícola do país, com vasta substituição de vegetação nativa por monoculturas (ASSIS e BAYER, 2020; MAPBIOMAS, 2025). Estudos indicam que tais alterações no uso do solo impactam o regime hidrológico de forma mais imediata que as variações climáticas globais (COE et al., 2011; SALMONA et al., 2023).

O clima do Cerrado, classificado como tropical sazonal (Aw na classificação de Köppen), apresenta duas estações bem definidas. Esse padrão é governado por sistemas de grande escala e teleconexões atmosféricas, como o El Niño Oscilação Sul (ENOS), que alteram significativamente os regimes de temperatura e precipitação (VAREJÃO-SILVA, 2005). A análise da pluviosidade deve ser integrada às características físicas do terreno e aos arquétipos geomorfométricos, que permitem classificar o relevo em unidades como Chapadas, Planaltos e Depressões, fornecendo uma base factual para entender a distribuição espacial das chuvas e os riscos de degradação (AQUINO et al., 2009; ROCHA et al., 2022).

O monitoramento hidrometeorológico, realizado por meio de pluviômetros e estações pluviométricas, é fundamental para prever eventos extremos, como secas e inundações, além de subsidiar políticas públicas de gestão hídrica, conforme estabelecido pela Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997). No contexto atual, a modelagem hidrológica tem se mostrado uma ferramenta valiosa para compreender a variabilidade temporal dos corpos d'água e avaliar riscos ambientais (DUNNE e LEOPOLD, 1998; PAZ, 2004). Esses modelos representam matematicamente os fluxos hídricos e fornecem dados essenciais para a tomada de decisões estratégicas em cenários de mudanças climáticas globais, que podem intensificar eventos extremos e comprometer a qualidade da água (IPCC, 2007; MORAIS, 2019).

Apesar da relevância global das savanas, ainda há uma carência de estudos abrangentes que integrem aspectos hidrológicos, ecológicos e climáticos nesses biomas. No caso do Cerrado, as pesquisas são particularmente escassas, especialmente aquelas que abordam escalas locais e adotam uma abordagem multidisciplinar. A manutenção de séries históricas qualificadas é indispensável para a gestão hídrica eficiente, permitindo que os órgãos gestores, como a ANA e as secretarias estaduais, abandonem o planejamento baseado

em médias históricas estáticas em prol de modelos adaptativos e resilientes. A qualificação da base de dados pluviométricos da bacia do rio Araguaia apresenta-se como um passo fundamental para superar a fragmentação institucional e a escassez de estudos locais, fornecendo subsídios técnicos para a gestão integrada de uma das regiões mais estratégicas do país.

1.1 REFERENCIAL TEÓRICO

A compreensão profunda da dinâmica hídrica exige que se estabeleça a bacia hidrográfica não apenas como um recorte cartográfico, mas como uma unidade sistêmica onde processos geológicos, bióticos e climáticos convergem de forma indissociável. Sob o prisma de Christofolletti (1980), a bacia deve ser interpretada como um sistema aberto que processa fluxos contínuos de matéria e energia, delimitada por divisores topográficos que condicionam o destino de cada gota precipitada. Esse arranjo físico funciona como um receptor de energia solar e pluvial, onde a entrada de água é imediatamente submetida a mecanismos de partição que envolvem a interceptação pelo dossel vegetal e a detenção em microdepressões antes de iniciar sua jornada pelo perfil do solo. Conforme discutido por Paz (2004) e Tucci (2006), a transformação da precipitação em vazão no exutório não é um evento linear, mas sim o resultado de um balanço hídrico complexo mediado pela evapotranspiração e pela infiltração, processos que definem a disponibilidade de água no tempo e no espaço. No contexto brasileiro, essa visão sistêmica ganha um contorno jurídico e gerencial com a Lei Federal nº 9.433/1997, que institui a bacia como a célula fundamental para a gestão dos recursos naturais, integrando a proteção ambiental ao desenvolvimento socioeconômico de forma indissociável (BRASIL, 1997; CARVALHO, 2020), o que nos leva a considerar como as características físicas desse território moldam o comportamento dos rios.

Essa resposta hidrológica, embora dependente do volume de chuvas, é regida fundamentalmente pela arquitetura do relevo e pela composição do substrato geológico, elementos que ditam a velocidade e a magnitude dos fluxos superficiais e subterrâneos. Em biomas de savana, como o Cerrado, a compartimentação geomorfológica atua como um regulador crítico, onde a presença de chapadas e planaltos extensos favorece a retenção hídrica e a recarga lenta de aquíferos, enquanto áreas de relevo mais dissecado aceleram a drenagem e a erosão. A utilização de parâmetros geomorfométricos, como a declividade e a

curvatura das vertentes, permite classificar a paisagem em unidades funcionais que explicam por que determinadas sub-bacias apresentam maior resiliência hídrica do que outras (ROCHA et al., 2022). Unidades da paisagem com baixa amplitude altimétrica facilitam a infiltração profunda, ao passo que as depressões com amplitudes altimétricas maiores e frentes de recuo erosivo tornam o sistema mais suscetível a picos de cheia e transporte de sedimentos (AQUINO et al., 2009). Esta sensibilidade geomorfológica evidencia que a morfologia das vertentes não é apenas um cenário estatístico, mas uma variável ativa que define a vulnerabilidade de ecossistemas frente às oscilações do clima e à agressividade das chuvas tropicais (BAYER, 2010; VAREJÃO-SILVA, 2005), fator que se torna ainda mais crítico quando a cobertura vegetal original é removida para dar lugar ao uso antrópico.

As alterações na cobertura da terra, especialmente a substituição de vegetação nativa por atividades agropecuárias, operam como um catalisador de desequilíbrios no ciclo hidrológico superficial e subsuperficial. Quando as fitofisionomias complexas do Cerrado são substituídas por pastagens ou monoculturas, ocorre uma redução drástica na rugosidade do terreno e na capacidade de interceptação foliar, o que altera o tempo de concentração das águas nas calhas fluviais (COE et al., 2011). Essa modificação não afeta apenas o volume de água que escoar, mas também a qualidade física dos rios, uma vez que o aumento do escoamento superficial carrega nutrientes e solo, resultando no assoreamento de leitos e na desconfiguração da geometria dos canais (TUCCI, 2006). Estudos realizados por Bayer e Zancopé (2014) demonstram que, em escalas regionais, a pressão exercida pelo avanço da fronteira pode ter um impacto mais severo e imediato no regime de vazão do que as próprias tendências climáticas de longo prazo. Esse cenário de degradação progressiva exige uma vigilância constante sobre a resiliência dos corpos d'água, visto que a análise histórica dos dados de uso do solo revela tendências de exaustão hídrica que podem comprometer o abastecimento humano e a produção de alimentos (LATRUBESSE et al., 2019; MAPBIOMAS, 2025), tornando a precisão do monitoramento uma questão de segurança nacional.

Para que se possa mitigar esses impactos e planejar o uso sustentável da água, é indispensável a existência de séries históricas confiáveis e de uma rede de monitoramento que capture a realidade da dinâmica fluvial. A Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), sob a égide da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), fornece o suporte técnico para a medição de chuvas, níveis d'água fluviométricos, vazões e sedimentos em todo o território nacional, servindo como base para modelos de previsão e outorga (ANA, 2024). Entretanto, a simples coleta de dados não garante a produção de conhecimento se não houver

um processo rigoroso de qualificação que identifique falhas, lacunas temporais ou inconsistências operacionais que frequentemente afetam as estações automáticas e manuais em todo Brasil (SUIZU et al., 2022). A qualificação dos dados hidrológicos deve ser encarada como uma etapa científica essencial, onde o foco reside em transformar registros brutos em informações estatisticamente válidas para o entendimento de eventos extremos, como secas prolongadas ou inundações severas (WMO, 2008). Diante das dificuldades logísticas para manter o monitoramento presencial em áreas remotas, a integração com dados de sensoriamento remoto, especialmente as estimativas de precipitação das missões Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) e Global Precipitation Measurement (GPM), oferece uma oportunidade sem precedentes para validar modelos e preencher vazios de informação em sub-bacias sem instrumentação (RENNÓ e SOARES, 2008). Essa convergência tecnológica entre o monitoramento de solo e a observação orbital é o que permite avançar na análise de tendências em cenários de incerteza climática.

1.2 JUSTIFICATIVA

A pesquisa justifica-se pela necessidade crítica de aprimorar o monitoramento hidrológico na bacia do rio Araguaia, região estratégica para o equilíbrio ambiental e socioeconômico do Brasil. A urgência deste estudo é evidenciada pela magnitude das transformações no bioma Cerrado. Dados do Projeto MapBiomas (2025) revelam que, entre 1985 e 2023, o bioma registrou uma conversão massiva de 41.303.020 hectares de cobertura natural para usos antrópicos, representando 84,4% de todas as transições de cobertura ocorridas no período. Em contrapartida, a regeneração de áreas naturais limitou-se a apenas 7,7% (3,7 milhões de ha), confirmando um cenário de substituição sistemática de vegetação nativa por pastagens e agricultura.

A urgência desse diagnóstico ganha relevo diante das severas limitações técnicas impostas pelas inconsistências crônicas registradas nas séries brutas das estações hidrometeorológicas brasileiras. Registros com lacunas temporais prolongadas, falhas na leitura instrumental e descontinuidade operacional mascaram as reais tendências climáticas, gerando análises imprecisas. Essa problemática empírica foi previamente identificada no âmbito da bacia do rio Araguaia por Schetine (2023), que, ao realizar a modelagem hidrológica do trecho médio da calha entre os anos 2000 e 2020 utilizando dados brutos do portal HidroWeb, constatou que a assimetria e a desqualificação prévia dos registros brutos

inserir elevados níveis de incerteza estatística nas projeções de vazão e nas tendências de decaimento do curso fluvial. Torna-se, portanto, indispensável o desenvolvimento de ferramentas algorítmicas de saneamento e filtragem capazes de expurgar tais ruídos operacionais, justificando o esforço metodológico desta dissertação em edificar uma base de dados rigorosamente qualificada para o planejamento hídrico regional.

Este cenário de transformação radical desativa o “freio hidráulico” natural da bacia, alterando drasticamente a rugosidade do solo e a partição da energia superficial (COE et al., 2011). A relevância do estudo reside na fragilidade das séries históricas atuais frente a esta nova realidade. Embora a rede de monitoramento operada por diferentes órgãos seja numericamente extensa, a fragmentação institucional e a falta de padronização resultam em lacunas que comprometem a precisão de modelos preditivos. Academicamente, a quebra da “estacionariedade climática” - conceito discutido por Milly et al. (2008) - exige que a gestão de recursos hídricos abandone premissas estáticas, uma vez que a resposta hidrológica de 2023 ocorre sobre uma superfície 84% mais antropizada do que a de 1985 (MAPBIOMAS, 2025).

A investigação permite compreender não apenas os volumes anuais precipitados, mas a frequência de eventos extremos diários que ditam os processos de erosão, assoreamento e a capacidade de recarga dos aquíferos regionais. A integração entre a análise pluviométrica e a geomorfologia preenche uma lacuna factual sobre como a arquitetura das vertentes condiciona a água em áreas sob forte pressão, especialmente onde o balanço hídrico é alterado por ganhos marginais em silvicultura ou alterações na superfície de água.

Social e institucionalmente, a qualificação destes dados fornece o embasamento técnico necessário para o fortalecimento da governança das águas, conforme a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997). O estudo propõe-se a gerar subsídios para instrumentos de gestão operados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), como a concessão de outorgas e planos de bacia, evitando a emissão de “outorgas de papel” que ignorem a realidade. Dessa forma, a pesquisa alinha-se às demandas do Programa de Pós - Graduação em Ciências Ambientais (PPGCIAMB/UFG) por estudos aplicados que utilizem técnicas geoespaciais para solucionar problemas concretos na gestão de recursos naturais no Brasil Central.

1.3 OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Qualificar a base de dados pluviométrica e modelar a dinâmica hidrometeorológica da bacia hidrográfica do rio Araguaia, caracterizando o seu comportamento médio, a variabilidade sazonal e a magnitude de eventos extremos diários. A pesquisa busca identificar padrões e tendências de longo prazo integrados às formas de relevo da bacia, analisando as respostas hidrológicas frente às mudanças climáticas e às pressões antrópicas.

A execução desta pesquisa fundamenta-se na integração de métodos estatísticos robustos e análise geoespacial, permitindo que a caracterização do regime de chuvas transcenda a métrica numérica e alcance uma compreensão sistêmica da funcionalidade hídrica do Araguaia. Ao descrever desde a climatologia média até os limiares da agressividade da chuva (Percentil 90), o estudo fornece um diagnóstico detalhado da saúde hidrológica da bacia, essencial para o suporte à gestão e à resiliência dos ecossistemas regionais.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Inventariar e mapear a distribuição espacial da rede pluviométrica na bacia do rio Araguaia, caracterizando a “economia dos dados” e a densidade de monitoramento das instituições gestoras para identificar lacunas de informação.
- Qualificar as séries históricas de precipitação através de saneamento algorítmico, definindo o comportamento médio (climatologia sazonal) e o Percentil 90 (P90) como indicadores da magnitude e da assinatura dos eventos extremos.
- Aplicar testes estatísticos não - paramétricos (Mann - Kendall e Estimador de Sen) para detectar e espacializar tendências de longo prazo, associando os padrões de variabilidade às principais formas de relevo (Chapadas, Planaltos e Depressões).
- Avaliar a conectividade hidrológica entre o comportamento pluviométrico nas áreas de cabeceira e a propagação da vazão no canal principal, analisando o impacto das transformações no uso e ocupação do solo no tempo de resposta da bacia.

- Sistematizar os resultados em material cartográfico e arquivos geoespaciais que subsidiem a gestão de recursos hídricos, fornecendo subsídios técnicos para a concessão de outorgas e a elaboração de planos de bacia resilientes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A compreensão da dinâmica da bacia do rio Araguaia exige, primordialmente, uma análise sobre o bioma Cerrado, sistema que abriga a maior parte de sua extensão territorial e desempenha um papel regulador estratégico para o Centro-Oeste brasileiro. Reconhecido academicamente como o “berço das águas” (LATRUBESSE et al., 2019), o Cerrado atua como um imenso coletor de umidade, onde a arquitetura de sua vegetação nativa - composta por raízes profundas e troncos tortuosos - funciona como uma floresta invertida que facilita a percolação da água da chuva para as camadas mais profundas do solo (COE et al., 2011). Este mecanismo de recarga é o que garante a manutenção do fluxo de base dos rios mesmo durante os severos meses de estiagem, evidenciando uma dependência intrínseca entre a saúde das fitofisionomias savânicas e a perenidade dos corpos d’água superficiais. Contudo, essa função ecossistêmica tem sido posta à prova pela fragmentação da paisagem original, uma vez que a substituição da cobertura vegetal por matrizes produtivas altera a porosidade do solo e a capacidade de retenção hídrica do sistema (LATRUBESSE et al., 2019), fator que se torna crítico diante da velocidade com que a fronteira agrícola se consolidou na região (COE et al., 2011).

A trajetória de ocupação deste território revela um processo de antropização que transformou radicalmente a fisionomia do bioma em um intervalo temporal relativamente curto. Desde a década de 1970, mas com a intensificação notória a partir de meados de 1985, o Cerrado passou a ser o principal cenário de expansão das commodities agrícolas e da pecuária extensiva, resultando em uma substituição sistemática das áreas de formação natural por áreas manejadas (MIZIARA e FERREIRA, 2008; SANO et al., 2010). Essa transição não implica apenas na perda de biodiversidade, mas em uma reconfiguração dos fluxos de energia e massa, onde a redução da evapotranspiração real e o aumento do escoamento superficial

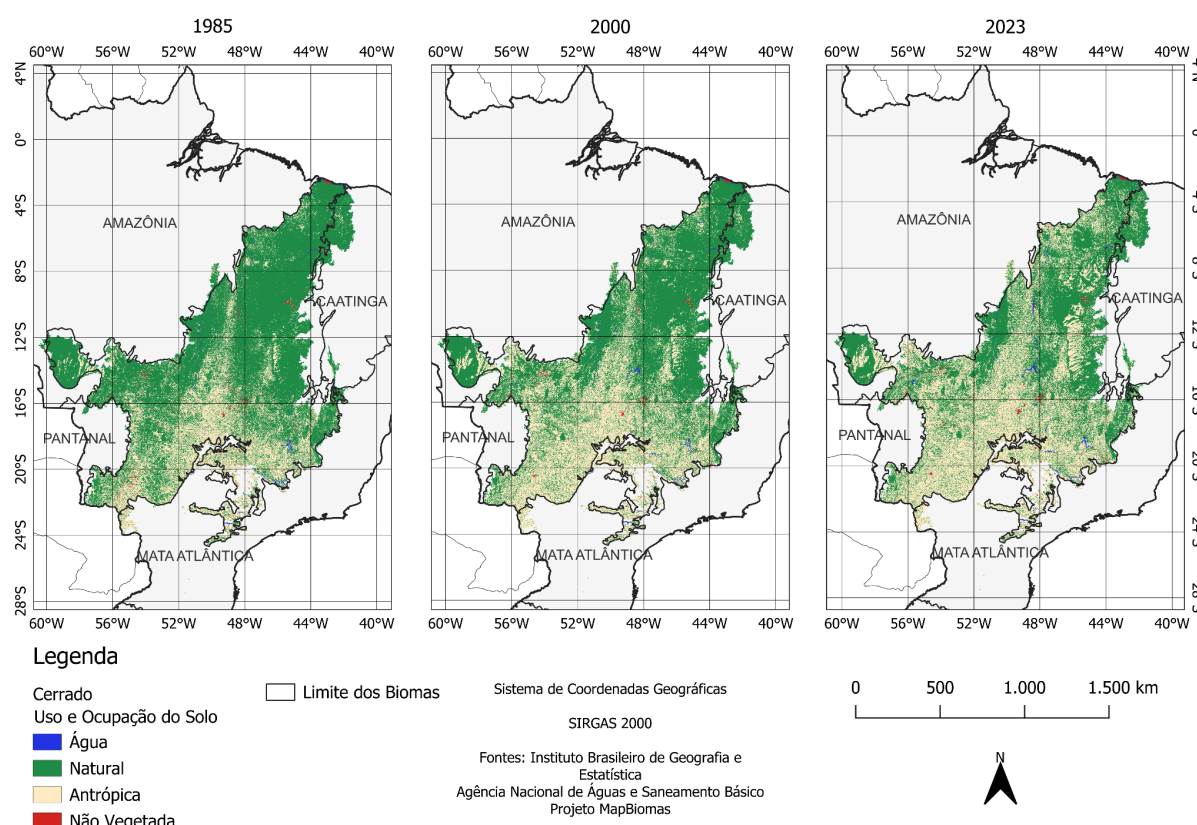
direto passam a ditar o novo comportamento hidrológico das sub-bacias (COE et al., 2011; SPERA et al., 2016). A análise comparativa dos estágios de conservação e uso ao longo das últimas décadas permite identificar padrões de degradação que desafiam a resiliência dos aquíferos locais, conforme pode ser observado através da evolução estatística (Tabela 1) e espacial (Figura 1) da cobertura da terra entre os anos de 1985, 2000 e 2023 (GONÇALVES et al., 2017; MAPBIOMAS, 2025).

Tabela 1. Estatísticas de uso e ocupação do solo no bioma Cerrado.

Ano/Classes	Natural (%)	Antrópica (%)
1985	70,85	28,19
2000	60,78	38,79
2023	51,72	47,70

Fonte: Projeto MapBiomias. Elaborado pelo autor (2026).

Figura 1. Uso e ocupação do solo no Cerrado.

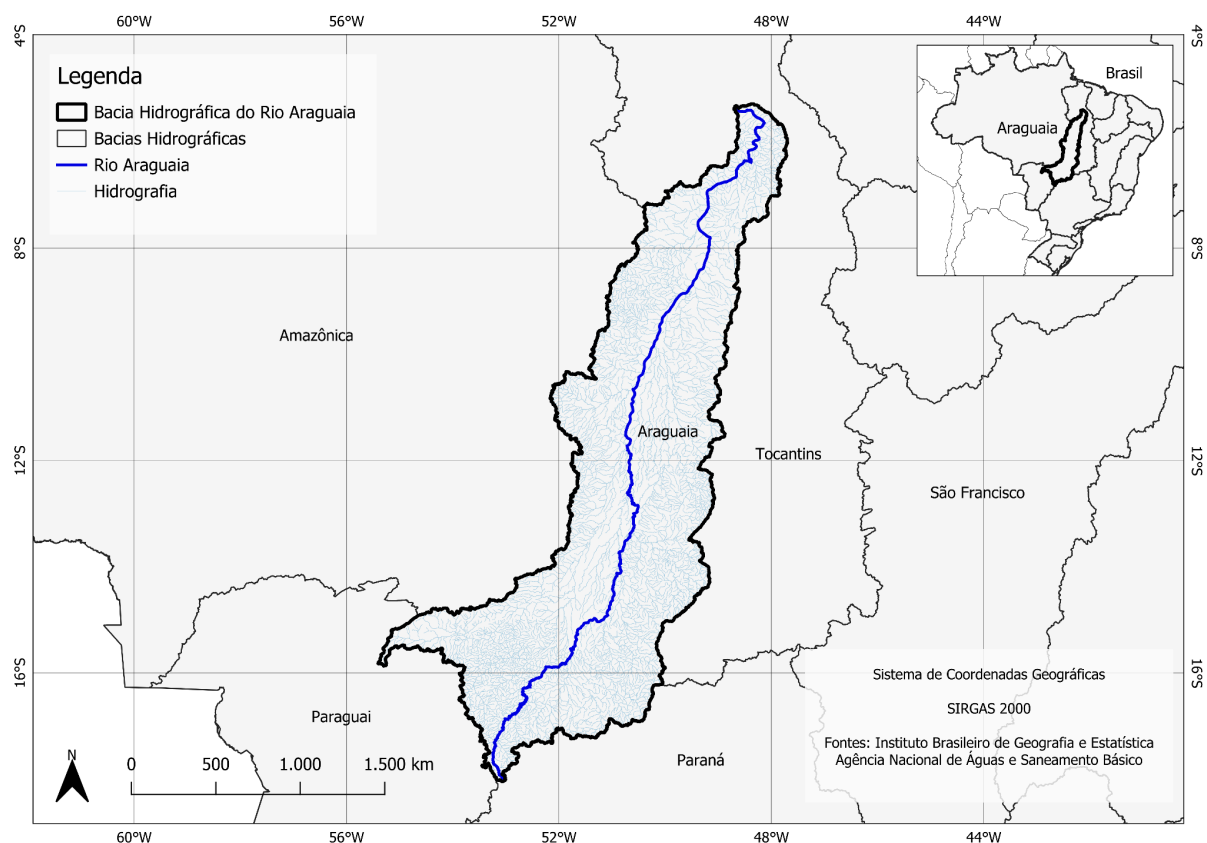


Fontes: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Projeto MapBiomias. Organizado pelo autor (2026).

Inserida nesse cenário de transformações biofísicas, a bacia hidrográfica do rio Araguaia (Figura 2) emerge como um sistema fluvial de importância vital para a estabilidade ambiental e econômica do Brasil Central, integrando-se formalmente à Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia. Com uma área de drenagem que abrange aproximadamente 386.000 km², essa bacia não representa apenas um recorte cartográfico, mas um território de complexa gestão compartilhada que exige um olhar integrado sobre seus recursos (ANA, 2015). Sua extensão territorial perpassa as fronteiras de quatro estados - Mato Grosso, Goiás, Tocantins e Pará -, o que confere ao sistema uma heterogeneidade paisagística singular ao englobar a transição entre as savanas do Cerrado e as densas formações florestais do bioma Amazônico. Essa vasta rede de drenagem sustenta uma infraestrutura natural que alimenta ecossistemas sensíveis e viabiliza a manutenção de atividades socioeconômicas em 204 municípios, evidenciando que qualquer alteração no regime hídrico de suas sub-bacias reverbera diretamente na segurança de uma vasta população regional (IBGE, 2021).

O eixo central desse sistema, o rio Araguaia, possui suas nascentes localizadas em um divisor de águas estratégico na Serra do Caiapó, no município goiano de Mineiros, situando-se em cotas altimétricas próximas a 850 metros. A partir desse ponto de origem, o curso d'água inicia uma trajetória de aproximadamente 2.600 km em direção ao norte, serpenteando por terrenos de geologias variadas até atingir sua confluência definitiva com o rio Tocantins (AQUINO et al., 2009). Ao longo de sua calha principal, o rio assume diferentes morfologias de canal e comportamentos deposicionais, sendo influenciado tanto pela energia das cabeceiras quanto pela suavidade das planícies do médio curso, o que demanda uma compreensão detalhada de sua inserção geográfica para que se possa analisar a resposta do sistema frente aos gradientes de pluviosidade e às pressões de uso do solo que definem sua área de influência.

Figura 2. Localização da bacia hidrográfica do rio Araguaia.



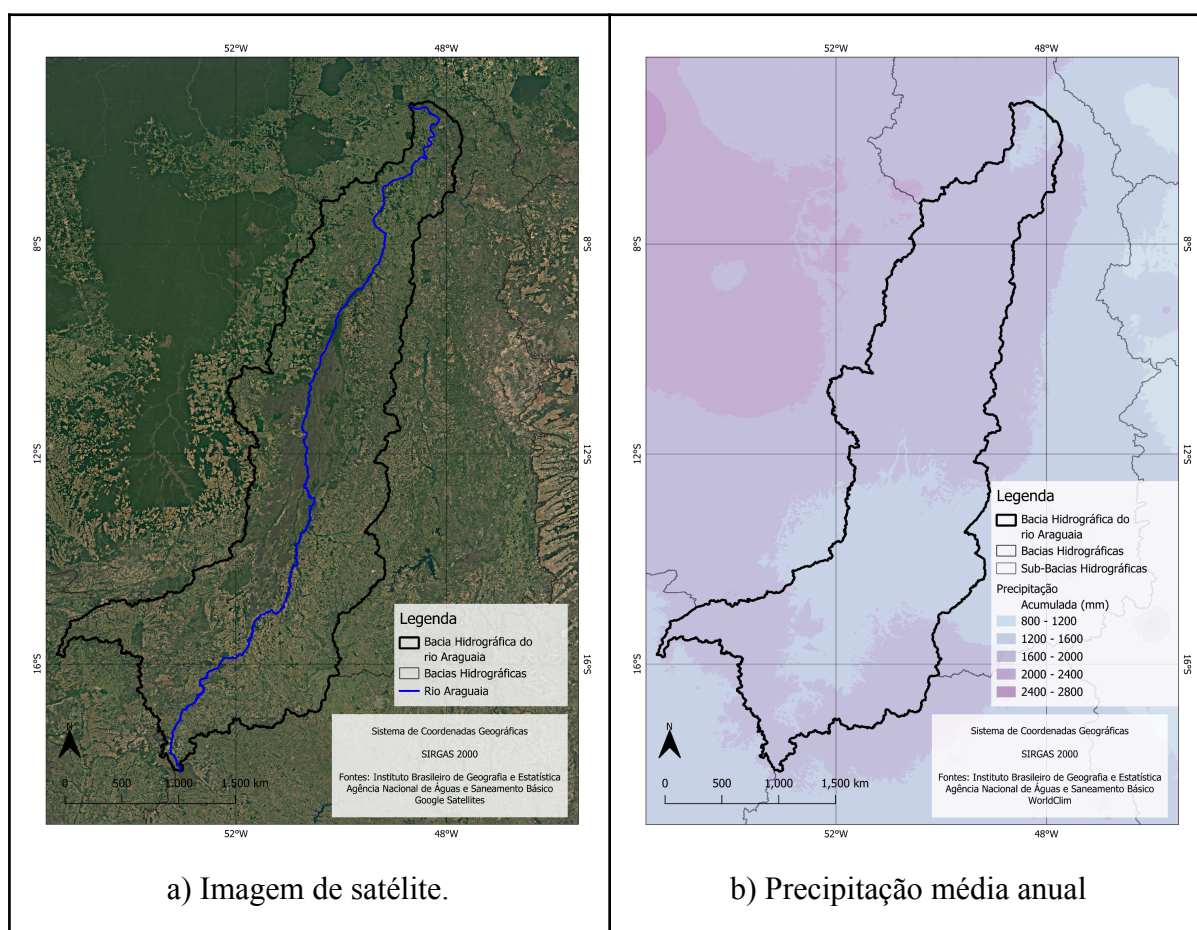
Fontes: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Elaborado pelo autor (2026).

A dinâmica funcional da bacia do rio Araguaia é intrinsecamente vinculada ao ritmo das massas de ar que regem o Centro-Oeste e o Norte do Brasil, manifestando-se em um regime hidrológico pulsante e previsível. Esse comportamento é reflexo do clima tropical semiúmido, classificado como Aw segundo a tipologia de Köppen, onde a alternância entre as estações é o fator preponderante na definição dos volumes que transitam pelos canais. Tal sazonalidade estabelece um calendário hidrológico rigoroso, no qual o período chuvoso, concentrado entre os meses de outubro e abril, é responsável por aportar aproximadamente 80% do volume total de precipitação anual da bacia (AQUINO et al., 2009). Em contrapartida, a estiagem pronunciada que ocorre entre maio e setembro submete o sistema a um déficit hídrico que reduz drasticamente os níveis dos rios e expõe extensos bancos de areia, revelando a dependência do sistema fluvial em relação aos estoques de água subterrânea acumulados durante o verão.

A distribuição dessa pluviosidade, contudo, não ocorre de forma homogênea na bacia, apresentando um gradiente latitudinal que reflete a transição entre as savanas do Cerrado e as florestas tropicais da Amazônia. Observa-se que o volume médio de chuvas aumenta progressivamente no sentido sul-norte, partindo de patamares próximos a 1.500 mm nas regiões de cabeceira, localizadas no sudoeste goiano, e ultrapassando a marca de 2.000 mm em sua porção setentrional. Esse aumento na oferta hídrica em direção à foz não apenas altera a magnitude das cheias, mas também influencia a densidade da cobertura vegetal e a capacidade de transporte de sedimentos, fatores que podem ser observados detalhadamente através de produtos de sensoriamento remoto. A visualização por satélite permite correlacionar essa umidade com o vigor da biomassa, fornecendo um panorama sobre como o relevo e a vegetação correspondem a esse influxo variável de energia e água.

Além das variações sazonais e espaciais, a bacia é sensível a perturbações climáticas de escala global que introduzem incertezas no balanço hídrico anual. Fenômenos de teleconexão, como as oscilações do El Niño e da La Niña, desempenham um papel crítico ao desequilibrar a frequência e a intensidade dos eventos extremos diários, o que resulta em anomalias de vazão que fogem aos padrões históricos (VAREJÃO-SILVA, 2005.) Essas flutuações impactam diretamente a geomorfologia do canal principal, uma vez que chuvas atípicas potencializam a erosão das margens e aceleram o aporte de sólidos, alterando a dinâmica de sedimentação em sub-bacias estratégicas (COE et al., 2011). A compreensão desta variabilidade climática é, portanto, essencial para validar os modelos de predição e para interpretar as características físico-geográficas apresentadas a seguir na Figura 3.

Figura 3. Características da bacia hidrográfica do rio Araguaia.



Fontes: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Google Satellites e WorldClim. Elaborado pelo autor (2026).

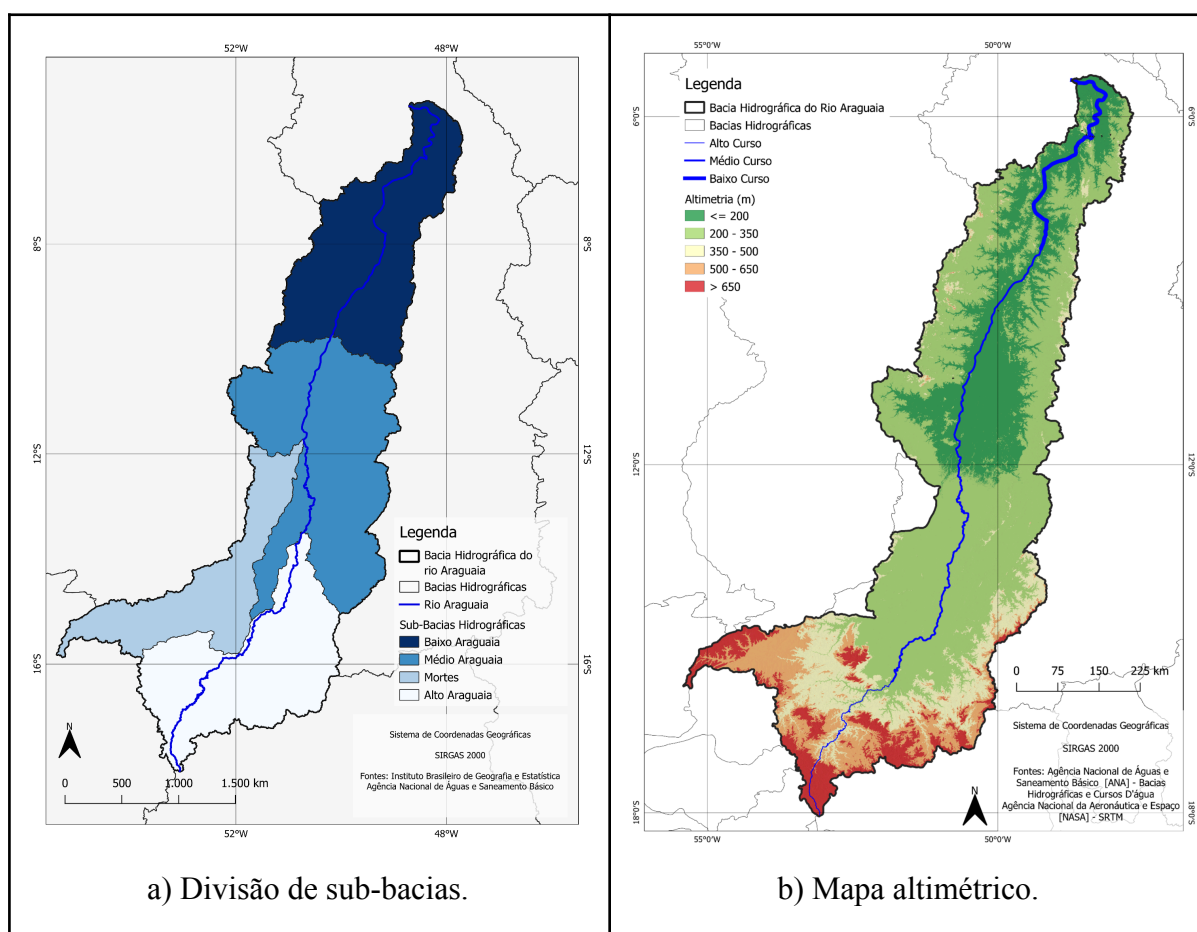
A estruturação física da bacia do Araguaia não se apresenta como um bloco uniforme, mas como um mosaico de compartimentos que respondem de maneira distinta aos influxos pluviométricos e às variações do relevo. Para operacionalizar a gestão e a análise territorial, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) adota uma segmentação hierárquica fundamentada na metodologia de Otto Pfafstetter, a qual organiza o sistema em quatro sub-bacias fundamentais: Alto Araguaia, Médio Araguaia, Baixo Araguaia e a sub-bacia do rio das Mortes (Figura 4). Essa divisão permite identificar comportamentos hidrológicos contrastantes, onde a variação de altitude e a declividade atuam como os principais vetores da velocidade com que a água se desloca pela paisagem, refletindo diretamente na capacidade de recarga e no tempo de concentração dos fluxos superficiais.

No Alto Araguaia, setor que engloba as cabeceiras situadas em território goiano, o sistema drena uma área de aproximadamente 36.000 km² marcada por um relevo acidentado onde as altitudes atingem patamares de 1.000 metros. Essa configuração topográfica,

caracterizada por canais estreitos e encaixados, resulta em ambientes fluviais de alta energia e respostas hidrológicas extremamente rápidas frente a eventos de chuva intensa, o que potencializa os processos erosivos e a transferência de sedimentos para os trechos inferiores (LATRUBESSE e STEVAUX, 2002); BAYER, 2010). À medida que o curso d'água descende desses patamares elevados em direção à depressão central, a energia do fluxo começa a se dissipar, dando lugar ao Médio Araguaia. Esta unidade, que integra a expressiva drenagem do rio das Mortes proveniente do Mato Grosso, abrange uma vasta extensão de quase 300.000 km² e representa um dos setores geomorfológicos mais dinâmicos e complexos de todo o sistema.

O Médio Araguaia é definido pela presença estratégica da Ilha do Bananal, reconhecida como a maior ilha fluvial do mundo, cuja extensa planície aluvial atua como um gigantesco regulador natural do ciclo hidrológico regional. Por meio de um intrincado sistema de lagos temporários e paleomeandros, essa região desempenha a função de amortecer os picos de vazão, armazenando água durante o período de cheia e liberando-a de forma gradativa para manter os níveis mínimos durante a estiagem (BAYER, 2002). Por fim, o Baixo Araguaia estende-se até a confluência definitiva com o rio Tocantins, apresentando uma transição gradual onde o incremento no transporte de sedimentos e a redução da declividade modificam sensivelmente a geometria do canal principal. Esse percurso final completa a jornada do sistema, onde a interação entre o relevo e o volume hídrico define a vulnerabilidade das margens e a deposição de materiais, o que nos remete à importância de compreender a altimetria como o esqueleto que sustenta toda essa dinâmica fluvial.

Figura 4. Caracterização físico-geográfica da bacia hidrográfica do rio Araguaia.



Fontes: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Agência Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA).

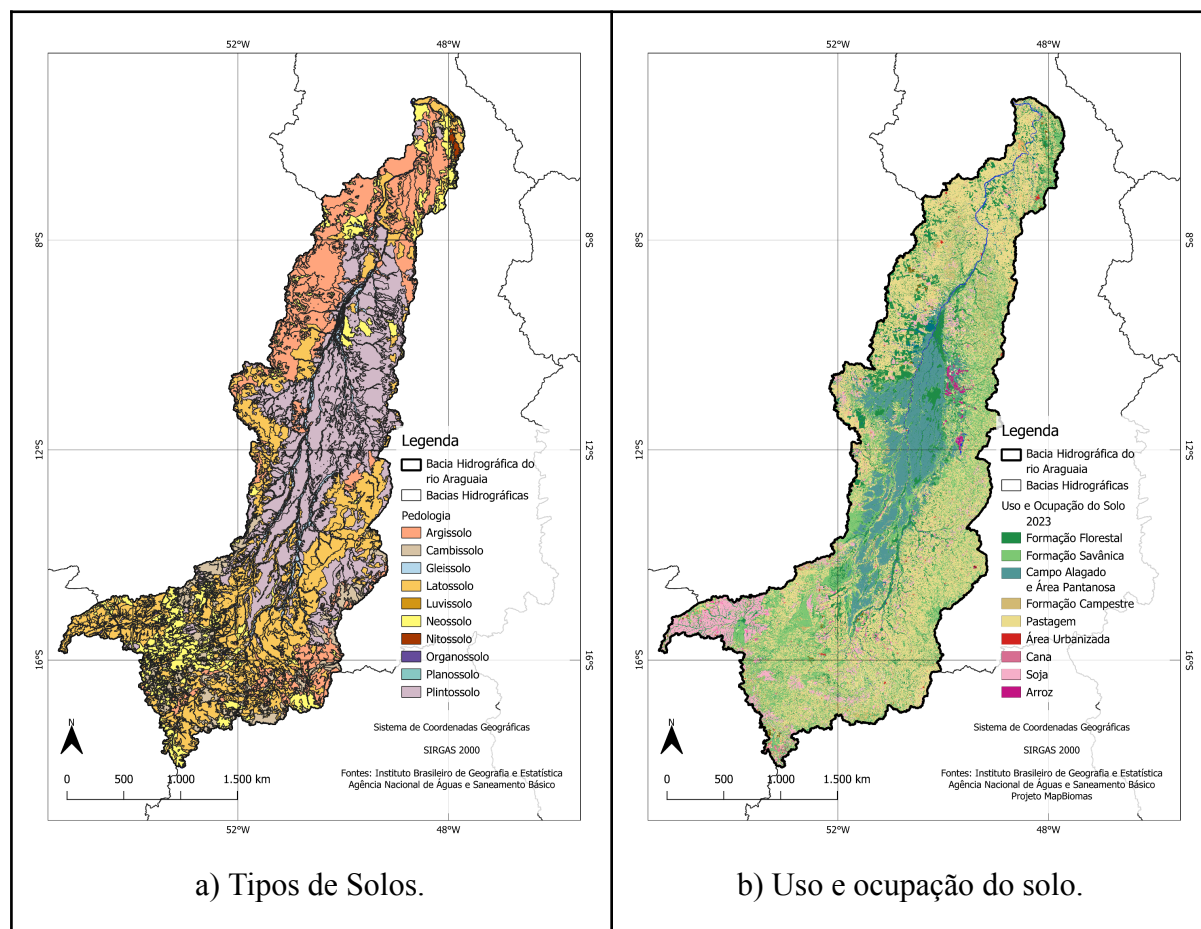
Elaborado pelo autor (2026).

A sustentação física da bacia do rio Araguaia repousa sobre uma complexa interface pedológica que atua como o principal filtro e reservatório dos fluxos hídricos superficiais. A análise da distribuição dos solos (Figura 5) revela uma diversidade marcante de classes que, associada a variados padrões de drenagem, define a capacidade de infiltração e o potencial de escoamento em cada setor da bacia. Os Latossolos emergem como a classe predominante, representando aproximadamente 28% dos registros, estando estritamente associados aos relevos planos e suaves ondulados dos topos de chapadas e platôs. Eles são seguidos de perto pelos Argissolos (25%), frequentes em superfícies de relevo moderadamente ondulado e encostas, pelos Plintossolos (18%) e Neossolos (15%), estes últimos com forte ocorrência em vertentes íngremes ou terraços fluviais, enquanto Cambissolos, Gleissolos e Planossolos completam o mosaico em áreas mais restritas (IBGE, 2021). Esta configuração não se distribui de maneira aleatória, mas segue uma lógica espacial estritamente vinculada aos

compartimentos geomorfológicos. As condições de drenagem, por exemplo, mostram uma predominância de solos bem drenados (42%) e moderadamente drenados (19%), garantindo a recarga de aquíferos em áreas de topo. Em contraste, as zonas de drenagem imperfeita ou má drenagem, onde Gleissolos e Plintossolos são frequentes, concentram-se nas extensas planícies aluviais e baixadas, funcionando como áreas de saturação sazonal que regulam o pulso de inundação do rio.

Essa base pedológica estabelece uma relação intrínseca com a cobertura vegetal e a morfologia do relevo, condicionando a organização das fitofisionomias que revestem a bacia. Ao analisar o cenário atual da cobertura do solo (mapeado para o ano de 2023), observa-se que os Latossolos, por possuírem características físicas que favorecem a porosidade, sustentam tanto áreas de cerrado (47% dos casos) quanto florestas ombrófilas (32%), embora apresentem comportamentos hídricos distintos: nas áreas de savana, prevalecem em relevos planos e bem drenados, enquanto nas zonas florestais aparecem frequentemente associados a terrenos ondulados (IBGE, 2021). Os Argissolos, por sua vez, exibem uma forte conexão com afloramentos rochosos - presentes em cerca de 63% dos registros dessa classe - o que limita a profundidade efetiva das raízes e acelera o escoamento superficial em eventos de chuva intensa. Já os Plintossolos possuem uma associação quase exclusiva com o ambiente de savana (82% dos casos), ocorrendo majoritariamente em terrenos planos de baixa permeabilidade, onde a rochosidade do terreno atua como um elemento seletivo para a vegetação. A compreensão dessa tripla interação entre solo, relevo e cobertura vegetal é, portanto, o ponto de partida para interpretar os mapas de tipologia ambiental que ilustram a vulnerabilidade e a riqueza ecológica desse sistema fluvial.

Figura 5. Padrões pedológicos e de cobertura vegetal (2023) da bacia hidrográfica do rio Araguaia.



Fontes: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Projeto MapBiomias. Elaborado pelo autor (2026).

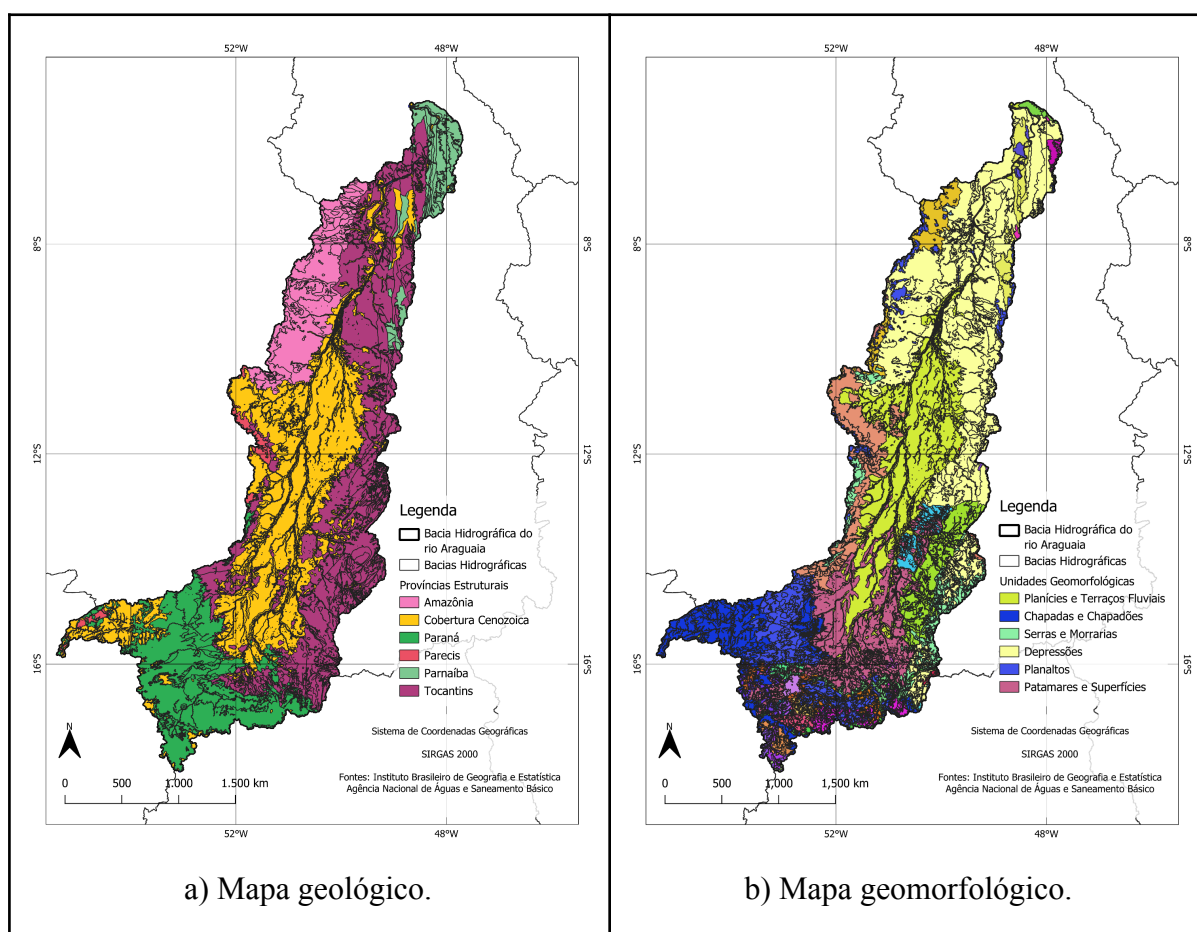
O embasamento geológico que sustenta a bacia do rio Araguaia funciona como o arcabouço rígido sobre o qual os processos hidrológicos e pedológicos se desenvolvem, definindo tanto a disponibilidade de minerais quanto a resistência do leito fluvial. De acordo com o Banco de Dados e Informações Ambientais (BDiA/IBGE), a compartimentação geológica deste território é dominada por três grandes domínios que, somados, respondem por mais de 80% da área mapeada (Figura 6). A Cobertura Cenozoica destaca-se como a unidade de maior expressão espacial, ocupando mais de 133 mil km² (34%), seguida de perto pela Província Tocantins, com 124.489 km² (32%), e pela Província Paraná, que abrange 62.000 km² (16%). Essa tríade geológica confere à bacia uma complexidade estrutural marcante. As coberturas cenozoicas e as bacias sedimentares - com destaque para os arenitos da Formação Botucatu na Província Paraná ao sul, e as menores expressões das bacias do Parnaíba (18 mil km²) e Parecis (3 mil km²) - fornecem uma expressiva carga de sedimentos e

oferecem materiais altamente suscetíveis ao intemperismo e à infiltração. Por outro lado, as províncias estruturais impõem rígidos controles litoestruturais que balizam a rede de drenagem e a morfologia das vertentes; nesse cenário, a Província Tocantins atua de forma protagonista como o embasamento rochoso de quase todo o médio e baixo curso do Araguaia, enquanto a expressão ocidental do Cráton Amazônico (28 mil km²) exerce influência delimitada na borda oeste do sistema.

Essa base litoestratigráfica manifesta-se na superfície através de uma compartimentação geomorfológica que condiciona diretamente o comportamento do ciclo hídrico e a resposta fluvial às precipitações. As características morfométricas e variações altimétricas da bacia, também sistematizadas pela plataforma BDIA/IBGE, revelam um cenário físico típico do Brasil Central, onde os compartimentos de relevo como depressões intermontanas, planaltos residuais e extensas superfícies interfluviais oscilam entre 300 e 1.150 metros de altitude. A aplicação de arquétipos geomorfométricos permite distinguir unidades de Chapadas e Planaltos, com amplitudes superiores a 800 metros, de áreas de Depressões Dissecadas e Serras (ROCHA et al., 2022). Enquanto as macroformas aplanadas de topo favorecem a infiltração profunda e a recarga estratégica de aquíferos, os compartimentos de declividade acentuada potencializam o escoamento superficial rápido e o transporte de sedimentos, evidenciando como a forma da terra dita a velocidade da água.

A dinâmica modeladora da paisagem altera-se sensivelmente ao longo do curso do rio, transitando de processos denudacionais predominantes nas cabeceiras para processos agradacionais no médio e baixo curso. Nos compartimentos mais elevados e nas depressões do Alto Araguaia, o intemperismo químico atua como principal agente de transformação, sendo fundamental para a formação de solos lateríticos profundos. Em contrapartida, as porções setentrionais e o médio curso são definidos por vastas planícies aluviais, como a Planície do Bananal (200 - 300 m) e a Planície Amazônica (0 - 100 m), áreas regidas pela sedimentação fluvial (BAYER, 2010; IBGE, 2021). Essas zonas de baixa energia funcionam como reservatórios naturais de amortecimento de cheias e áreas de acumulação de sedimentos, garantindo o equilíbrio do sistema hídrico e fornecendo subsídios geográficos para a interpretação dos mapas geológico e geomorfológico apresentados a seguir.

Figura 6. Caracterização geológica e geomorfológica da bacia hidrográfica do rio Araguaia.



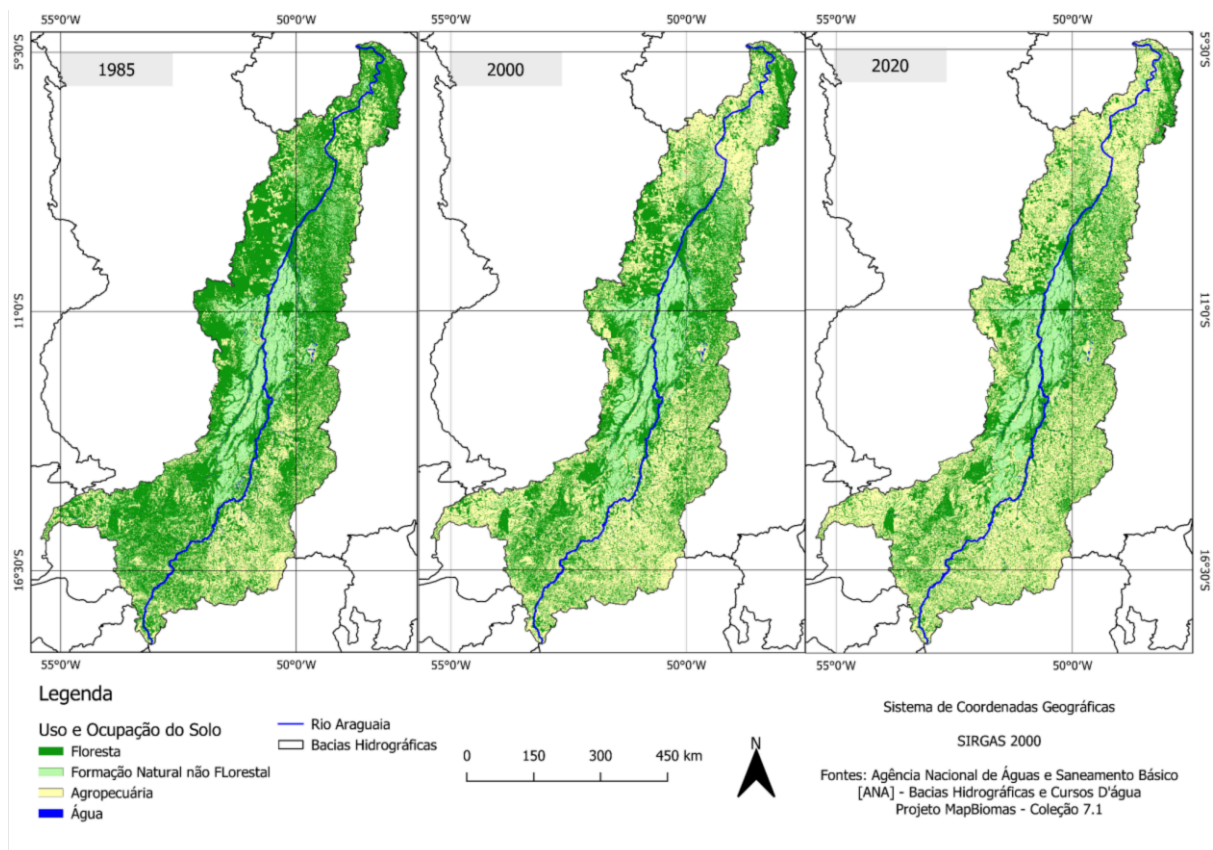
Fontes: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Elaborado pelo autor (2026).

A estabilidade dos processos físico-químicos e hidrológicos descritos anteriormente encontram-se, na contemporaneidade, sob a influência direta de uma reconfiguração drástica da cobertura da terra promovida pela expansão acelerada da fronteira agrícola. Na bacia do rio Araguaia, esse fenômeno de antropização não ocorre de forma isolada, mas como parte de um avanço sistêmico que converteu vastas extensões de vegetação nativa em áreas de uso intensivo, predominantemente pastagens e monoculturas mecanizadas (Figura 7). De acordo com os levantamentos históricos consolidados pela plataforma MapBiomas (2025), a pressão sobre a bacia intensificou-se significativamente nas últimas quatro décadas. Se em 1985 as áreas destinadas à agropecuária ocupavam aproximadamente 26% do território, os dados mais recentes de 2023 consolidam um cenário de profunda transformação, onde as áreas antropizadas já rivalizam em extensão com a cobertura natural remanescente.

A substituição de fitofisionomias complexas, como as matas de galeria e o cerrado *stricto sensu*, por coberturas simplificadas de pastagem - que atualmente ocupam mais de 15

milhões de hectares na bacia - compromete funções hidrológicas vitais para a manutenção dos fluxos de base. A redução da infiltração de água no solo e a diminuição das taxas de evapotranspiração real resultam em um aumento crítico do escoamento superficial direto, o que acelera o tempo de resposta das sub-bacias aos eventos de precipitação intensa (TUCCI, 2006). Como consequência direta dessa maior energia hidráulica na superfície, o transporte de sólidos torna-se mais agressivo, promovendo o carreamento de sedimentos das vertentes para o leito dos rios de forma desproporcional. Estudos conduzidos por Bayer e Zancopé (2014) já documentar o processo de assoreamento acelerado do canal principal decorrente desse padrão de uso do solo, evidenciando que a geometria fluvial do Araguaia está sendo forçado a se ajustar a uma carga sedimentar superior à sua capacidade natural de transporte. Tal desequilíbrio morfológico compromete a qualidade da água e a resiliência da biodiversidade aquática, tornando indispensável a observação detalhada da evolução temporal e espacial dessas classes de uso apresentadas na Tabela 2 e nos mapeamentos subsequentes.

Figura 7. Uso e Ocupação da bacia hidrográfica do rio Araguaia.



Fontes: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Projeto MapBiomias.

Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 2. Estatísticas de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Araguaia.

Ano/Classes	Floresta (%)	Agropecuária (%)	Formação Natural não Florestal (%)
1985	59,19	26,34	12,97
2000	43,83	42,67	12,31
2020	36,69	50,40	11,82

Fonte: Projeto MapBiomass. Elaborado pelo autor (2026).

A convergência entre a acelerada ocupação antrópica e as incertezas inerentes às projeções climáticas globais estabelece um cenário de vulnerabilidade que desafia a governança tradicional dos recursos naturais (IPCC, 2007). No caso específico do Araguaia, a manutenção da resiliência hídrica depende criticamente da capacidade técnica de monitorar e prever como as flutuações na precipitação e na cobertura da terra se traduzem em variações reais de vazão e transporte de sedimentos. Embora a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), coordenada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), constitua o alicerce fundamental para a observação sistemática do território brasileiro, sua operacionalidade é frequentemente comprometida por lacunas temporais nas séries históricas e por uma fragmentação institucional que dificulta a integração integral dos dados (SUIZU et al., 2022; ANA, 2024). Essas interrupções no fluxo de informações impedem uma análise contínua sobre a sensibilidade do sistema fluvial, tornando complexa a distinção entre os efeitos da variabilidade climatológica natural e as mudanças hidrológicas induzidas pelo uso do solo (COE et al., 2011). Tal cenário de incerteza técnica exige a aplicação de procedimentos rigorosos de qualificação e o uso de ferramentas multidisciplinares, fundamentais para assegurar que a gestão do Araguaia seja pautada em dados que reflitam a real magnitude das transformações ambientais em curso em toda a sua extensão.

2.2 BASE DE DADOS

A estruturação do inventário geoespacial e a análise subsequente da bacia hidrográfica do rio Araguaia exigiram a mobilização de um conjunto robusto de dados vetoriais e matriciais, todos provenientes de repositórios públicos oficiais para assegurar a reprodutibilidade e o rigor estatístico necessários à pesquisa de mestrado. A delimitação das fronteiras políticas e das unidades de gestão hídrica fundamentou-se nas malhas digitais do

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, respeitando a codificação de Otto Pfafstetter em nível 2, conforme as diretrizes do Plano Nacional de Recursos Hídricos. Para a caracterização física, recorreu-se ao Bando de Dados e Informações Ambientais (BDiA/IBGE), onde o atributo de domínios geomorfológicos permitiu agrupar a complexidade litológica em domínios estruturais mais legíveis para a escala regional, enquanto o atributo de unidades geomorfológicas foi submetido a uma generalização cartográfica estratégica. Este processamento resultou na definição de seis classes geomorfológicas - Planícies e Terraços Fluviais, Depressões, Chapadas e Chapadões, Planaltos, Serras e Morrarias, e Patamares e Superfícies - que alinham a legenda aos arquétipos geomorfométricos discutidos na literatura contemporânea sobre o Cerrado. Essa padronização é essencial para entender como a arquitetura do terreno condiciona o fluxo superficial antes mesmo da entrada dos dados climáticos.

A componente hidrometeorológica, que constitui o cerne analítico da investigação, foi extraída do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), operado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), com foco nas séries históricas disponibilizadas pelo portal HidroWeb. Diferente de abordagens que privilegiam apenas totais mensais ou anuais, este estudo priorizou o processamento de dados em escala diária, permitindo a identificação sistemática de eventos extremos de precipitação, definidos aqui como chuvas superiores a 50mm/dia¹, e o cálculo de médias móveis para captar a variabilidade intra-sazonal. Estes registros, alguns com profundidade temporal que remonta à década de 1940, oferecem a densidade necessária para o emprego de algoritmos de nuvem de pontos, ainda que tenham exigido um tratamento prévio rigoroso para o preenchimento de lacunas e correções de inconsistências. Complementarmente, foram integrados dados climáticos do projeto WorldClim (versão 2.1), que serviram de suporte para a espacialização de isoietas e para a validação da representatividade espacial da rede terrestre frente aos gradientes de umidade da região. A profundidade histórica desses dados é o que permite confrontar a variabilidade climática natural com as intervenções humanas recentes.

¹Nota: O limiar de 50mm/dia para a definição de evento pluviométrico extremo foi estabelecido por escolha metodológica do autor, fundamentando-se no comportamento histórico da precipitação na bacia do rio Araguaia.

No que se refere à representação altimétrica e à análise da declividade, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM/NASA), com uma resolução espacial de 30 metros, processado em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Paralelamente, a dinâmica do uso e ocupação do solo foi mapeada através da coleção mais recente do projeto MapBiomias, que classifica a cobertura terrestre em categorias como floresta, pastagem e agricultura. O cruzamento dessas informações temporais com a localização estratégica das estações pluviométricas permitiu avaliar a “economia dos dados”, discutindo-se como a conversão de mais da metade da vegetação nativa da bacia impacta a confiabilidade do monitoramento e a capacidade de resposta hidrológica face às pressões da fronteira agrícola. Esta integração entre o esqueleto físico do relevo e a pele dinâmica do uso do solo revela as fragilidades do monitoramento institucional.

A integração de todas essas camadas de informação foi executada no *software* QGIS, assegurando a compatibilidade através da projeção de todos os ficheiros para o sistema de referência SIRGAS 2000. Este reforço de sistematização não se limitou à produção cartográfica, envolvendo também a organização de planilhas estruturadas que reúnem metadados das estações e índices de continuidade e estatísticas descritivas do regime pluviométrico. A seleção final das estações aptas para a modelagem seguiu critérios técnicos de periodicidade e atualidade, garantindo que as tendências identificadas reflitam o cenário climático contemporâneo e forneçam subsídios reais para a gestão hídrica. Desta forma, a base de dados constitui-se como um arranjo multidisciplinar que conecta a geologia de base, o relevo esculpido e a dinâmica atmosférica com as transformações impostas pelo homem, preparando o terreno para os procedimentos de modelagem e qualificação subsequentes.

2.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A execução desta pesquisa fundamenta-se em um arranjo metodológico que integra o processamento computacional de séries temporais à análise geoespacial, sendo uma adaptação de protocolos previamente consolidados na literatura para aquisição de dados e estudos climáticos (COSTA et al., 2016; NASCIMENTO et al., 2021), visando transformar a massa de dados brutos da Rede Hidrometeorológica Nacional em subsídios técnicos fidedignos para a gestão hídrica da bacia do Araguaia. A arquitetura dos procedimentos foi desenhada para superar as limitações impostas por falhas operacionais e inconsistências

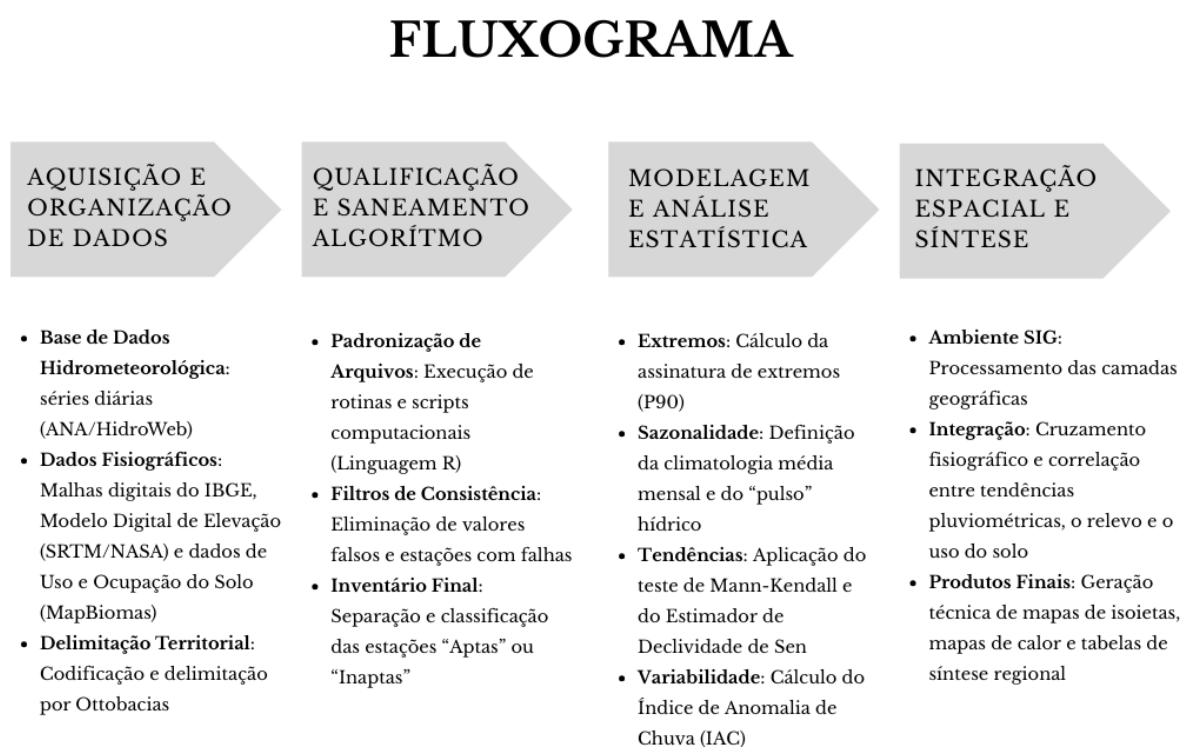
históricas, utilizando a linguagem R como ambiente de desenvolvimento de rotinas automatizadas que asseguram a reprodutibilidade dos resultados. O percurso analítico inicia-se com a estruturação de um inventário sistemático que identificou, inicialmente, um universo total de 209 estações pluviométricas distribuídas pela bacia do rio Araguaia. A partir desse montante, a pesquisa avança para estágios rigorosos de qualificação algorítmica, onde cada registro diário é submetido a filtros de consistência física antes de integrar os modelos de tendência pluviométrica. Esta abordagem multidisciplinar permite que a investigação transcenda a simples descrição numérica, conectando a dinâmica das chuvas às transformações de uso do solo e às unidades de relevo da bacia, o que exige uma infraestrutura de processamento capaz de lidar com a densidade de informações acumuladas desde a década de 1940.

O primeiro estágio crítico da metodologia (Figura 8) compreende o saneamento e a padronização das séries históricas extraídas do portal HidroWeb/ANA, alinhando-se às abordagens de tratamento de dados hidrometeorológicos aplicadas na região por GOMES et al. (2019). Esta tarefa foi executada através de scripts customizados para a leitura de arquivos em formato tabular que preservam a estrutura original de metadados. Durante o processamento, instituiu-se a criação de um calendário completo para cada estação, permitindo a identificação exata de lacunas temporais e a conversão de registros fragmentados em séries diárias contínuas que servem de base para o cálculo de indicadores de extremos. A detecção de anomalias físicas foi priorizada através de uma triagem de valores suspeitos, na qual se estabeleceram limiares de alerta (150mm) e erro (400 mm) para isolar registros que pudessem distorcer a realidade climatológica da região por falhas instrumentais ou de digitação. Este refinamento técnico culmina na aplicação de um critério de exclusão definitivo, onde apenas anos com pelo menos 330 dias de medições válidas são admitidos para a modelagem, garantindo que as médias anuais e as tendências de longo prazo não sejam enviesadas por falsas secas induzidas pela ausência de dados.

Com a base de dados devidamente qualificada e as estações classificadas conforme sua aptidão técnica - definida pelo limite rigoroso de 10% de falhas acumuladas -, os procedimentos avançam para a fase de análise estatística direcional e espacialização. A aplicação do teste não-paramétrico de Mann-Kendall e do Estimador de Declividade de Sen (ou Sen's Slope), adaptada dos procedimentos validados internacionalmente por Aditya et al. (2012), permite quantificar a magnitude das variações pluviométricas em cada sub-bacia, associando-as à "assinatura" de agressividade da chuva determinada pelo Percentil 90 (P90) individualizado. Complementarmente, o Índice de Anomalia de Chuva (IAC), baseado na

estruturação demonstrada por Araújo et al. (2009), é empregado para normalizar a variabilidade interanual, facilitando a identificação de ciclos de escassez ou abundância que caracterizam a resposta hidrológica do sistema Araguaia frente às pressões da fronteira agrícola. A integração final desses produtos estatísticos em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o *software* QGIS e o sistema de referência SIRGAS 2000, viabiliza a geração de mapas de tendência e isoietas que consolidam o diagnóstico ambiental necessário para a gestão resiliente dos recursos naturais no Brasil Central.

Figura 8. Fluxograma metodológico do processamento, qualificação e análise estatística dos dados pluviométricos.



Fonte: Organizado pelo autor (2026).

2.3.1 AQUISIÇÃO E ORGANIZAÇÃO DE DADOS

O estágio inicial da execução metodológica compreendeu a sistematização técnica do acervo coletado, estabelecendo o fluxo de entrada necessário para o processamento automatizado em ambiente computacional. A partir das fontes institucionais de

monitoramento, estruturou-se um inventário quantitativo que identificou, em primeira instância, um universo total de 209 estações pluviométricas localizadas nos limites da bacia do rio Araguaia. Este procedimento envolveu o download sistemático das séries diárias brutas via portal HidroWeb/ANA, seguido da padronização de diretórios locais e da nomeação rigorosa dos arquivos em formato CSV para assegurar a compatibilidade absoluta com as rotinas de leitura desenvolvidas em Linguagem R. Tal nível de organização preliminar é o que garante que o fluxo de processamento não sofra interrupções por metadados inconsistentes, permitindo que a pesquisa avance da simples posse do dado bruto para a construção de uma base monitorada passível de auditoria técnica e reprodutibilidade científica.

Paralelamente ao levantamento hidrometeorológico, a etapa de aquisição estendeu-se aos parâmetros geográficos que ditam a variabilidade física e a resposta hidrológica do território. Recorreu-se às malhas digitais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para consolidar a delimitação política e as fronteiras das sub-bacias de nível 2, estabelecendo a moldura territorial estratégica onde as 209 estações estão inseridas. A essa base, somaram-se as informações altimétricas provenientes da missão SRTM/NASA, com resolução espacial de 30 metros, e o mapeamento histórico do uso e ocupação do solo fornecido pelo projeto MapBiomas. A integração desses diferentes planos de informação em uma arquitetura de dados unificada permitiu que cada ponto de monitoramento fosse espacialmente relacionado às suas características de relevo e cobertura vegetal, preparando as condições fundamentais para que os algoritmos subsequentes identifiquem correlações complexas entre a declividade, a altitude e a perda de resiliência hídrica observada ao longo das últimas décadas.

2.3.2 SANEAMENTO E QUALIFICAÇÃO ALGORÍTMICA

A transição da massa de dados brutos para uma base de informações cientificamente aproveitável constitui o cerne operacional desta pesquisa, sendo aplicada sobre o levantamento inicial de 209 estações por meio de uma sucessão de rotinas em Linguagem R projetada para garantir a integridade das séries históricas. O processo inicia-se com a leitura automatizada dos arquivos em formato CSV provenientes do portal HidroWeb/ANA, nos quais se instituiu o salto técnico das primeiras 13 linhas de cabeçalho para o acesso direto à matriz de dados. Através do Script 1, os registros originais, estruturados em colunas de dias, foram convertidos de um formato “largo” para uma estrutura “longa” (pivoteamento),

permitindo a criação de uma linha temporal contínua onde cada data do calendário é representada de forma única. Esta etapa é fundamental para a criação de um calendário completo que preenche lacunas temporais não registradas, assegurando que períodos sem monitoramento sejam devidamente identificados como “Falha” e não omitidos, o que evita a subestimação sistemática das médias pluviométricas.

Para lidar com a fragilidade dos registros históricos, foi implementada uma triagem de consistência física por meio do Script 2, focada na detecção de anomalias que extrapolam a plausibilidade meteorológica regional. Foram estabelecidos limiares de controle rigoroso: registros superiores a 150 mm/dia foram classificados como “Alerta”, enquanto valores acima de 400 mm/dia foram categorizados como “Crítica”. Essa caça ao erro permitiu identificar inconsistências graves, como o registro ilegítimo de 888 mm em um único dia na estação de Tesouro (MT), evidenciando falhas instrumentais ou de digitação que distorceram qualquer análise estatística subsequente. Complementarmente, o algoritmo identificou e isolou valores negativos, fisicamente impossíveis no contexto da precipitação, consolidando um relatório de suspeitas que serviu de base para a limpeza final dos dados.

A etapa de refinamento definitivo, executada pelo Script 3, aplicou um filtro de corte conservador de 300 mm/dia, convertendo qualquer registro acima deste valor em dado ausente (NA) para preservar a variabilidade natural e remover ruídos estatísticos severos. Sobre esta base limpa, instituiu-se o que se denomina como a “Regra de Ouro” da qualificação: a exigência de que cada ano possua, no mínimo, 330 dias de medições válidas para ser admitido no cálculo das médias e tendências. Este critério impede que anos com grandes janelas de falha sejam interpretados erroneamente como anos secos, garantindo que a modelagem da dinâmica hídrica reflita a real assinatura climática do Araguaia.

A conclusão deste saneamento algorítmico permitiu a classificação final da rede de monitoramento entre unidades estatisticamente Aptas e Inaptas, estabelecendo um funil de qualidade que assegura a fidedignidade das análises subsequentes. Utilizando as rotinas de filtragem e organização automatizadas (Scripts 4 e 5), as unidades foram submetidas ao critério rigoroso de um limite máximo de 10% de falhas acumuladas para o período histórico total. Este rigor metodológico resultou na exclusão de estações que apresentavam séries fragmentadas ou descontinuadas, reduzindo o inventário inicial de 209 pontos identificados na bacia para um conjunto qualificado de 91 estações. Longe de representar uma perda de densidade informativa, esse refinamento para aproximadamente 43,5% da rede bruta constitui uma salvaguarda técnica indispensável, garantindo que o cálculo do Percentil 90 (P90) e a aplicação dos testes de Mann-Kendall e Sen’s Slope reflitam assinaturas climáticas reais e

não artefatos de dados induzidos por lacunas temporais. Esta base de dados purificada serve, portanto, como o alicerce para a modelagem estatística detalhada no tópico subsequente, onde a agressividade da chuva e as anomalias históricas passam a ser o foco da investigação.

2.3.3 MODELAGEM ESTATÍSTICA E ASSINATURA DE EXTREMOS

Com a base de dados consolidada em 91 estações qualificadas para o período entre 1975 e 2023, os procedimentos avançam para a fase de modelagem, onde o objetivo central é decifrar a fenomenologia das chuvas para além dos simples totais acumulados anuais. A análise da “assinatura” pluviométrica inicia-se com a definição da magnitude dos eventos extremos, utilizando o cálculo estatístico do Percentil 90 (P90) individualizado por ponto de monitoramento. Através dos Scripts 1 e 3, o P90 foi extraído considerando-se exclusivamente os dias chuvosos (precipitação > 0 mm), permitindo identificar o limiar a partir do qual a chuva assume um caráter de agressividade em cada sub-bacia. Essa métrica é fundamental para capturar a concentração temporal das tempestades, distinguindo regiões onde o regime é marcado por pancadas severas daquelas com chuvas mais estratiformes e distribuídas, fornecendo o diagnóstico necessário para entender a resposta hidrológica frente aos picos de vazão e aos processos erosivos das vertentes.

Para diagnosticar se as alterações observadas na bacia constituem flutuações cíclicas ou mudanças estruturais de longo prazo, aplicou-se um conjunto de testes estatísticos não-paramétricos, escolhidos por sua robustez frente a dados que não seguem uma distribuição normal. O teste de Mann-Kendall (MK) foi empregado para detectar a presença de tendências significativas, utilizando o nível de confiança de 95% ($p < 0,05$) como critério para atestar a retração ou o aumento da pluviosidade. Complementarmente, o Estimador de Declividade de Sen (Sen's Slope) foi utilizado para quantificar a magnitude dessa variação, determinando a taxa exata de milímetros perdidos ou ganhos por ano em cada trecho do Araguaia. Essa modelagem direcional permite rastrear a “mancha de ressecamento” mencionada na literatura e verificar como o coeficiente Tau de Kendall se comporta ao longo do gradiente latitudinal, o que evidencia as fragilidades internas de um sistema que opera sob diferentes regimes termodinâmicos.

A variabilidade interanual e a severidade dos ciclos hidrológicos foram avaliadas por meio do Índice de Anomalia de Chuva (IAC), conforme a metodologia proposta por Rooy (1965). Este índice permite normalizar as precipitações anuais em graus de intensidade, classificando os anos em categorias que variam de “Muito Úmido” a “Muito Seco”, o que

facilita a visualização histórica das fases climáticas da bacia. A modelagem do IAC foi blindada por um filtro metodológico rigoroso, extraído das rotinas do Script 5, que contabilizou apenas os anos com a “Regra de Ouro” de no mínimo 330 dias de medições válidas. Ao confrontar a média dos 10% dos anos mais chuvosos com os 10% mais secos, o cálculo do IAC expõe a transição definitiva entre o período de alta recarga observado no final do século XX e o bloco contínuo de escassez hídrica estabelecido após 2007.

A integração desses modelos estatísticos com a realidade física do terreno permite que a pesquisa transcenda a métrica numérica para alcançar uma interpretação sistêmica. A análise das assinaturas sazonais e dos índices de constância e intermitência pluviométrica - sintetizados visualmente por mapas de calor nos resultados - revela como o “pulso” hídrico regional responde a fenômenos de teleconexão climática e à remoção da rugosidade vegetal. Esse arcabouço matemático fornece os subsídios técnicos necessários para que a caracterização da bacia do Araguaia abandone premissas de estacionariedade morta e adote modelos adaptativos de gestão. Tais procedimentos preparam o cenário para o cruzamento final entre as tendências calculadas e os arquétipos geomorfométricos, etapa que será detalhada na integração geoespacial e síntese da pesquisa.

2.3.4 INTEGRAÇÃO GEOESPACIAL E SÍNTESE

A etapa final dos procedimentos metodológicos consiste na espacialização das métricas calculadas e no cruzamento sistemático de tendências pluviométricas com os planos de informação fisiográfica e de uso do solo. Toda a integração de dados e a produção cartográfica foram executadas no *software* QGIS, assegurando a compatibilidade entre as camadas através da projeção para o sistema de referência SIRGAS 2000. Esta fase transcende a representação visual, configurando-se como uma análise que busca identificar se os epicentros de redução hídrica possuem um “endereço” geográfico preferencial vinculado às unidades de relevo ou ao avanço da fronteira agrícola. A utilização de ferramentas de geoprocessamento permitiu converter dados pontuais das estações em superfícies de gradiente contínuo, facilitando a interpretação da “mancha de ressecamento” que percorre a calha principal do Araguaia.

A análise da influência do relevo sobre a dinâmica das chuvas fundamentou-se na integração dos resultados do Estimador de Declividade de Sen com o Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente da missão SRTM/NASA. Através da extração de valores altimétricos para cada ponto de monitoramento, foi possível estabelecer correlações

estatísticas entre a altitude e a magnitude das tendências, testando a hipótese do “secamento do topo” nas áreas de recarga estratégica. Este procedimento é essencial para compreender como a compartimentação geomorfológica atua como um filtro que condiciona a entrada de umidade no sistema, permitindo distinguir o comportamento das chapadas elevadas frente às planícies aluviais de baixa altitude.

Adicionalmente, a dinâmica do uso e ocupação do solo foi sobreposta às tendências temporais para avaliar o peso da antropização na alteração do regime hídrico. Utilizando as coleções históricas do projeto MapBiomas, o estudo classificou as estações conforme o status da paisagem em dois recortes temporais estratégicos: 1985 (linha base) e 2023 (cenário atual). O cruzamento dessas informações permitiu quantificar a “economia dos dados”, discutindo-se como a conversão de mais da metade da vegetação nativa para atividades agropecuárias impacta a confiabilidade do monitoramento e a capacidade de resposta termodinâmica da bacia.

Os procedimentos culminaram na sistematização dos resultados em arquivos geoespaciais e tabelas de síntese regional, organizadas por sub-bacias conforme a codificação da ANA. Este reforço de integração permite que a pesquisa forneça subsídios técnicos reais para a concessão de outorgas e para o fortalecimento da governança das águas, garantindo que o diagnóstico reflita a complexa conectividade entre o comportamento pluviométrico das cabeceiras e a integridade ecológica das planícies de inundação do Araguaia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fase inicial de consolidação dos dados revelou-se um estágio crítico para a viabilidade da pesquisa, evidenciando que a massa de dados brutos proveniente do portal HidroWeb/ANA, embora volumosa, exigia um rigoroso processo de saneamento de algoritmo antes de qualquer modelagem espacial. A utilização de rotinas computacionais automatizadas permitiu a padronização de centenas de arquivos tabulares que apresentavam inconsistências estruturais, como variações em codificações de caracteres e lacunas temporais não registradas, transformando registros fragmentados em séries diárias contínuas. Durante esse processamento, observou-se que a simples extração de médias mensais poderia mascarar falhas de registro profundas, o que reforçou-se a necessidade de uma análise detalhada no

nível diário para garantir a integridade dos resultados estatísticos subsequentes (ANA, 2024; WMO, 2008).

A detecção de valores atípicos e erros de consistência física foi um dos pontos mais sensíveis observados nesta etapa de tratamento preliminar, expondo a fragilidade de alguns registros históricos que remontam à década de 1940. A dispersão dos dados brutos revelou a presença de anomalias que extrapolam qualquer limite de plausibilidade meteorológica para a bacia do Araguaia. Um exemplo emblemático dessa necessidade de limpeza foi a identificação de um registro de precipitação de 888 mm em um único dia na estação 1653000 (em Tesouro, MT), além de outros eventos superiores a 400 mm classificados como de severidade “crítica”. Tais valores indicam falhas instrumentais ou erros humanos de digitação que, se não removidos, distorceram severamente o cálculo do Percentil 90 (P90) e as análises de tendências de longo prazo (SUIZU et al., 2022; TUCCI, 2006).

No tratamento dessas inconsistências, adotou-se uma distinção técnica entre o que representa um ruído estatístico e o que constitui um evento extremo natural, essencial para responder ao questionamento da bacia sobre “como chove” na região. Os registros categorizados como “alerta” (entre 150 mm e 300 mm) foram criteriosamente mantidos na base de dados, pois, embora excepcionais, são fisicamente possíveis no bioma Cerrado e fundamentais para caracterizar a magnitude das chuvas intensas. Por outro lado, instituiu-se um limiar de corte de 300 mm para a limpeza final, convertendo registros superiores a esse valor em dados ausentes, garantindo que a modelagem subsequente seja regida por uma variabilidade real e não por artefatos de dados que comprometeriam a fidedignidade da resposta hidrológica da bacia.

A aplicação de critérios de aptidão, baseados em um limite de 10% de falhas totais na série histórica, funcionou como um divisor de águas para a qualidade do inventário final. Muitas estações que geograficamente pareciam preencher vazios de monitoramento foram descartadas por representarem baixa continuidade ou interrupções operacionais prolongadas, o que reduziu o número de estações efetivamente “aptas” em relação ao total inicialmente disponível na rede nacional. Esse filtro estatístico foi fundamental para que a pesquisa avançasse apenas com séries que possuíssem representatividade real, permitindo que o cálculo do P90 individualizado por estação refletisse a verdadeira “assinatura” chuvosa de cada localidade, desde as cabeceiras no sudoeste goiano até a foz no Pará (AQUINO, et al., 2009; FICK; HIJMANS, 2017).

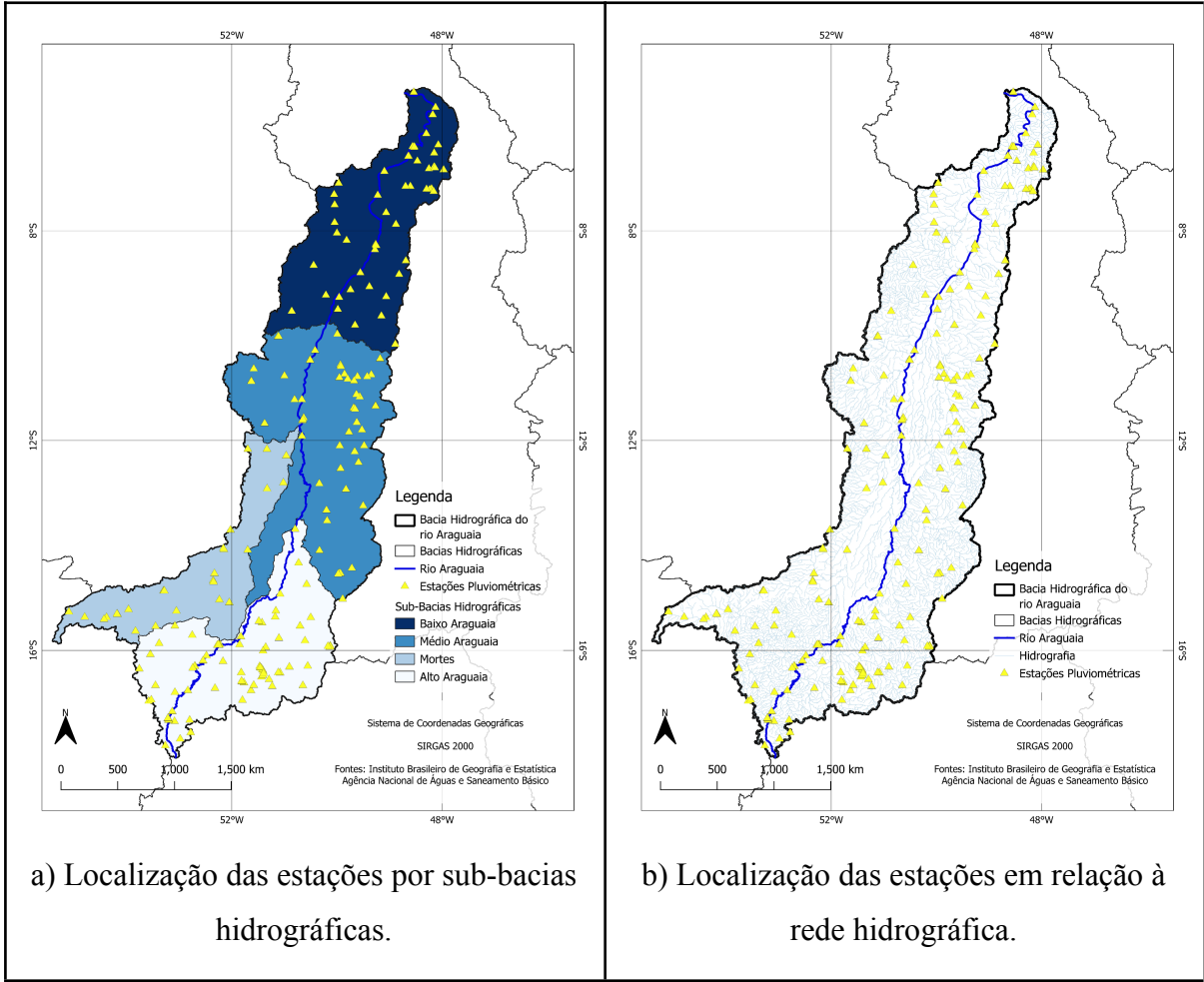
Ao final desta consolidação, os resultados gerados pelos scripts demonstraram que a rede de monitoramento da bacia do Araguaia não é apenas um conjunto de pontos no mapa,

mas um sistema heterogêneo onde a disponibilidade da informação é tão variável quanto o próprio clima. A organização desses registros em planilhas estruturadas e a geração de mapas de calor sobre a disponibilidade de dados abriram caminho para uma discussão mais profunda sobre a distribuição estratégica dessas estações frente às transformações do uso do solo observadas pelo MapBiomias. Essa base saneada e qualificada fornece agora o suporte necessário para investigar a “economia dos dados” e a dinâmica hídrica regional, temas que serão aprofundados no subtópico seguinte por meio da análise detalhada da distribuição espacial e da densidade da rede de monitoramento (LATRUBESSE et al., 2019; PROJETO MAPBIOMAS, 2025).

3.1 INVENTÁRIO E QUALIFICAÇÃO DA REDE: A “ECONOMIA DOS DADOS”

A análise detalhada do inventário de estações pluviométricas na bacia do rio Araguaia revela, inicialmente, um cenário de contrastes que define o que se pode chamar de “economia dos dados” hídricos na região. Embora o levantamento aponte a existência de 209 estações pluviométricas distribuídas por uma área total de 386.000 km² (Figura 9), a distribuição espacial desses pontos é marcadamente heterogênea, criando um paradoxo onde a abundância numérica não se traduz necessariamente em cobertura informativa eficiente. A sub-bacia do Alto Araguaia, por exemplo, concentra a maior densidade da rede, com 76 estações para uma área de 92.786 km², resultando em uma densidade de aproximadamente 0,82 estações por 1.000 km² (Tabela 3), o que reflete a pressão histórica de ocupação e a necessidade de monitoramento em áreas de cabeceira e expansão agrícola intensiva. Em contrapartida, a sub-bacia do rio das Mortes, com 27 estações para 61.429 km² apresenta uma densidade significativamente menor, de apenas 0,44 estações por 1.000 km², expondo lacunas críticas que podem comprometer a detecção de variações locais de precipitação e a gestão de recursos hídricos em zonas de transição ecológica (ANA, 2024; IBGE, 2021).

Figura 9. Distribuição espacial das estações pluviométricas inventariadas na bacia do rio Araguaia.



Fontes: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 3. Distribuição espacial densidade de estações pluviométricas por sub-bacia.

Bacia/Sub-Bacia	Estações	Estações (%)	Área (km ²)	Estação/1.000 km ²
Araguaia	209	100	386.000	0,54
Alto Araguaia	76	36,4	92.786	0,82
Mortes	27	12,9	61.420	0,44
Médio Araguaia	53	25,4	126.222	0,42

Baixo Araguaia	53	25,4	103.798	0,51
----------------	----	------	---------	------

Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

Essa desigualdade na rede de monitoramento é acentuada quando se confronta a disponibilidade bruta de estações com a sua aptidão técnica para modelagem de longo prazo, uma vez que o processamento algorítmico demonstrou que apenas 91 estações - cerca de 43,5% do total inventariado - são efetivamente aptas para a pesquisa. Este filtro, baseado no limite rigoroso de 10% de falhas acumuladas, revelou que muitas unidades operam com séries extremamente fragmentadas ou descontinuadas, como observado na Tabela 4 com a estação 1753003 (Cachoeira Grande, MT), que apresenta 100% de falhas no período analisado, ou a 1049000 (Pium, TO), descartada pelo critério de 10,68% de inconsistências. Esse saneamento estatístico foi indispensável para assegurar que os resultados subsequentes não fossem enviesados por “vazios” de informação disfarçados de registros ativos, permitindo, conforme demonstrado na comparação espacial entre a rede bruta e a qualificada (Figura 10), uma transição segura da descrição quantitativa para a análise científica da dinâmica hídrica (AQUINO et al., 2009; WMO, 2008).

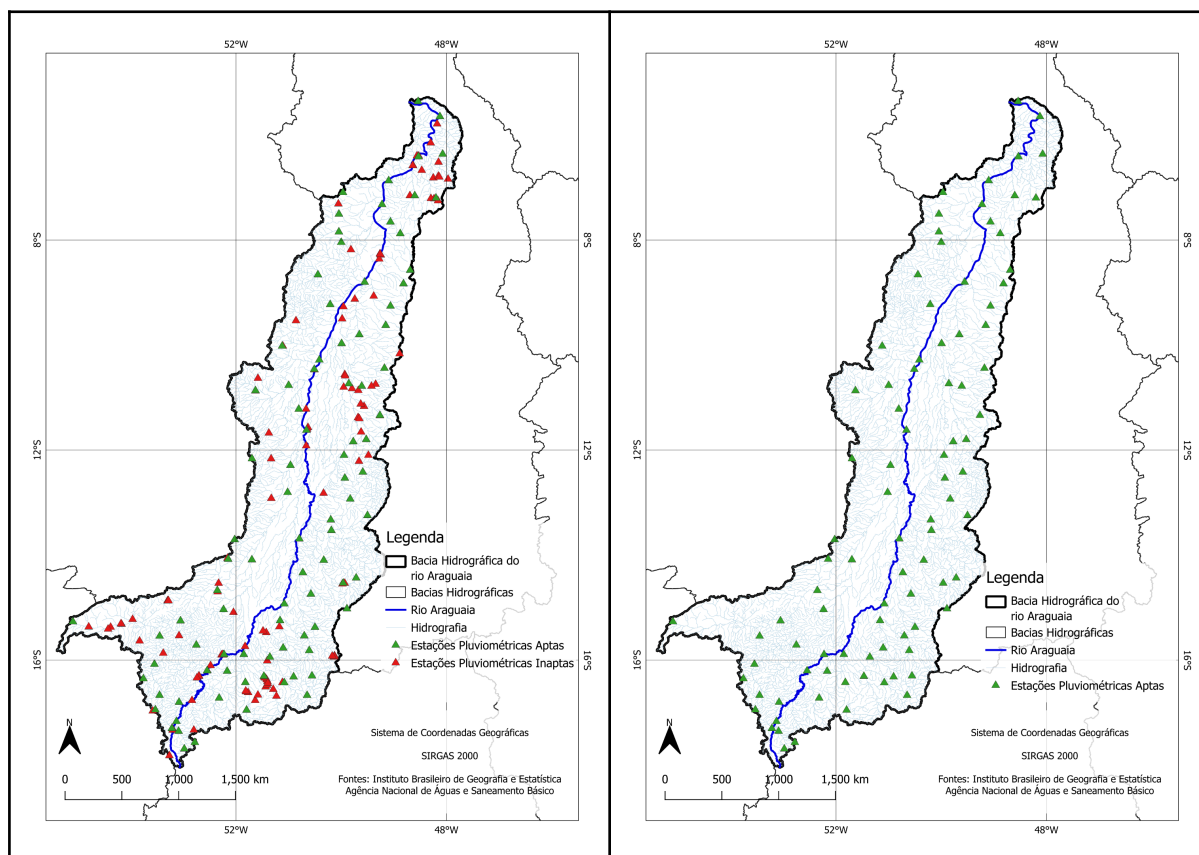
Tabela 4. Metadados e qualificação de amostra das estações pluviométricas.

Código	Nome da Estação	Operador	Início	Falha (%)	Status	P90 (mm)
749002	XINGUARA	CPRM	1984	7,60	APTA	37,0
949000	ABREULÂNDIA	CPRM	1973	2,76	APTA	40,0
1653000	TESOURO	CPRM	1971	5,02	APTA	37,6
1753003	CACHOEIRA GRANDE	ANA	1977	100,00	INAPTA	0,0
1049000	PIUM (ANTIGA)	CPRM	1969	10,68	INAPTA	33,3

Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

Figura 10. Mapas de distribuição espacial comparativa: Redes Inventariada e Qualificada (Aptas).



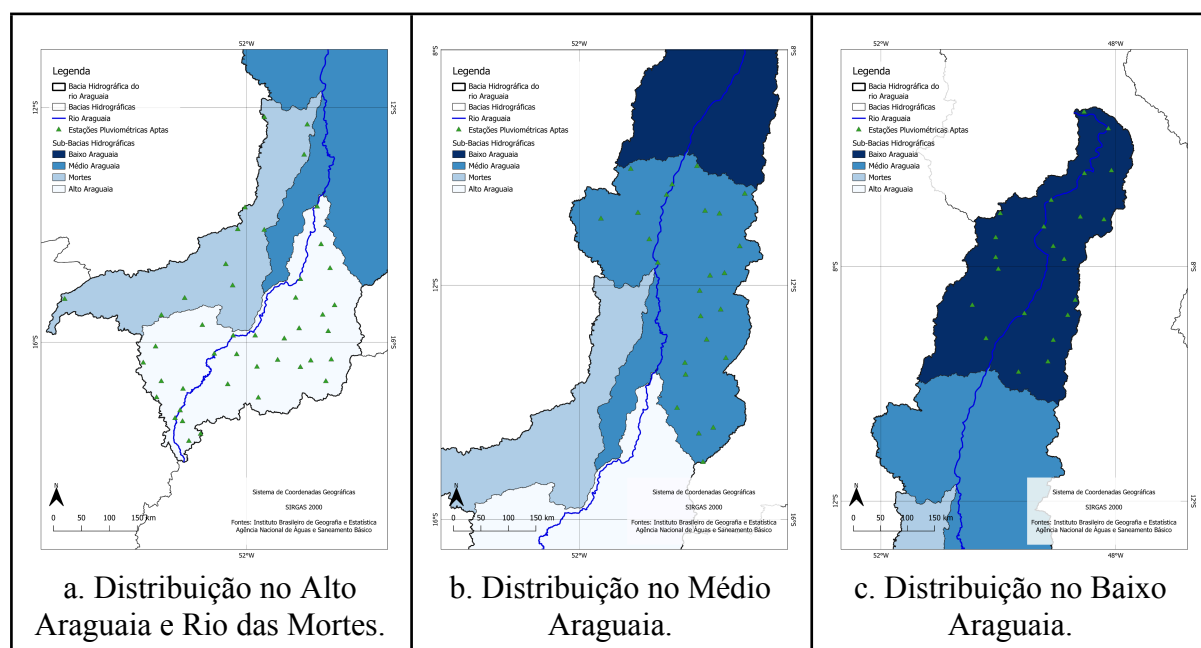
Fontes: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Elaborado pelo autor (2026).

A partir do saneamento físico detalhado na etapa inicial de tratamento, a manutenção criteriosa dos registros de “alerta” (entre 150 mm e 300 mm) garantiu que a base de dados qualificada preservasse a sensibilidade necessária para captar a variabilidade natural de eventos extremos do Cerrado, sem as distorções causadas por ruídos instrumentais. Essa distinção técnica permitiu consolidar o Percentil 90 (P90) como uma métrica de alta confiabilidade para o universo das 91 estações selecionadas como aptas. Dessa forma, assegurou-se que o mapeamento subsequente das assinaturas de chuvas intensas refletisse com precisão os diferentes padrões hidroclimáticos existentes ao longo da calha do Araguaia, servindo como uma estrutura metodológica blindada contra subestimações ou superestimações da resposta hidrológica regional nas etapas de modelagem

A integração dessas 91 estações qualificadas com as características fisiográficas da bacia revela que as áreas de maior densidade de monitoramento coincidem, em grande parte, com as Chapadas e Planaltos do sul goiano e mato-grossense. Como observado nos detalhes

da Figura 11, a robustez do monitoramento é uma resposta direta à demanda por segurança hídrica na produção de commodities, enquanto as áreas rebaixadas de Depressão e as Planícies aluviais ao norte, que abrigam vastos Territórios Indígenas e Unidades de Conservação, permanecem sob um regime de escassez de dados qualificados. Esse cenário sugere que a infraestrutura de monitoramento segue uma lógica mais econômica do que ambiental, o que torna a qualificação das séries históricas existentes ainda mais vital para entender como a perda da vegetação nativa está alterando a resposta hidrológica nessas áreas menos assistidas.

Figura 11. Detalhamento espacial da rede de monitoramento qualificada.



Fontes: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Elaborado pelo autor (2026).

Dessa forma, o inventário refinado e a análise da economia dos dados preparam o terreno para as etapas de espacialização e aplicação dos testes de tendência de Mann-Kendall sobre os arquétipos geomorfométricos da bacia. A compreensão de que o Alto Araguaia apresenta padrões de precipitação mais intensos e concentrados (Tabela 5) é reforçada pela robustez das séries de 50 anos identificadas em estações estratégicas como a 949000 (Abreulândia, TO) e a 848002 (Itaporã do Tocantins, TO). Tais séries fornecem a densidade temporal necessária para investigar se os eventos extremos mantidos na base estão, de fato, tornando-se mais frequentes ou se a bacia atravessa ciclos de variabilidade natural

exacerbados pelas mudanças no balanço de energia local causadas pelo desmatamento (LATRUBESSE et al., 2019; PROJETO MAPBIOMAS, 2025).

Tabela 5. Síntese do gradiente pluviométrico (extremos) das estações qualificadas.

Categoria	Estação	Município	Média Anual (mm)	Período
Máximas	749002	Xinguara (PA)	2121,0	1984-2025
	949000	Abreulândia (TO)	2060,5	1974-2025
	949001	Dois Irmãos (TO)	2042,3	1974-2025
Mínimas	1650000	Cachoeira de Goiás (GO)	1346,0	1974-2025
	1652002	Torixoréu (MT)	1337,3	1975-2024
	1552001	General Carneiro (MT)	1018,6	1971-2025

Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

3.2 DINÂMICA PLUVIOMÉTRICA: ASSINATURAS E VARIABILIDADE REGIONAL

A consolidação e a validação da base de dados das 91 estações pluviométricas aptas permitem transcender a avaliação métrica da qualidade das séries históricas para, de fato, investigar a fenomenologia das precipitações na bacia do rio Araguaia. Considerando a vasta extensão territorial da bacia, que drena áreas desde o coração do Planalto Central até as planícies de transição para o bioma amazônico, a chuva não se distribui de maneira homogênea.

Neste tópico, analisa-se a dinâmica pluviométrica a partir de uma abordagem escalar, partindo dos volumes anuais acumulados para as assinaturas sazonais e, por fim, para a agressividade dos eventos extremos. A compartimentação da bacia em quatro grandes unidades (Alto Araguaia, Médio Araguaia, Baixo Araguaia e rio das Mortes) demonstrou ser

fundamental para compreender como os diferentes sistemas atmosféricos interagem com a fisiografia regional.

O Gradiente Latitudinal e Volumes Anuais

A análise dos totais precipitados ao longo da bacia comprova, matematicamente, a existência de um forte gradiente crescente pluviométrico no sentido sul-norte. Os dados sumarizados evidenciam que a posição latitudinal das sub-bacias exerce controle direto sobre a oferta hídrica anual (Tabela 6), refletindo as diferentes dinâmicas atmosféricas que atuam sobre o território.

Tabela 6. Estatísticas consolidadas de precipitação média anual e eventos extremos (P90) por compartimento da bacia do rio Araguaia.

Compartimento da Bacia	Número de Estações	Chuva Média Anual (mm)	P90 Médio (mm)
Alto Araguaia	25	1.533,0	36,5
Rio das Mortes	12	1.443,0	36,9
Médio Araguaia	31	1.552,0	40,6
Baixo Araguaia	23	1.758,0	39,9

Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

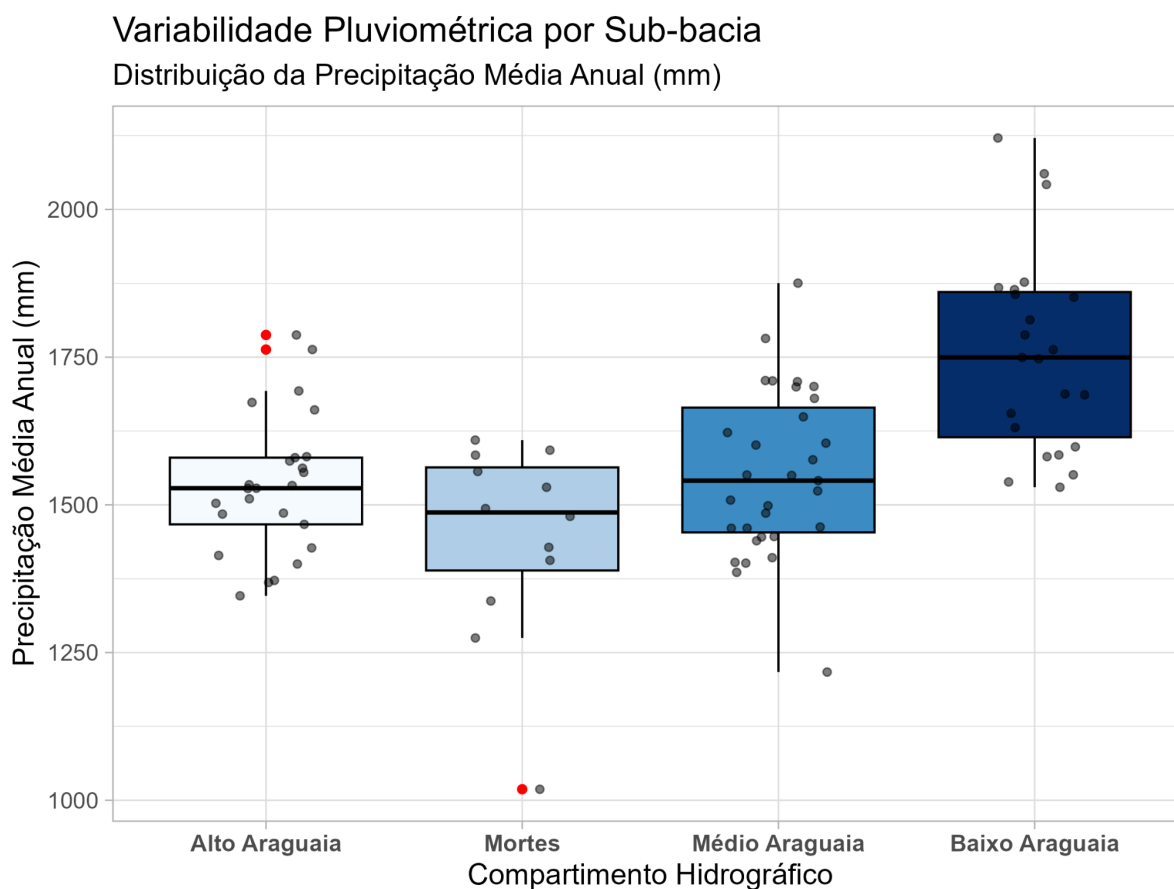
O extremo sul e oeste da área de estudo configuram-se como os compartimentos mais secos do sistema hidrológico. A bacia do Rio das Mortes e o Alto Araguaia apresentam os menores volumes médios anuais, registrando 1.443 mm e 1.533 mm, respectivamente. Estes valores refletem a posição geográfica destas sub-bacias, incrustadas no núcleo do bioma Cerrado, onde o regime de chuvas apresenta forte sazonalidade e é tipicamente mais restrito. Além disso, a taxa de evapotranspiração potencial da região é severa, uma vez que o período de estiagem prolongado aumenta substancialmente a demanda atmosférica. Nessas áreas de cabeceira, a recarga hídrica depende de um período chuvoso mais curto e intenso, tornando a paisagem e a disponibilidade hídrica mais vulneráveis a anomalias climáticas, expondo a região a situações de escassez e estresse hídrico (ANA, 2005; NASCIMENTO et al., 2021).

Em contrapartida, observa-se um salto expressivo nos volumes pluviométricos à medida que a calha principal do rio Araguaia desce para latitudes menores (em direção ao Equador). No Médio Araguaia, a precipitação atinge 1.552 mm, escalando abruptamente ao alcançar o Baixo Araguaia, que registra uma média anual de 1.758 mm.

Essa disparidade, que representa um excedente médio de 315 mm anuais do Baixo Araguaia em relação ao Rio das Mortes, materializa o efeito do ecótono Cerrado-Amazônia (NASCIMENTO et al., 2021). Na porção setentrional da bacia (Baixo Araguaia), o incremento hídrico é justificado pela forte influência da umidade proveniente da Bacia Amazônica e pela atuação mais incisiva da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). É a dinâmica predominante desse sistema atmosférico que provoca circulações perturbadas na região, garantindo chuvas regulares, mais volumosas e duradouras (ANA, 2005; NASCIMENTO et al., 2021).

Para além dos valores médios absolutos, a distribuição estatística e a variabilidade pluviométrica interna de cada compartimento revelam importantes nuances geográficas, conforme observado na Figura 12. O gráfico de boxplot evidencia um claro gradiente crescente no sentido sul-norte, onde tanto a magnitude dos volumes anuais quanto a dispersão dos dados se elevam à medida que se avança em direção às baixas latitudes. Na porção meridional, as sub-bacias do Alto Araguaia e do rio das Mortes apresentam maior homogeneidade e concentração em seus volumes anuais, com destaque para o Alto Araguaia, que exibe a caixa mais compacta e a menor variabilidade interquartilica do sistema. Em contrapartida, o Médio Araguaia exibe expressiva amplitude e dispersão de dados, refletindo a vasta extensão e a heterogeneidade territorial desta sub-bacia. Adicionalmente, destacam-se valores atípicos (*outliers*), representados pelos pontos vermelhos que extrapolam as hastes superior e inferior das caixas. No contexto das ciências ambientais, estes não configuram erros amostrais, mas sinalizam a existência de microclimas específicos ou efeitos de chuva orográfica que geram anomalias pluviométricas locais, destoando do padrão predominante de seu respectivo compartimento.

Figura 12. Variabilidade pluviométrica da precipitação anual por compartimento da bacia do rio Araguaia.

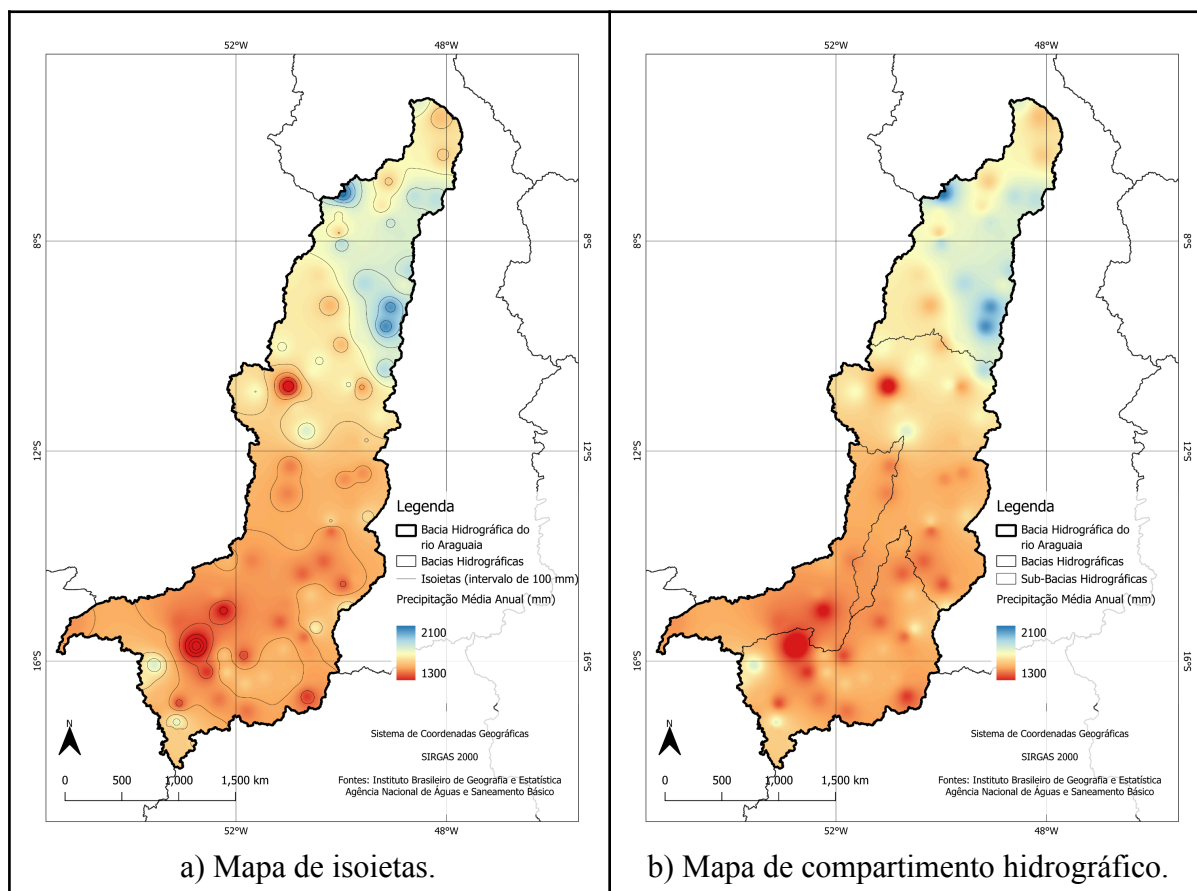


Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

A espacialização desse gradiente pode ser visualizada no mapa de isoietas (Figura 13), que ilustra a transição climática contínua dos núcleos de menor pluviosidade nas altas bacias para as zonas de abundância hídrica próximas à foz do Araguaia.

Figura 13. Espacialização da precipitação média anual na bacia do rio Araguaia.



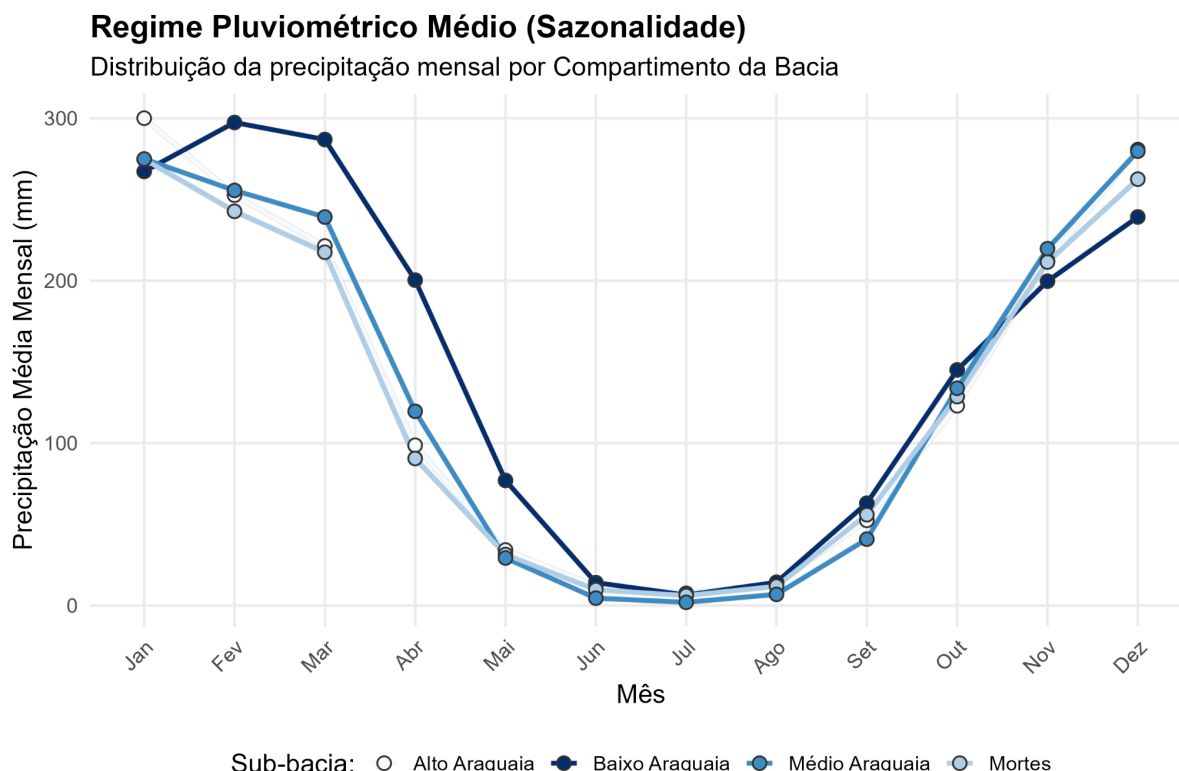
Fontes: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Elaborado pelo autor (2026).

Sazonalidade e o “Pulso” Hídrico

Além da variação espacial dos volumes acumulados, a dinâmica pluviométrica da bacia do rio Araguaia é fortemente governada por uma marcante sazonalidade, intrínseca aos regimes climáticos do Brasil Central (NASCIMENTO et al., 2021). Essa alternância entre um período de intensa pluviosidade e uma estação seca rigorosa atua como o principal motor do “pulso de inundação”, um conceito fundamental na hidrologia para o entendimento do amortecimento de vazões em áreas alagáveis e na manutenção da integridade ecológica de sistemas fluviais tropicais (TUCCI, 1993; ANA, 2005).

A análise da distribuição temporal das chuvas, traduzidas pelas curvas de climatologia média mensal por compartimento (Figura 14), revela nuances importantes sobre o comportamento da monção sul-americana sobre o território da bacia.

Figura 14. Regime pluviométrico médio (sazonalidade) nas sub-bacias do rio Araguaia.



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

A observação imediata do regime médio evidencia que a recessão hídrica é um fenômeno sistêmico na bacia. Durante os meses de inverno austral - notadamente entre junho, julho e agosto -, as curvas de precipitação de todas as sub-bacias convergem para o limite inferior do gráfico, com volumes que se aproximam de zero. Essa constatação atesta que a estação seca no sistema Araguaia é homogênea ao longo de toda a sua extensão, independente da latitude ou do montante total precipitado no ano, a escassez hídrica atinge toda a calha principal e seus afluentes de forma implacável neste trimestre.

O grande diferencial analítico, no entanto, reside na assinatura do período chuvoso. O gráfico demonstra que há um nítido deslocamento temporal do pico pluviométrico à medida que se percorre a bacia no sentido sul-norte. Nas porções das cabeceiras (Alto Araguaia) e na sub-bacia do rio das Mortes, a curva pluviométrica ascende rapidamente na primavera, atingindo seu ápice histórico mais cedo, compreendido entre os meses de dezembro e janeiro.

Em contrapartida, no compartimento mais ao norte (Baixo Araguaia), a precipitação apresenta um comportamento retardado e cumulativo. Nessa região, a curva continua sua trajetória de ascensão e atinge o seu volume máximo apenas em março, sustentando elevados índices pluviométricos até abril.

A interpretação eco-hidrológica dessa defasagem temporal é de extrema relevância para a dinâmica fluvial. O deslocamento das curvas indica que o auge da estação chuvosa “viaja” das cabeceiras (a montante) em direção à foz (a jusante). Consequentemente, quando as chuvas começam a declinar no Alto Araguaia, o Baixo Araguaia encontra-se em seu auge pluviométrico.

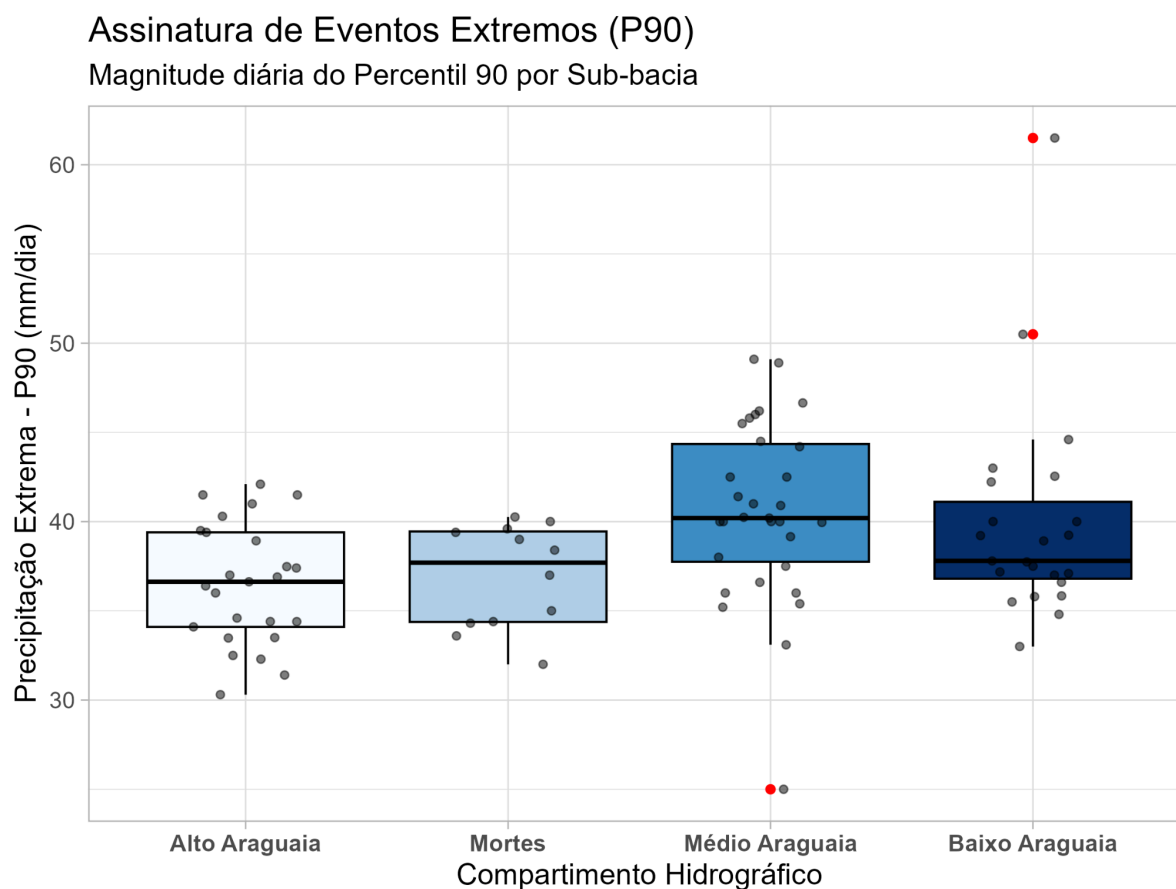
É exatamente essa assincronia espacial e temporal da precipitação que garante a vitalidade do Médio Araguaia. O volume d’água precipitado no sul escoia pela calha principal e, ao chegar no trecho médio, encontra uma região que ainda está recebendo altos volumes de chuva local. Esse efeito cumulativo é o grande responsável por transbordar as margens e sustentar a inundação das vastas planícies da Ilha do Bananal por longos períodos do ano, amortecendo o escoamento e regularizando o fluxo hídrico regional (TUCCI, 1993).

Assinatura de Eventos Extremos (P90)

Embora a análise dos volumes médios acumulados ofereça uma visão macroscópica da disponibilidade hídrica, ela é insuficiente para capturar a “agressividade” e a concentração temporal das precipitações. Para avaliar a magnitude das chuvas intensas, a aplicação do percentil 90 (P90) atua como um importante diferencial técnico-analítico, revelando a assinatura dos eventos extremos em cada compartimento da bacia do rio Araguaia.

A distribuição dos valores do P90 (Figura 15) evidencia que a intensidade das tempestades não segue, obrigatoriamente, a mesma lógica linear do volume total anual, revelando comportamentos hidrológicos complexos e regionalizados.

Figura 15. Distribuição da magnitude dos eventos pluviométricos extremos diários por compartimento da bacia do rio Araguaia.



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

Iniciando a análise pelo sul da área de estudo, as sub-bacias do Alto Araguaia e do rio das Mortes apresentam os menores valores médios de P90, fixados em 36,5 mm e 36,9 mm, respectivamente. Tais índices traduzem uma relativa “calmaria” pluviométrica; isto é, no núcleo do bioma Cerrado, os dias de precipitação extrema tendem a ser menos agressivos, configurando chuvas de moderada a forte intensidade - adotando-se o critério do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que classifica volumes entre 15,1 mm/dia e 50 mm/dia como chuvas moderadas, e valores acima de 50,0 mm/dia como fortes. Desse modo, o limite do P90 nesses compartimentos indica eventos significativos, porém com menor capacidade de gerar escoamento superficial destrutivo se comparados à região norte.

Em contrapartida, ao analisar o Médio Araguaia, os dados revelam um comportamento paradoxal de grande relevância geoambiental. Embora esta sub-bacia registre um volume anual significativamente inferior ao do Baixo Araguaia (1.552 mm contra 1.758

mm), ela possui o maior P90 médio de todo o sistema hidrográfico (40,6 mm). Esse cenário indica uma forte concentração pluviométrica: as chuvas no Médio Araguaia ocorrem na forma de pancadas muito severas e intensas, porém distribuídas em um menor número de dias chuvosos ao longo do ano.

Além disso, o Médio Araguaia exibe a maior amplitude do índice de extremos de toda a rede analisada, oscilando de um mínimo de 25,0 mm a um expressivo máximo de 49,1 mm. Essa grande margem atesta uma alta variabilidade climática espacial dentro do próprio compartimento, refletindo a heterogeneidade da transição ecotonal e da planície de inundação do Bananal.

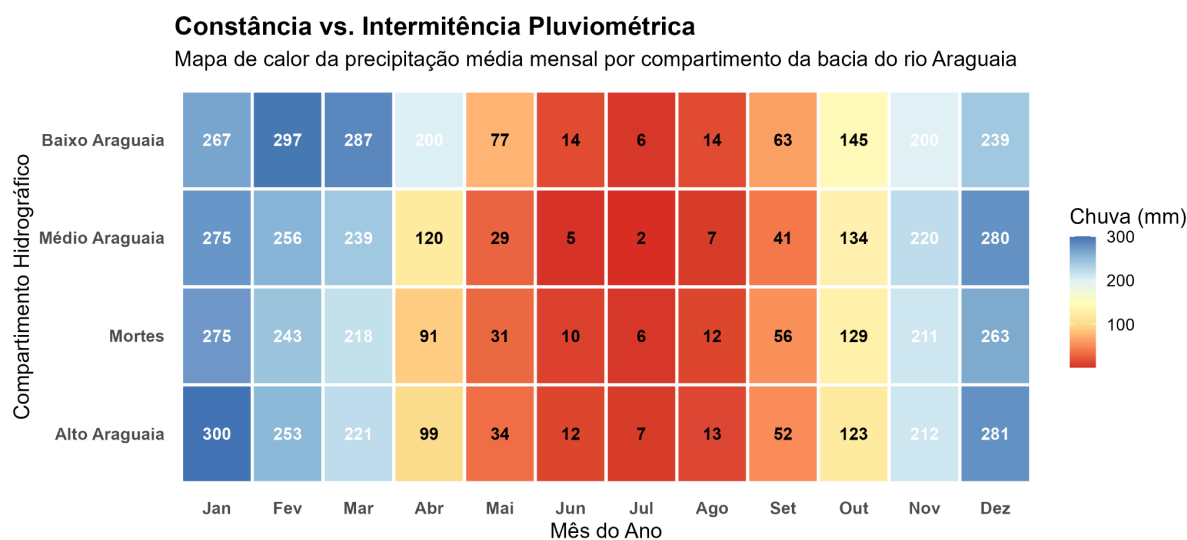
Por fim, o Baixo Araguaia destaca-se por abrigar os picos de maior magnitude absoluta. Localizada nesta sub-bacia, a estação de Esperantina (TO) registrou o maior P90 máximo de toda a rede apta para modelagem, atingindo 61,5 mm diários. Tais limiares corroboram que, no setor setentrional da bacia, o adensamento da umidade oriunda do bioma amazônico transforma os eventos climáticos extremos em verdadeiras tempestades tropicais, com volumes capazes de alterar rapidamente o nível fluviométrico e a dinâmica da paisagem local.

Constância e Intermitência Pluviométrica

A compreensão integral da dinâmica hídrica da bacia do rio Araguaia exige transcender a análise dos volumes absolutos e dos limiares extremos para investigar, por fim, a confiabilidade da precipitação. Em termos geoambientais, é fundamental determinar não apenas o quanto chove, mas o quão constante e previsível é essa oferta hídrica ao longo dos meses. Para avaliar essa estabilidade temporal, empregou-se a análise de constância versus intermitência, sintetizada visualmente por meio de mapas de calor.

A representação em mapa de calor (Figura 16) permite identificar o grau de consolidação do período chuvoso e a severidade da estiagem, evidenciando as janelas temporais de maior segurança hídrica e os meses de transição, que frequentemente apresentam comportamentos erráticos.

Figura 16. Mapa de calor da constância pluviométrica mensal, intermitência e estiagem na bacia do rio Araguaia.



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

A leitura dos dados revela três grandes eixos de comportamento hidroclimático na bacia. O primeiro eixo refere-se à alta constância (o núcleo úmido), tipicamente concentrado entre os meses de dezembro e março. Nestes meses, o mapa exibe as cores de maior intensidade e as menores taxas de falha pluviométrica. Isso significa que, independente do ano analisado na série histórica, a precipitação nestes meses é contínua e praticamente garantida em todos os compartimentos, assegurando a recarga dos aquíferos e a manutenção do pulso de inundação.

O segundo eixo reflete a estiagem absoluta (intermitência total). Entre junho e agosto, a bacia entra em um estado de baixa oferta pluviométrica quase unânime. A ausência de precipitação nestes meses não é uma anomalia, mas a regra ditada pela massa de ar seco e subsidente que domina o Brasil Central durante o inverno austral. A constância de “zero chuva” neste trimestre demonstra que o sistema Araguaia passa, anualmente, por um severo estresse hídrico, dependendo exclusivamente do escoamento de base e do nível do lençol freático recarregado no semestre anterior.

O terceiro eixo, e do ponto de vista do manejo ambiental o mais crítico, engloba os meses de transição e alta intermitência: setembro/outubro/novembro (início das águas) e abril/maio (recessão das águas). Nestas janelas de tempo, o mapa de calor evidencia uma dispersão significativa e cores intermediárias. O comportamento da chuva nestes períodos é

altamente errático; em alguns anos, a monção estabelece-se precocemente, enquanto em outros, as chuvas atrasam. Essa transição também expõe a heterogeneidade espacial da bacia: nota-se, por exemplo, que durante a recessão de abril, os compartimentos ao sul já apresentam forte declínio pluviométrico, enquanto o Baixo Araguaia ainda sustenta volumes superiores a 200 mm.

Essa intermitência nas bordas das estações (início e fim do período chuvoso) é o principal indicador de vulnerabilidade climática da bacia. É exatamente nestes meses de incerteza que a variabilidade interanual impacta com maior severidade a dinâmica ecológica da região, a navegação incipiente e a produtividade das atividades agrossilvopastoris no ecótono Cerrado-Amazônia.

3.3 VARIABILIDADE TEMPORAL: TENDÊNCIAS E ANOMALIAS HISTÓRICAS

Após a caracterização da dinâmica espacial e sazonal da precipitação na bacia do rio Araguaia, a compreensão integral do seu regime hidroclimático exige a investigação do comportamento das chuvas ao longo do tempo. Em bacias de grande escala territorial situadas na transição entre biomas Cerrado e Amazônia, a variabilidade interanual e decadal atua como o principal motor das oscilações de disponibilidade hídrica, afetando desde a recarga de aquíferos até a manutenção da integridade ecológica das planícies de inundação.

Neste tópico, a análise transcende a climatologia média para focar nas tendências e extremos históricos, buscando responder a uma questão central: a bacia do rio Araguaia está passando por um processo de alteração em seus volumes e padrões de precipitação nas últimas décadas? Para tal, a avaliação temporal foi estruturada a partir da identificação de ciclos anômalos, seguida pela aplicação de testes não-paramétricos de tendência direcional.

Ciclos Pluviométricos e o Índice de Anomalia de Chuva (IAC)

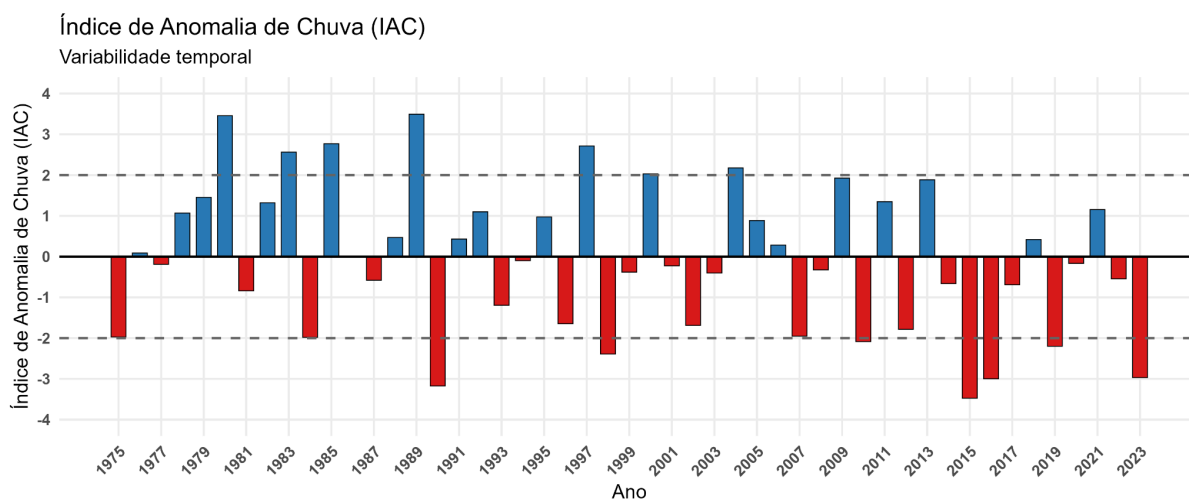
Para quantificar a magnitude, a duração e severidade dos anos secos e úmidos ao longo da série histórica (1975 - 2023), aplicou-se o Índice de Anomalia de Chuva (IAC), métrica desenvolvida originalmente por Rooy (1965). A escolha deste índice justifica-se por sua ampla aplicação na literatura climatológica brasileira para o monitoramento de períodos extremos e pela sua capacidade de normalizar os dados locais em graus de severidade,

permitindo a comparação histórica do comportamento pluviométrico. A classificação das anomalias baseou-se nas faixas de intensidade propostas por Araújo et al. (2009), onde valores positivos indicam graus de umidade e valores negativos sinalizam graus de seca, calculados como desvios diretamente relacionados à média histórica da precipitação da bacia.

A modelagem de índices temporais contínuos requer extrema cautela quanto à qualidade da série de dados base. Durante o processamento computacional, identificou-se que a ocorrência de falhas instrumentais e a desativação de diversas estações pluviométricas da rede hidrometeorológica poderiam gerar anos com dados subestimados. Para evitar que lacunas de medição fossem estatisticamente interpretadas como “falsas secas”, adotou-se um filtro metodológico de alta restrição: apenas os anos que possuíam o registro mínimo de 330 dias válidos de leitura foram contabilizados para o cálculo da média anual da bacia. Esse rigor garantiu que os resultados do IAC refletissem exclusivamente a variabilidade meteorológica natural do sistema Araguaia.

A variação temporal do IAC (Figura 17) revela o comportamento cíclico da precipitação e expõe a marcante quebra de padrão climático no decorrer das últimas cinco décadas.

Figura 17. Índice de Anomalia de Chuva (IAC) na bacia do rio Araguaia (1975-2023).



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

Antes de avançar na reconstrução histórica da bacia, cumpre explicitar a fundamentação física e estatística do Índice de Anomalia de Chuva (IAC). Estruturalmente, o sinal obtido pelo índice reflete o comportamento da precipitação em relação ao equilíbrio

climatológico local: valores positivos de IAC indicam anos em que o volume precipitado superou a média histórica, ao passo que valores negativos sinalizam períodos de déficit pluviométrico. Para além do sinal, a classificação da intensidade desses desvios adota os limiares críticos de +2,0 e -2,0, estabelecidos originalmente por van Rooy (1965). No modelo do autor, esses valores funcionam como fronteiras estatísticas de severidade: um IAC que ultrapassa +2,0 categoriza o ano como “Muito Úmido”, indicando um pulso excepcional de inundação, enquanto um índice que decai abaixo de -2,0 define um cenário “Muito Seco”, caracterizando uma estiagem severa com potencial para romper a capacidade de amortecimento do sistema hidrológico.

A leitura dos dados evidencia a existência de fases climáticas contrastantes. O primeiro período, compreendido entre as décadas de 1970 e meados dos anos 1990, configura-se como um ciclo de alta umidade e recarga contínua. Nesta janela temporal, observa-se uma predominância absoluta de anomalias positivas (barras azuis), com o IAC frequentemente ultrapassando o limiar de +2,0, classificando a quase totalidade dos anos como “Muito Úmido”. Os volumes hídricos excepcionais desta época foram vitais para a consolidação e manutenção dos grandes ecossistemas alagáveis do Médio Araguaia durante o final do século XX.

Em contrapartida, observa-se uma fase de transição pluviométrica entre 1995 e 2006, caracterizada por índices positivos, porém de menor magnitude. A inflexão drástica e definitiva do sistema hidrológico ocorre após 2007. O terceiro e último ciclo é inquestionavelmente dominado pela persistência de anomalias negativas (barras vermelhas). A frequência de anos classificáveis como “Muito Seco” ($IAC < -2,0$) aumentou drasticamente no século XXI, com registros severos de 2007 até o final da série histórica.

A magnitude do déficit hídrico recente atinge seu ápice na longa recessão climatológica iniciada em 2007, estabelecendo um bloco contínuo de escassez sem precedentes na série. Estes períodos de extrema severidade, muitas vezes induzidos por intensos fenômenos *El Niño* globais (como o “Super El Niño” de 2015/2016), afetam a dinâmica de circulação da atmosfera regional.

A inversão do padrão das anomalias - de um passado chuvoso para um presente marcado por estiagens agudas - atesta que a bacia do rio Araguaia vem perdendo resiliência climática. Neste contexto, a resiliência é compreendida como a capacidade intrínseca do sistema ambiental de absorver choques de escassez severa e restabelecer seus níveis normais de vazão de base e armazenamento subterrâneo. A recorrência atual de anos classificados como “Muito Seco” restringe a janela de recuperação do aquífero e do fluxo de base do rio,

acentuando o estresse ambiental em um cenário de acelerada transformação fisiográfica na região.

Análise de Tendência de Longo Prazo

Enquanto o Índice de Anomalia de Chuva (IAC) evidenciou a alternância rítmica entre anos secos e úmidos, a aplicação de testes estatísticos não-paramétricos permitiu diagnosticar a existência de uma tendência direcional de longo prazo na bacia do rio Araguaia. Para este fim, utilizou-se o teste de Mann-Kendall (MK) para detectar a presença de tendências significativas e o Estimador de Declividade de Sen (Sen's Slope) para quantificar a magnitude dessa variação ao longo da série histórica (1975-2023).

Os resultados revelaram uma tendência de redução pluviométrica estatisticamente significativa de confiança de 95% ($p < 0,01$), conforme detalhado na Tabela 7.

Tabela 7. Resultados do teste de Mann-Kendall e Estimador de Sen para a precipitação média da bacia (1975 - 2023).

Variável	Teste de Mann-Kendall (Tau)	P-Value	Estimador de Sen (mm/ano)	Tendência
Precipitação na Bacia do Araguaia	-0,717	< 0,0001	-25,494	Redução Significativa

Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

O coeficiente de correlação Tau de Kendall fixado em -0717 indica uma forte tendência negativa. Essa classificação fundamenta-se nos intervalos de magnitude propostos por Cohen (1988) para coeficientes posicionais, nos quais valores em módulo entre 0,10 e 0,29 indicam um efeito fraco, entre 0,30 e 0,49 sinalizam um efeito moderado, e índices iguais ou superiores a 0,50 atestam uma tendência de forte intensidade. O resultado obtido confirma que a redução da pluviosidade na bacia não é um fenômeno isolado de alguns anos, mas um processo contínuo e sistemático de “secamento” regional. A magnitude dessa perda, calculada pelo Estimador de Sen em -25,49 mm/ano, é alarmante do ponto de vista hidrológico. Ao longo dos 49 anos analisados, essa taxa acumulada representa uma redução

drástica nos volumes precipitados, o que explica a transição visual das anomalias (IAC) positivas (azuis) do século XX para as anomalias negativas (vermelhas) predominantes no século XXI.

Essa tendência de queda sistemática possui implicações diretas para a gestão de recursos hídricos. A perda de aproximadamente 250 mm de chuva a cada década compromete a capacidade de recarga dos aquíferos e, conseqüentemente, reduz o fluxo de base que sustenta o rio Araguaia durante o período de estiagem. A persistência dessa redução sugere que a bacia está operando sob um novo regime hidroclimático, possivelmente influenciado tanto pelas mudanças climáticas globais quanto pelas alterações no uso e ocupação do solo em larga escala no Cerrado e na Amazônia, temas que serão aprofundados nas seções subsequentes de integração fisiográfica.

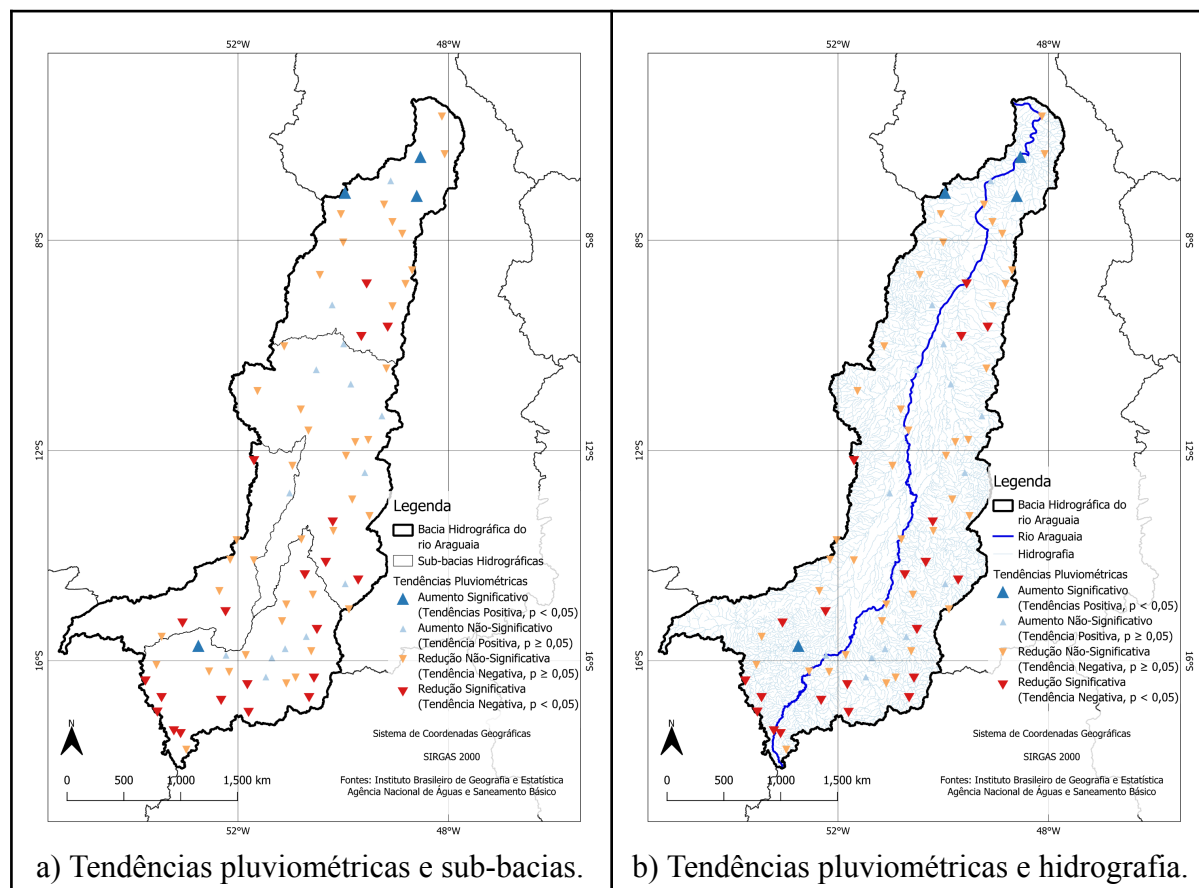
Espacialização das Tendências Temporais

A compreensão do comportamento climático em bacias de escala continental exige ir além dos cálculos de médias globais, pois valores agregados tendem a mascarar os complexos contrastes fisiográficos e atmosféricos locais. Ao desagregar a série temporal para a escala das estações pluviométricas individuais, surge a possibilidade real de rastrear as assinaturas espaciais deixadas pela alteração no regime de chuvas. Essa transição analítica, fundamentada na aplicação do teste de Mann-Kendall e do Estimador de Declividade de Sen a 80 pontos de monitoramento rigorosamente selecionados, desenha o contorno geográfico do estresse hídrico no Araguaia entre 1975 e 2023. Através dessa lente focada na distribuição espacial, a bacia deixa de ser um bloco uniforme e passa a revelar detalhadamente suas fragilidades internas.

A decodificação estatística da rede de monitoramento evidencia uma assimetria profunda no comportamento da precipitação, pendendo vertiginosamente para o déficit (Figura 18). O universo amostral atesta que 21 pontos de monitoramento pluviométrico (26,25%) registraram reduções estatisticamente significativas, com valores de $p < 0,05$. Esse núcleo crítico encontra-se circundado por um contingente ainda maior de 41 estações (51,25%) que, embora oscilando fora da faixa de significância matemática rígida, já descrevem trajetórias de declínio tendencial em seus volumes anuais. A fusão dessas duas classes totaliza expressivos 77,5% do território operando sob um processo de retração hídrica contínua. A expansão pluviométrica, por sua vez, restringe-se a apenas 4 estações que

apresentam aumento estatisticamente atestado, figurando no espaço geográfico como anomalias pontuais inseridas em um macrossistema em amplo enxugamento.

Figura 18. Distribuição espacial das tendências pluviométricas na bacia do rio Araguaia.

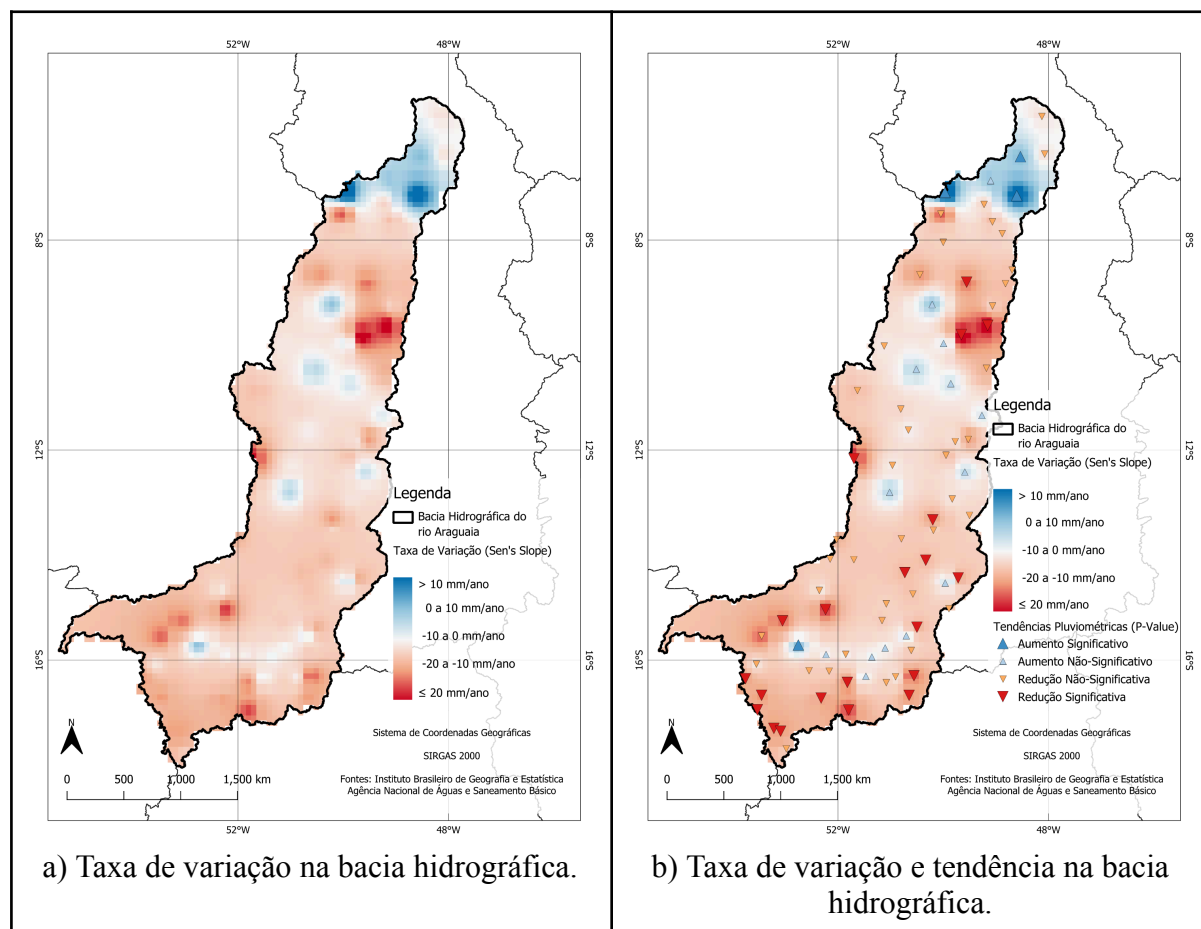


Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

A real magnitude desse fenômeno adquire contornos visuais claros através da representação cartográfica com métricas pontuais e de suas respectivas interpolações na paisagem. O mapeamento não reflete uma dispersão aleatória de perdas isoladas, mas expõe a aglutinação desses déficits em “clusters” (ou aglomerados) geográficos extremamente adensados (Figura 19). Ao converter as taxas do Estimador de Sen em uma superfície de gradiente contínuo, os mapas de calor acusam a existência de vastos corredores onde a supressão da chuva imprime suas marcas mais agressivas. Essas superfícies interpoladas em tons avermelhadas delineiam cinturões de aridez incipiente que cortam transversalmente componentes vitais do bioma Cerrado.

Figura 19. Distribuição espacial das tendências e variações pluviométricas na bacia do rio Araguaia.



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

Um dos polos mais agudos dessa degradação pluviométrica ancora-se na porção centro-sul da bacia, abrangendo o complexo retículo de drenagem do Alto Araguaia e os platôs extensos que formam a bacia do rio das Mortes. Nessas regiões de topografia mais elevada, concentram-se os marcadores visuais das reduções significativas, denotando perdas incontestáveis. Estações localizadas nas adjacências de municípios formadores de nascentes, como Caiapônia (GO) e Pindaíba (MT), exibem curvas de precipitação cujo mergulho supera a marca de -16 a -17 milímetros a cada ano. O esgotamento hídrico nesse patamar interfere na dinâmica natural de recarga de províncias hidrogeológicas de importância capital, como o Aquífero Guarani e o Sistema Urucuia. O abastecimento crônico dessas zonas de afloramento gera uma reação em cadeia pelo relevo, asfixiando os fluxos de base que seriam fundamentais para sustentar a integridade e a diluição do rio principal durante a prolongada estação seca (WENDLAND et al., 2007; GONÇALVES et al., 2017).

Somando-se à vulnerabilidade das cabeceiras, a espacialização revela um segundo núcleo de perda ainda mais severo incrustado no Médio Araguaia, notadamente acompanhando a margem direita da calha, no estado do Tocantins. É justamente nesta faixa leste da bacia que os algoritmos de interpolação atingem o limite inferior do gradiente. Municípios como Marianópolis e Abreulândia abrigam postos que reportaram as maiores taxas de retração de todo o território analisado, atingindo decaimentos assustadores de -26,3 mm e -23,24 mm por ano. A supressão violenta dos totais precipitados nessa porção central impõe um rearranjo forçado na oferta hídrica de áreas lindeiras a importantes planícies de inundação, impactando a retroalimentação sistêmica da Ilha do Bananal e de ecótonos altamente sensíveis ao balanço de umidade.

O trajeto cartográfico em direção ao norte, onde o Baixo Araguaia adentra os domínios de transição para o bioma Amazônico, revela uma diluição parcial desse vetor negativo. No terço inferior da calha, a hegemonia da seca fragmenta-se para dar espaço a redutos de reduções não-significativas, que dividem a paisagem com súbitos bolsões de anomalia positiva. Concentram-se em baixas latitudes, muito próximas à confluência com o rio Tocantins, os únicos registros de ganho hídrico vigoroso. As estações de Xinguara (PA) e Muricilândia (TO) figuram como ilhas de expansão pluviométrica, acusando elevações teóricas que margeiam os +28 mm/ano. Esse contraste de atividade pluviométrica isolada insinua, por um lado, que o aumento global das temperaturas regionais pode estar potencializando as taxas de evapotranspiração local, alimentando mecanismos convectivos de precipitação de curto prazo. Por outro lado, deve-se considerar a posição geográfica estratégica do Baixo Araguaia; por estar sob influência direta da massa Equatorial Continental (mEc), a região recebe o influxo direto do sistema atmosférico amazônico - quente e úmido -, que atua como o principal fornecedor de vapor d'água ao longo de sua trajetória de migração em direção à porção centro-sul do continente.

A convivência geográfica de platôs sofrendo desidratação crônica no Cerrado meridional e pequenos encaves umedecendo abruptamente no início da Amazônia reflete a sobreposição de forçantes climáticas globais sobre reações microclimáticas complexas. Os grandes blocos vermelhos que sinalizam a perda de chuva alinham-se assimetricamente às planícies onde ocorreu a expansão histórica e acelerada da fronteira agropecuária regional. A substituição massiva e ininterrupta da cobertura vegetal nativa altera profundamente propriedades termodinâmicas vitais, suprimindo as taxas de evapotranspiração que, historicamente, garantiam a umidificação e a reciclagem da água na atmosfera local (SPERA

et al., 2016). A geometria traçada por esses mapas de tendência serve, portanto, como uma bússola clara apontando para a necessidade de investigar a fundo as dinâmicas de superfície.

3.4 INTEGRAÇÃO FISIOGRAFICA: O PAPEL DO USO DO SOLO E O RELEVO

A análise dos padrões de “secamento” identificados no tópico anterior ganha uma nova camada de complexidade quando confrontada com a realidade física e as transformações antrópicas que moldam a superfície da bacia do rio Araguaia. Não se trata apenas de uma flutuação estatística isolada na atmosfera, mas de um fenômeno que encontra raízes e justificativas geográficas nos compartimentos de relevo e nas mudanças drásticas no uso e cobertura da terra. Ao sobrepor o mapa de tendências pluviométricas às unidades geomorfológicas e aos dados de expansão agropecuária, torna-se evidente que os epicentros de redução significativa possuem um “endereço” geográfico preferencial, concentrando-se em áreas que cumprem papéis vitais no ciclo hidrológico regional, desde as zonas de recarga em altas altitudes até as depressões coletoras do médio curso.

A lógica dessa distribuição espacial parece estar intimamente atada à fragilidade climática de compartimentos como as Superfícies e Pedimentos do Alto Araguaia e os Chapadões Residuais dos Planaltos Setentrionais, onde a topografia plana e elevada historicamente favoreceu a mecanização intensiva. Nessas regiões de chapada, que funcionam como “telhados” da bacia, a substituição da vegetação nativa do Cerrado por vastas extensões de pastagens e agricultura de ciclo curto altera o balanço de energia superficial, interferindo na capacidade de reciclagem de umidade via evapotranspiração (NASCIMENTO et al., 2021). Esse processo é particularmente crítico nos Planaltos Alcantilados da Borda Noroeste da Bacia Sedimentar do Paraná e nos Planaltos Divisores do Araguaia-Tocantins-Paraná, pois o declínio da precipitação nesses setores de cabeceiras compromete a pressão hidrostática necessária para a manutenção dos aquíferos que alimentam a rede de drenagem nos períodos de estiagem (TUCCI, 2006).

O cenário de retração hídrica avança de forma preocupante em direção à Superfície do Araguaia e à Superfície Central do Médio Araguaia, onde a paisagem transita de platôs divisores para zonas de pediplanação que sustentam a dinâmica fluvial. É notório que o agravamento dos índices de redução do Sen's Slope acompanhe a consolidação da fronteira agrícola nessas unidades, sugerindo que a remoção da cobertura florestal e savânica original

impõe uma barreira física à infiltração e ao retorno de vapor d'água para a atmosfera local. A persistência de tendências negativas nestes compartimentos centrais sugere que a bacia está perdendo capacidade de amortecimento climático, uma vez que a rugosidade da vegetação original, que antes promovia a turbulência e a formação de chuvas convectivas, deu lugar a superfícies homogêneas de baixo vigor vegetativo em parte do ano (VAREJÃO-SILVA, 2005).

Essa degradação atinge seu ápice em termos de magnitude absoluta ao adentrar a Depressão do Rio Araguaia e as Formas Agradacionais Atuais e Subatuais Interioranas, áreas de menor altitude que deveria, teoricamente, funcionar como reservatórios de umidade do sistema. A identificação de perdas consideráveis de chuva nestas zonas de planície e depressão sugere que o déficit gerado nas cabeceiras está sendo amplificado ao longo da calha principal, impactando diretamente os ecossistemas aluviais. A coincidência entre os maiores triângulos vermelhos de redução significativa e as áreas de intensa antropização nestas unidades de relevo levanta questões fundamentais sobre o limite de suporte do sistema Araguaia, apontando para uma integração necessária entre as políticas de uso do solo e a preservação da estabilidade pluviométrica em toda a extensão da bacia.

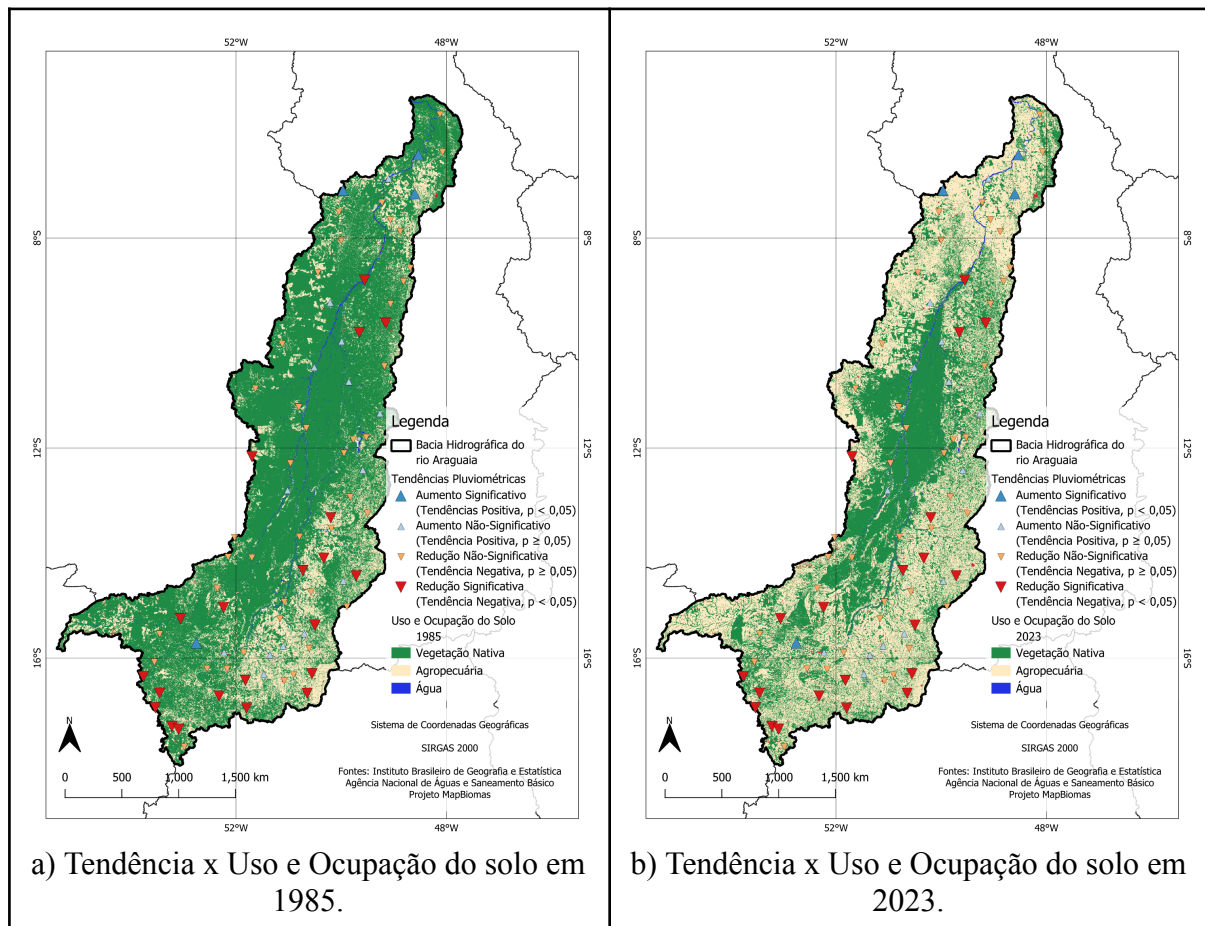
Dinâmica Espacial do Uso do Solo

A compreensão das transformações na cobertura da terra entre 1985 e 2023 é um componente vital para decifrar a gênese das anomalias climáticas observadas na bacia do rio Araguaia, uma vez que a resposta atmosférica não ocorre em vácuo geográfico, mas resulta de um processo cumulativo de alteração da superfície. Ao projetar as tendências de Sen's Slope (calculadas para o período total 1985 - 2023) sobre o cenário de uso do solo de 1985, estabelece-se a linha base da bacia, permitindo identificar quais estações iniciaram a série histórica sob condições de alta integridade ecológica. Neste ponto inicial da série, a bacia exibiu uma assinatura climática mais homogênea, onde a rugosidade do Cerrado preservado atuava como um regulador térmico.

O mapa de 1985 (Figura 20) revela que a maioria das estações que hoje apresentam as reduções mais severas de precipitação estava originalmente inserida em um contexto de vegetação nativa contínua. Essa configuração inicial, sustentada por vastos corredores de formações savânicas e florestais, garantia a reciclagem da umidade local através de sistemas radiculares profundos, típicos do Cerrado *stricto sensu*. Essa “âncora biológica” inicial explica por que a bacia possuía, no início da série, uma capacidade de resiliência que foi

sendo sistematicamente erodida à medida que a cobertura vegetal era substituída. Tal arquitetura vegetal permitia o acesso ao lençol freático mesmo em períodos de estiagem, mantendo o mecanismo de chuvas convectivas que alimenta as cabeceiras e o médio curso do sistema fluvial (NASCIMENTO et al., 2021). A eficiência e o equilíbrio desse arranjo biogeográfico na paisagem são robustamente corroborados não apenas pela maior estabilidade temporal dos eventos extremos (P90) no início da série, mas também pela expressiva correlação com a tendência de anomalias de chuva marcadamente positivas (+IAC) observadas ao longo da janela temporal de 1970-1990, período em que a integridade da cobertura vegetal original sustentava o superávit hídrico do macrossistema.

Figura 20. Mapas de tendências e uso e ocupação do solo.



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Projeto MapBiomias.

Organizado pelo autor (2026).

A transição para o cenário observado em 2023 consolida a correlação espacial entre a expansão da fronteira agropecuária e o agravamento das tendências negativas. A evidência mais contundente dessa trajetória reside no grupo de estações que permaneceu sob domínios

naturais durante todo o período, mantendo uma média de tendência positiva de +5,18 mm/ano, em franco contraste com as áreas de conversão. O mapa de 2023 expõe o desfecho desse processo: uma homogeneização da paisagem onde a substituição da vegetação campestre e arbustiva por monoculturas sazonais desativou o mecanismo de “bombeamento” hídrico para a baixa atmosfera. O resultado, visível na proliferação de triângulos sobre as manchas amarelas de agropecuária, é um solo que armazena menos água e uma superfície que devolve calor sensível em vez de latente, estabelecendo uma resposta termodinâmica negativa (SPERA et al., 2016; COE et al., 2017).

Ao analisar a vasta maioria da rede - as 62 estações situadas em áreas de antropização consolidada (Antrópico → Antrópico) - observa-se um padrão de declínio crônico com média de -4,67 mm ao ano. Embora o mapa de 2023 mostre essas estações em áreas antropizadas, o cruzamento com o cenário de 1985 permite inferir que a magnitude do declínio pluviométrico está diretamente ligada à precocidade e à intensidade dessa conversão. Estações como a 949000 (Abreulândia, TO), com redução crítica de -23,24 mm anuais, registram essa queda em um território que teve 94,7% de sua área (66.045 ha) convertida para uso antrópico (MAPBIOMAS, 2025). Esses dados evidenciam que a remoção da rugosidade original da paisagem asfixiou os mecanismos naturais de formação de chuva, transformando antigas zonas de convergência em superfícies de dissipação térmica (TUCCI, 2006). De forma análoga, em Caiapônia (GO), a estação 1651000 (-16,37 mm/ano) está inserida em uma área que sofreu conversão de 225.104 ha (83,9% do território), o que é particularmente crítico por situar-se em zona de recarga estratégica (MAPBIOMAS, 2025).

A polarização observada entre o norte e o sul da bacia reflete o estágio diferenciado de intervenção antrópica e a natureza física distinta das chuvas. No Alto Araguaia e no Rio das Mortes, o ressecamento estrutural é acompanhado por valores médios de P90 mais baixos (36,5 mm e 36,9 mm), indicando um regime de chuvas estratiformes e de menor intensidade instantânea, altamente dependente da umidade residual do solo que o Cerrado nativo protegia. Em contraste, o Baixo Araguaia manifesta a transição para o regime amazônico, com o P90 saltando para patamares superiores a 50 mm (ex: estação 750001), evidenciando chuvas de alta energia convectiva. Essa dinâmica espacial revela que o rio Araguaia opera hoje sob dois regimes distintos: um sul “desidratado” por um processo crônico de antropização que exauriu sua capacidade de reciclagem hídrica interna, e um norte que, embora também registre uma severa e acelerada conversão de sua cobertura vegetal nativa por usos antrópicos nas últimas décadas (MAPBIOMAS, 2025), ainda mantém índices pluviométricos e de extremos elevados devido à sua posição latitudinal e a proximidade com o núcleo gerador da massa

equatorial continental (mEc). Essa dinâmica atmosférica injeta um fluxo contínuo de umidade de grande escala na porção setentrional da bacia, mitigando temporariamente os efeitos locais do desmatamento que, de outra forma, já teriam colapsado o balanço hídrico do baixo curso.

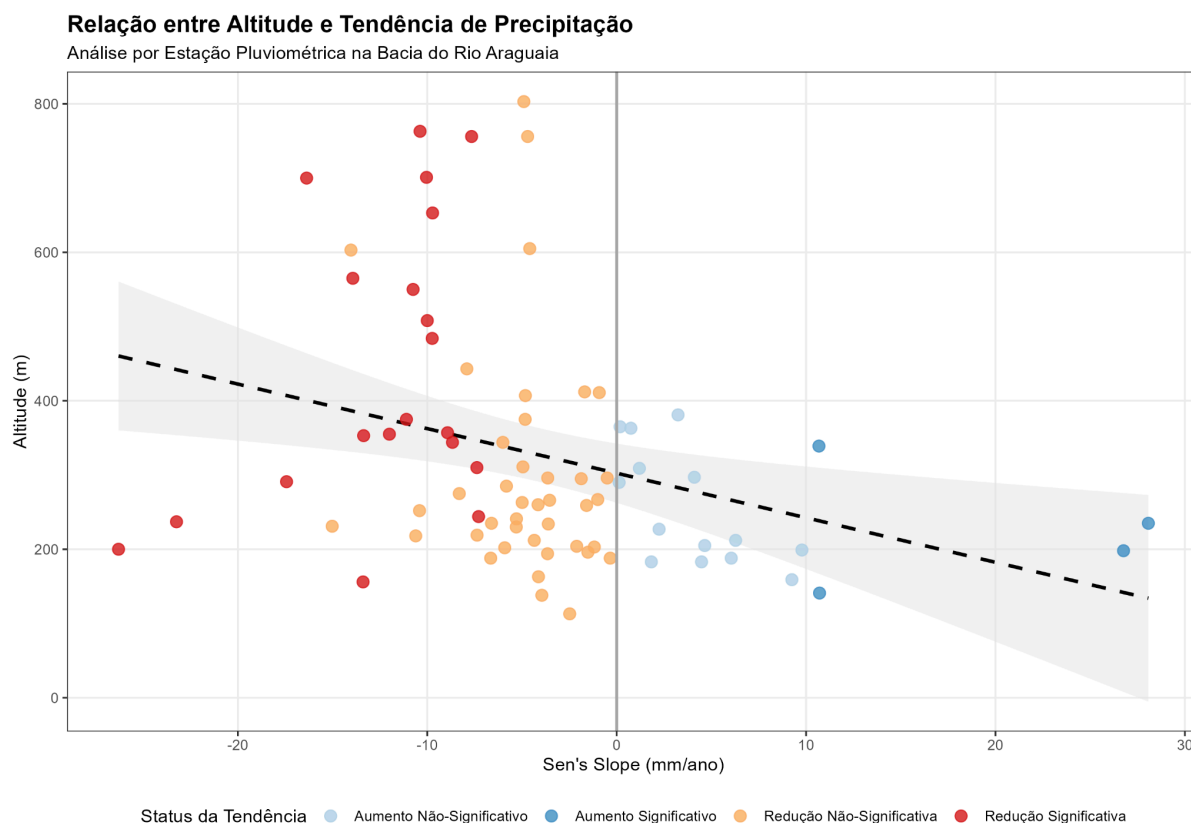
O Fator Relevo

A compartimentação geomorfológica e altimétrica da bacia do rio Araguaia exerce um papel fundamental na distribuição das anomalias pluviométricas, funcionando como um filtro que condiciona a entrada e a permanência da umidade no sistema. Ao analisar o gradiente altimétrico em relação às tendências de Sen's Slope, observa-se que o relevo atua como um regulador complexo. Contudo, a resposta das precipitações às variações altimétricas não ocorre de forma linear e homogênea. A altitude funciona, fundamentalmente, como um elemento de amplificação da variabilidade climática regional. A estrutura da bacia revela que as áreas de cabeceira e as principais zonas de recarga de aquíferos estratégicos situam-se em superfícies aplainadas e platôs residuais que superam os 500 metros de altitude, ambientes nos quais as alterações no balanço de energia superficial comprometem o fluxo de base que sustenta o canal principal (TUCCI, 2006).

A correlação expressa na Figura 21 ilustra essa dinâmica, evidenciando uma tendência geral de declínio volumétrico à medida que a altitude aumenta (conforme indicado pela inclinação da linha de regressão). No entanto, o aspecto estatístico mais marcante desse cenário é a expressiva dispersão dos dados nos compartimentos mais elevados. Enquanto as baixas altitudes exibem um comportamento mais agrupado e previsível, os terrenos que superam as cotas de 500 metros revelam uma forte heterogeneidade nas tendências hidrológicas. É justamente nesse ambiente de alta topografia que se manifestam os cenários mais discrepantes: a nuvem de pontos abriga desde reduções moderadas e não-significativas (marcadores em laranja) até os núcleos de decréscimo mais severos e estatisticamente significativos de toda a bacia (marcadores em vermelho). Essa dualidade de respostas no topo da bacia reflete como os fatores locais e microclimáticos interagem com o relevo. De um lado, essa vulnerabilidade em relevos altos é corroborada por registros críticos situados nos divisores de águas do Alto Araguaia e rio das Mortes, como estação 1651000 (Caiapônia, GO), que a 700 metros de altitude apresenta um declínio de -16,37 mm/ano, e a estação 1753002 (Santa Rita do Araguaia, GO), que a 701m registra uma redução de -10,04 mm/ano. Ambas as estações situam-se em áreas de recarga do Aquífero Guarani e do Sistema Aquífero Bauru, o que torna o déficit pluviométrico um indicador de risco para a perenidade dos fluxos

subterrâneos. Por outro lado, a presença de pontos com taxas de variação menos acentuadas nessas mesmas faixas de altitude reforça que a topografia elevada não impõe uma penalidade climática uniforme, mas sim uma maior sensibilidade às forças de perturbação locais.

Figura 21. Relação entre altitude e tendência de precipitação.



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

Em contrapartida, as áreas de planície e baixo curso, situadas em cotas inferiores a 300 metros, manifestam uma organização espacial muito mais coesa e de baixa dispersão, tendendo à estabilidade ou a variações positivas. Esse comportamento sugere que as menores altitudes atuam de forma mais homogênea na recepção de umidade lateral amazônica. Exemplos notáveis dessa condição em baixas altitudes são encontradas nas estações 748003 (Muricilândia, TO) a 198 metros, com aumento de +26,76 mm/ano, e 749002 (Xinguara, PA) a 235 metros, com ganho de +28,07 mm/ano. Nestas cotas inferiores, a influência da convecção equatorial e a recepção de fluxos de umidade da região Norte compensam de forma mais uniforme a tendência de aridez observada no Sul. Essa dicotomia indica que as Chapadas, devido à sua topografia favorável à mecanização intensiva, sofreram uma

convergência entre altitude elevada, supressão da vegetação nativa e exposição atmosférica diferenciada, fragmentando a resposta climática local (VAREJÃO-SILVA, 2005).

A retração hídrica observada em parte das cotas elevadas é particularmente alarmante para a manutenção dos sistemas aquíferos cujas áreas de recarga coincidem com os locais de maior queda pluviométrica. Se o volume de água que atinge o topo das chamadas diminui e, simultaneamente, o solo sofre processos de compactação e impermeabilização relativa pelo manejo agrícola, a taxa de infiltração profunda decresce em escala exponencial. O impacto desse déficit é sentido a jusante, onde a redução da contribuição subterrânea das cabeceiras diminui a capacidade do rio Araguaia em mitigar períodos de estiagem. A convergência entre a alta dispersão nas superfícies elevadas e a ocorrência dos maiores valores negativos de Sen's Slope revela uma vulnerabilidade climática estrutural: a bacia apresenta instabilidade e perda de rendimento justamente por onde deveria ser alimentada de forma contínua, comprometendo a integridade do pulso hidrológico em todo o gradiente longitudinal (SPERA et al., 2016).

A Polarização Norte - Sul

A análise integrada das tendências pluviométricas na bacia do rio Araguaia revela uma organização espacial que transcende a simples métrica estatística, expondo uma nítida polarização entre as porções setentrionais e meridionais do sistema fluvial. Esta dualidade climática manifesta-se como um gradiente de degradação hídrica que se intensifica de norte para sul, onde a latitude atua não apenas como uma coordenada geográfica, mas como um divisor de processos termodinâmicos distintos. Enquanto o Alto Araguaia e as cabeceiras do Rio das Mortes, no setor sul, exibem um padrão de ressecamento consolidado com reduções severas - exemplificadas pelas estações 1651000 (Caiapônia, GO) e 949000 (Abreulândia, TO), que registram perdas entre -16,37 mm/ano e -23,24 mm/ano -, o Baixo Araguaia, ao norte, ainda sustenta núcleos de estabilidade e até episódios isolados de ganho hídrico significativo. Essa assimetria é reforçada pelo comportamento do P90, que revela chuvas de menor energia no Sul (~36,5 mm) e eventos de alta magnitude no Norte (> 50mm), evidenciando que a bacia opera sob duas velocidades climáticas distintas.

Essa configuração assimétrica encontra sua explicação física na conectividade hidrológica entre a bacia do Araguaia e o bioma amazônico, estabelecendo o que a literatura define como subsídio hídrico lateral ou influxo de umidade transcontinental. O norte da bacia funciona como uma zona de recepção direta dos “rios voadores”, as massas de ar equatoriais

carregadas de vapor que, ao derivarem da Amazônia, injetam umidade extra no sistema atmosférico local e compensam parcialmente a perda da capacidade de reciclagem interna causado pelo desmatamento. Esse fluxo constante de umidade lateral atua como um amortecedor climático, garantindo que estações como a de Muricilândia (748003), com ganho de +26,76 mm/ano, e Xinguara (749002), com +28,07 mm/ano, apresentam comportamentos dissonantes da média regional. Nestes locais, o suporte amazônico sustenta núcleos de condensação que dependem menos da evapotranspiração local e mais do transporte de umidade em macroescala (MARENGO, 2006). Em contrapartida, à medida que se avança para as latitudes mais baixas ao sul, essa influência amazônica torna-se mais tênue e intermitente, deixando o balanço hídrico local vulnerável à supressão de vegetação nativa.

O contraste visual entre os marcadores azuis de estabilidade ao norte e a hegemonia de marcadores vermelhos de redução ao sul reflete também um gradiente de integridade da paisagem e de governança territorial. A porção setentrional da bacia abriga grandes blocos contínuos de áreas protegidas, incluindo o complexo da Ilha do Bananal e diversas Terras Indígenas (como a TI Araguaia e TI Inãwébohona), que funcionam como verdadeiros escudos bioclimáticos ao preservarem a rugosidade da superfície e a estabilidade térmica. Essas áreas de preservação consolidada mantêm ativa a “bomba biótica” de umidade, permitindo que a interface solo-atmosfera continue a processar eficientemente a radiação solar e a converter calor sensível em calor latente, fator essencial para a gênese das chuvas locais. Por outro lado, o sul da bacia sofreu um processo de homogeneização precoce e intensivo para a agropecuária, resultando em uma paisagem fragmentada que perdeu sua capacidade de “segurar” umidade, transformando o Alto Araguaia em uma zona de dissipação térmica onde as massas de ar úmidas encontram dificuldades para atingir o ponto de saturação (TUCCI, 2006; SPERA et al., 2016).

A gravidade dessa polarização reside no fato de que o setor sul, o mais desidratado, coincide geograficamente com as zonas de recarga e com as nascentes que alimentam todo o curso principal do Araguaia. A retração pluviométrica nas cabeceiras meridionais, onde a “assinatura” da chuva (P90) é naturalmente mais frágil, gera um efeito cascata que compromete a disponibilidade hídrica a jusante. Mesmo que o norte ainda apresente sinais de resiliência, essa estabilidade é precária e depende da manutenção da floresta contígua na bacia amazônica e da integridade das unidades de conservação setentrionais. Se a fronteira agrícola continuar a asfixiar esses últimos refúgios de vegetação nativa ao norte, o subsídio amazônico pode não ser suficiente para conter a expansão da “mancha de ressecamento” que

sobe pelo eixo principal do rio, indicando que o equilíbrio atual da bacia está suspenso por um fio biológico sob constante ameaça (COE et al., 2011; MAPBIOMAS, 2025).

3.5 IMPLICAÇÕES HIDROLÓGICAS

A transposição das métricas estatísticas de tendência e variabilidade climática para a realidade física do canal principal e seus tributários exige uma compreensão sistêmica do regime hidrológico do rio Araguaia, que opera sob um “pulso” sazonal rigorosamente definido. Este comportamento natural, caracterizado por picos de cheia entre janeiro e maio e um período crítico de recessão entre junho e setembro, reflete a integridade da bacia em converter a precipitação em vazão líquida (AQUINO et al., 2005). No entanto, a tradução da chuva em escoamento não é imediata. Existe uma defasagem temporal de aproximadamente um mês entre o auge pluviométrico nas cabeceiras e o pico de vazão medido nas seções fluviométricas, uma dinâmica de balanço biosfera-hidrosfera que sustenta a vida ao longo de todo o curso (ACOSTA, 2007). Ao identificarmos tendências de “secamento” nas áreas de topo, estamos, na verdade, detectando uma falha na origem desse mecanismo, uma vez que as nascentes situadas no Planalto Central são as principais responsáveis por alimentar a rede de drenagem, mas encontram-se hoje sob severos processos de degradação e erosão linear que comprometem sua funcionalidade (ASSIS et al., 2021; BAYER, 2010).

A resiliência desse sistema depende intrinsecamente da manutenção do fluxo de base, que é alimentado pelas águas subterrâneas durante os meses de estiagem. A produtividade e a sustentabilidade dos aquíferos regionais ditam a segurança hídrica da bacia, funcionando como um reservatório estratégico que impede a intermitência dos rios em períodos de seca severa (ANA, 2024). Contudo, a análise hidrológica contemporânea demonstra que a bacia do Araguaia não responde mais apenas aos ciclos naturais de variabilidade, como os fenômenos induzidos pelo El Niño e La Niña (NASCIMENTO et al., 2021). Estudos seminais indicam que cerca de dois terços das mudanças hidrológicas observadas nas últimas décadas decorrem diretamente das alterações no uso e cobertura da terra, evidenciando que a antropização acelerada é o principal vetor de desequilíbrio no hidrograma no rio, superando, em magnitude a variabilidade climática natural de grande escala (COE et al., 2011; SUIZU et al., 2022).

Essa supressão da vegetação nativa desativa o que se pode chamar de “ar condicionado” natural do Cerrado e da Amazônia, eliminando a capacidade de regulação térmica e hídrica que as florestas e savanas exercem sobre o clima regional (COE et al., 2017). Sem a proteção da cobertura vegetal original, a bacia perde rugosidade e capacidade de infiltração, resultando em uma antecipação indesejada dos picos de vazão e em um aumento do escoamento superficial imediato em detrimento da recarga profunda (COSTA et al., 2003). O papel da planície aluvial, especialmente no Médio Araguaia, torna-se então ainda mais vital, atuando como uma “esponja” que tenta amortecer as cheias e liberar água gradualmente para sustentar o fluxo de base na seca, embora esse mecanismo de atenuação esteja sendo levado ao limite pelo déficit cumulativo de precipitação que detectamos nas áreas de chapada (LININGER e LATRUBESSE, 2016).

Essa nova realidade impõe um desafio sem precedentes à gestão de recursos hídricos, pois as premissas de estacionariedade que nortearam o planejamento hídrico no passado perderam sua validade diante de um clima em transformações (MILLY et al., 2008). O reconhecimento oficial de que as mudanças climáticas adicionam incertezas críticas à disponibilidade de água força uma revisão urgente dos processos de outorga, especialmente frente ao crescimento vertiginoso da irrigação por pivôs centrais, que exerce uma pressão crescente sobre as vazões de referência (PEREIRA JÚNIOR et al., 2017; ANA, 2024). O “secamento” da bacia, portanto, não é apenas um dado cartográfico, mas um indicativo de que o modelo de exploração e gestão hídrica precisa evoluir para formas mais dinâmicas de outorga e priorização, sob pena de enfrentarmos conflitos irreversíveis pelo uso da água em um Araguaia progressivamente mais vulnerável.

O Efeito Cascata: Do Topo ao Leito

Partindo da premissa que o Araguaia opera como uma unidade sistêmica, o déficit pluviométrico identificado nas zonas de chapadas deve ser interpretado como uma falha primária na origem do metabolismo hídrico regional. As principais nascentes do sistema encontram-se intimamente vinculadas às superfícies de aplainamento do Planalto Central, compartimentos que funcionam como os indutores do fluxo e que, historicamente, garantiram a perenidade através de uma recarga vigorosa (ASSIS et al., 2021; BAYER, 2010). Ao confrontarmos esse cenário com os dados obtidos nesta pesquisa - que apontam reduções de até 25 mm/ano nestas áreas de topo - o que se projeta é um colapso na fase de infiltração, reduzindo a lâmina de água capaz de atravessar o perfil do solo para alimentar os aquíferos

subjacentes. A gravidade deste cenário reside na defasagem temporal de resposta da bacia. Conforme modelado por Acosta (2007), existe um atraso de aproximadamente um mês entre o pico pluviométrico nas cabeceiras e a máxima vazão medida a jusante. Esse tempo de “viagem” da água significa que o estoque hídrico que deveria sustentar o rio nos meses seguintes está sendo suprimido em sua origem, tornando o sistema incapaz de manter sua regularidade sazonal.

Essa desconexão entre a recarga de topo e a descarga no leito é evidenciada pela correlação negativa entre o gradiente altimétrico e o Sen's Slope (Figura 21), expondo um mecanismo onde a redução da pressão hidrostática impede que as águas subterrâneas vertam para os canais superficiais durante o período seco. O fluxo de base, componente fundamental do hidrograma que sustenta o rio Araguaia entre os meses de julho e setembro, depende da manutenção de um nível estático elevado nos aquíferos que compõem as zonas de recarga das chapadas. Com menos infiltração acumulada ao longo da série histórica, o gradiente hidráulico enfraquece, reduzindo a capacidade das nascentes em manter o aporte hídrico para os tributários, elevando o risco de uma transição de regimes perenes para cenários de intermitência em canais que antes apresentavam fluxos contínuos durante todo o ano hidrológico (AQUINO et al., 2005; ACOSTA 2007)).

O agravamento dessa vulnerabilidade é potencializado pela alteração no tempo de resposta da bacia, configurando o que a literatura descreve como o “Paradoxo de Coe”: mesmo em um cenário de redução pluviométrica total, a supressão da vegetação nativa remove o “freio hidráulico” da paisagem (COE et al., 2011; SUIZU et al., 2022). Ao privilegiar o escoamento superficial rápido em detrimento do armazenamento de longo prazo e da infiltração profunda, o sistema passa a apresentar um hidrograma progressivamente mais instável, onde as cheias tornam-se mais súbitas e as vazantes mais severas. Esse desequilíbrio termodinâmico e hidrológico desafia a capacidade de suporte do rio Araguaia, uma vez que a redução da rugosidade do solo e da interceptação vegetal acelera a chegada da água ao canal principal, gerando picos de descarga curtos e violentos que não contribuem para a sustentabilidade da vazão de estiagem (AQUINO, 2009; SUIZU et al., 2022).

Nesse contexto, a planície de inundação do Médio Araguaia, embora atue como uma “esponja” reguladora capaz de mitigar os picos de vazão e sustentar os fluxos de estiagem, possui um limite de resiliência que depende intrinsecamente do aporte vindo de montante (LININGER e LATRUBESSE, 2016). Sem a contribuição subterrânea contínua oriunda das cabeceiras, a água armazenada na planície aluvial é consumida de forma acelerada pela evapotranspiração e pelo uso antrópico crescente, resultando em um rebaixamento do lençol

freático que a bacia não consegue mais repor na mesma velocidade. O efeito cascata consolida-se, portanto, como um processo de degradação estrutural: a falha na recarga das chapadas do sul e das cabeceiras do Rio das Mortes propaga um déficit que asfixia a capacidade de suporte das planícies centrais, levando o rio a uma resposta morfo-hidráulica de simplificação do canal e perda de conectividade com as lagoas marginais (SUIZU et al., 2022). Esse cenário expõe toda a calha principal a um cenário de insegurança hídrica que ameaça desde a biodiversidade da Ilha do Bananal até a integridade das outorgas de irrigação de grande porte e o abastecimento populacional.

A Ilha do Bananal

A compreensão da Ilha do Bananal como o coração pulsante da bacia do rio Araguaia exige uma análise que transcenda sua exuberância biológica, focando em sua função crítica como regulador hidrológico e zona de transição climática. Para fundamentar essa discussão, é necessário observar a distribuição das tendências pluviométricas ao longo do gradiente longitudinal da bacia, conforme sintetizada na Tabela 8. Os dados revelam que o complexo do Bananal encontra-se geograficamente “encurralado” entre dois braços de ressecamento severo: as zonas de nascentes ao sul e a sub-bacia do Rio das Mortes a oeste. Essa configuração espacial é alarmante, pois os dois maiores fornecedores de água para o sistema manifestam os índices mais agressivos de declínio, com o Rio das Mortes apresentando reduções estatisticamente significativas em 45% de suas estações, enquanto o Alto Araguaia registra tendências de queda em mais de 85% de sua rede monitorada.

Tabela 8. Síntese da dinâmica climática na bacia do rio Araguaia (1985 - 2023).

Setor da Bacia	Referência Geográfica	Sen's Slope Médio (mm/ano)	Altitude Média (m)	Estações com Redução (%)	Reduções Significativas (%)
Alto Araguaia	Nascentes / Sul (GO/MT)	-8,31	511,8	95,7	42,8
Rio das Mortes	Sub-bacia Oeste	-7,94	445,2	80,0	45,0

Médio Araguaia	Ilha do Bananal (TO/MT)	-4,64	228,0	77,4	22,5
Baixo Araguaia	Foz / Norte (TO/PA)	-0,08	197,7	73,3	6,6

Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

Essa convergência de déficits hídricos oriundos de montante interfere diretamente no pulso de inundação, o mecanismo hidrodinâmico que sustenta a conectividade entre o canal principal e as lagoas marginais da Ilha do Bananal. O enfraquecimento desse pulso, derivado da redução sistemática da precipitação nas áreas de recarga do Planalto Central e das chapadas do Mato Grosso, compromete a magnitude e a duração das cheias sazonais (AQUINO et al., 2005). Quando o volume de água que chega ao médio curso diminui, a capacidade da planície aluvial de atuar como uma “esponja” reguladora é levada ao limite, uma vez que o estoque de água armazenado durante o período chuvoso torna-se insuficiente para manter os fluxos de base durante a estiagem prolongada. O resultado é um rebaixamento do lençol freático aluvial e uma redução da resiliência sistêmica da maior ilha fluvial do mundo frente aos anos de seca extrema (LININGER e LATRUBESSE, 2016).

As implicações ecológicas desse cenário são profundas, afetando a dinâmica de sedimentação e a integridade dos nichos reprodutivos da biodiversidade local. A redução da energia do rio, causada pelo menor aporte hídrico, altera o transporte de sedimentos e favorece o assoreamento de canais secundários, isolando lagos interiores que funcionam como berçários para a ictiofauna e áreas de nidificação para quelônios. Esse isolamento hídrico, exacerbado pela “mancha de ressecamento” que sobe pelo eixo principal do rio, impõe um estresse adicional a ciclos biológicos que dependem da precisão sazonal do regime fluvial (COE et al., 2011). A Ilha do Bananal, portanto, opera como um termômetro de precisão: os sinais de declínio pluviométrico detectados em 77,4% de seu entorno indicam que a proteção conferida pela inércia climática amazônica está perdendo terreno para a degradação hidrológica vinda das áreas de expansão agrícola ao sul e oeste.

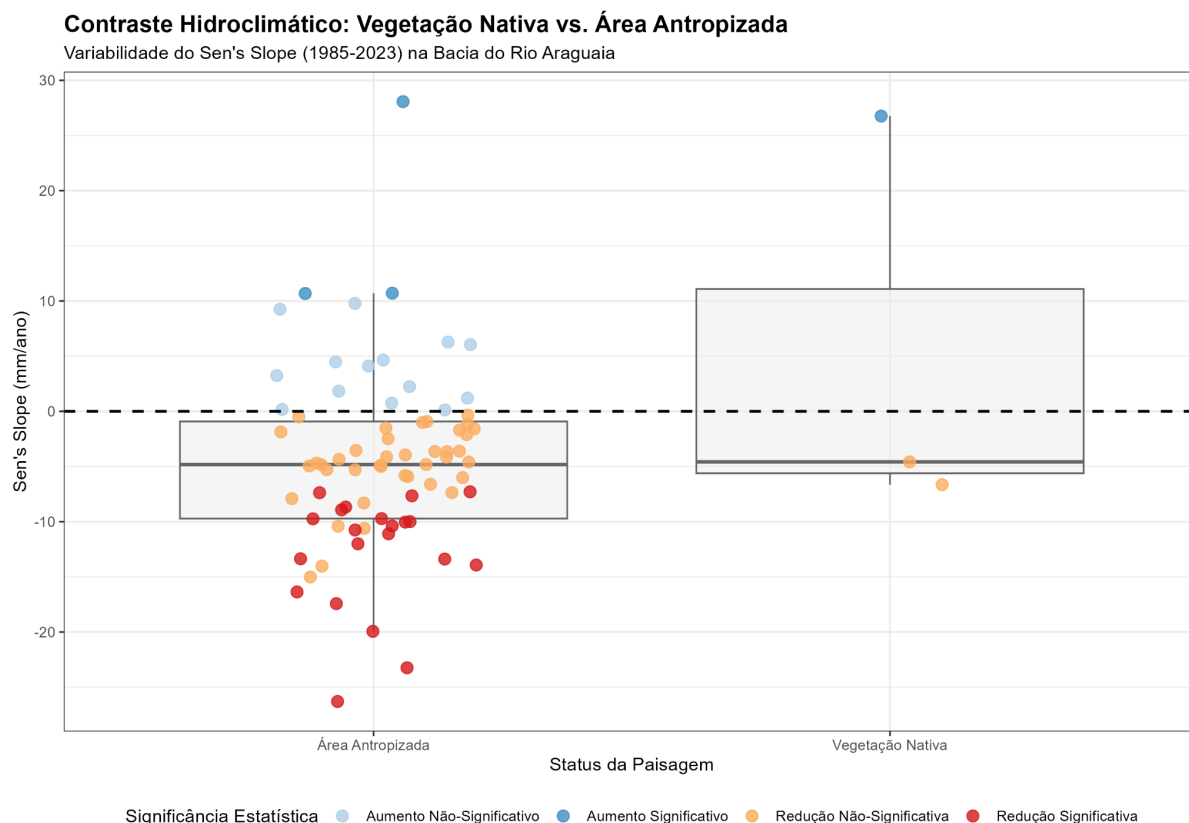
A manutenção da relativa estabilidade observada no Médio Araguaia em comparação ao Alto curso deve-se, em grande parte, à presença estratégica de extensas áreas protegidas, como as Terras Indígenas e Unidades de Conservação, que funcionam como escudos bioclimáticos. Essas áreas preservam a rugosidade da paisagem e sustentam a

evapotranspiração necessárias para a formação de núcleos de chuva locais, mitigando temporariamente o impacto do desmatamento regional (MARENGO, 2006). Contudo, a tabela apresentada anteriormente, demonstra que o setor médio já apresenta uma taxa de redução significativa de 22,5%, o que sugere que a barreira de preservação está sendo asfixiada pela escala dos impactos em montante. Sem uma recuperação efetiva da capacidade de infiltração nas zonas de nascentes e uma gestão rigorosa do uso do solo na sub-bacia do Rio das Mortes, a Ilha do Bananal corre o risco de transitar de um refúgio de biodiversidade para uma zona de dissipação hídrica, comprometendo a estabilidade de todo o sistema Araguaia (SPERA et al., 2016; MAPBIOMAS, 2025).

Mudanças Locais e Globais

A discussão acerca das causas da retração hídrica na bacia do rio Araguaia frequentemente orbita em torno de uma dicotomia entre as forçantes climáticas globais e as alterações do uso do solo local, porém, os dados sugerem que não se trata de processos isolados, mas de uma sinergia perversa onde a escala local amplifica drasticamente o sinal global. Embora as teleconexões atmosféricas, como as fases quente e fria do El Niño Oscilação Sul (ENOS), ditem os ritmos plurianuais de secas severas ou excessos pluviométricos no bioma Cerrado (NASCIMENTO et al., 2021), a capacidade da bacia de absorver esses choques está sendo sistematicamente erodida pela conversão da paisagem. O que se observa, através do contraste estatístico apresentado no Boxplot de variabilidade (Figura 22), é que a componente local - a antropização acelerada - atua como um fator de desequilíbrio que “rouba” a resiliência do sistema, transformando oscilações naturais em tendências de declínio persistentes. Ao removermos a cobertura vegetal nativa, desativamos o mecanismo de regulação térmica e hídrica descrito com o “ar condicionado” regional, uma infraestrutura biológica onde as florestas e savanas moderam o clima e garantem a estabilidade do ciclo hidrológico através da manutenção da rugosidade e do fluxo de vapor (COE et al., 2017).

Figura 22. Variabilidade das tendências de precipitação em função do status de conservação da paisagem na bacia do rio Araguaia (1985 - 2023).



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Organizado pelo autor (2026).

Este contraste entre as escalas torna-se visualmente irrefutável ao analisarmos a distribuição do Sen's Slope em relação ao status da paisagem, onde as estações situadas sob domínios de Vegetação Nativa mantêm uma mediana próxima à linha de estabilidade (zero), enquanto o agrupamento das Áreas Antropizadas exibe uma dispersão predominantemente negativa com uma concentração crítica de reduções significativas. Tal comportamento evidencia que, embora o fenômeno das mudanças globais atinja a bacia como um todo, a magnitude da perda hídrica é severamente agravada nos setores onde a integridade ecológica foi rompida. Evidências hidrológicas robustas corroboram essa interpretação ao demonstrar que cerca de dois terços (66%) das mudanças observadas no comportamento hidrológico do rio Araguaia nas últimas décadas são atribuíveis diretamente às alterações na cobertura da terra, e não apenas à variabilidade climática natural de grande escala (COE et al., 2011; SUIZU et al., 2022). Reflete-se, assim, uma realidade onde a bacia manifesta sinais de

escassez mesmo em períodos de neutralidade climática oceânica, sugerindo uma falha estrutural em sua capacidade de reciclagem interna de umidade.

A moderação climática exercida pela vegetação original é operada através do balanço de energia na interface solo-atmosfera, onde o Cerrado preservado atua na partição eficiente entre calor sensível e latente. A substituição dessas fitofisnomias por pastagens e monoculturas altera o albedo e a capacidade de transpiração, resultando em uma superfície que devolve mais calor para a baixa atmosfera e retém menos umidade no perfil de solo. Dessa forma, o desmatamento massivo nos divisores de água não apenas reduz o volume total precipitado, mas torna o sistema “anestesiado” para responder a eventos climáticos extremos, privando a bacia dos mecanismos de amortecimento biótico que mitigariam os déficits hídricos. Sem o suporte das raízes profundas e da rugosidade original, o solo aquece e compacta, favorecendo o escoamento rápido em detrimento da recarga profunda e estabelecendo uma resposta termodinâmica que retroalimenta a trajetória de ressecamento observada nos mapas de tendência (MARENGO, 2006; SPERA et al., 2016).

Esta interdependência de escalas revela que a gestão da bacia do Araguaia não pode ser dissociada das políticas de conservação florestal, uma vez que a vegetação nativa é a chave para sustentar a estabilidade hídrica frente a uma atmosfera cada vez mais instável. O reconhecimento de que a antropização local é o principal motor de aceleração da aridez regional impõe uma revisão sobre o planejamento hídrico, que já não pode se basear na premissa de que o clima oscila em torno de médias históricas imutáveis (MILLY et al., 2008). Se a escala local continuar a perder sua cobertura protetiva, o sinal das mudanças globais encontrará um terreno progressivamente mais vulnerável, consolidando um regime onde a bacia perde sua capacidade de autorregulação e passa a operar em um estado de estresse hídrico permanente, independentemente das oscilações oceânicas globais.

Implicações para a Gestão

A consolidação das tendências negativas identificadas nesta pesquisa, especialmente nas zonas de cabeceiras e no Rio das Mortes, impõe uma revisão crítica sobre os instrumentos de gestão de recursos hídricos vigentes na bacia. O planejamento hídrico tradicional no Brasil fundamenta-se na premissa da estacionariedade, onde se assume que as variáveis hidrológicas oscilam dentro de limites fixos baseados em médias históricas. Contudo, como preconizado pelo clássico estudo de Milly et al., (2008), a “estacionariedade está morta”, uma vez que as

mudanças climáticas e as intensas alterações no uso do solo rompem o equilíbrio dos regimes fluviais, tornando o passado um guia insuficiente para as projeções de disponibilidade futura.

Essa ruptura de paradigma tem implicações diretas sobre os processos de outorga de direito de uso da água. Atualmente, o cálculo da disponibilidade hídrica para a autorização de captações, como para a irrigação de pivôs centrais, baseia-se em vazões de referência estáticas, como a Q95 (vazão com 95% de persistência). Se a bacia apresenta uma trajetória de declínio pluviométrico sistêmico - como o Sen's Slope de até -25 mm/ano detectado nas áreas de recarga - a manutenção dessas vazões de referência tornam-se uma ficção estatística. O risco iminente é a emissão de “outorgas de papel”, onde o volume concedido legalmente supera a capacidade real de entrega do rio nos períodos de estiagem, gerando um cenário de insegurança jurídica e hídrica (ANA, 2024).

A pressão sobre o sistema Araguaia é evidenciada pelo crescimento vertiginoso da agricultura irrigada, com destaque para a expansão de pivôs centrais no estado de Goiás e no leste do Mato Grosso (PEREIRA JÚNIOR et al., 2017). O relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos da ANA (2024) reforça que a bacia já enfrenta áreas de conflito potencial onde a demanda se aproxima perigosamente da oferta. Ao ignorar a tendência de redução na recarga dos aquíferos e a consequente diminuição do fluxo de base, o modelo de gestão atual falha em prever momentos de falência técnica dos mananciais. A realidade de um Araguaia que “seca pelo topo” exige uma transição para modelos de gestão adaptativa, como a implementação de Outorgas com Gestão de Garantia e Prioridade, que permitem ajustes dinâmicos conforme a variação real da disponibilidade hídrica, protegendo tanto os ecossistemas quanto a viabilidade do agronegócio.

Portanto, as evidências apresentadas nesta dissertação sugerem que os Planos de Bacia e os critérios de outorga das secretarias estaduais e da ANA precisam incorporar as análises de tendência climática como variável de ponderação de risco. Não se trata apenas de monitorar quanto chove, mas de reconhecer que o sistema está perdendo sua capacidade de suporte. O reconhecimento oficial de que as mudanças climáticas adicionam incertezas severas aos processos de outorga (ANA, 2024) deve ser o ponto de partida para um planejamento que priorize a conservação das áreas de recarga e a eficiência tecnológica, sob pena de enfrentarmos uma crise de escassez persistente em uma bacia historicamente marcada pela abundância.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação sobre a rede pluviométrica da bacia do rio Araguaia demonstra, primordialmente, que a abundância de dados brutos nos repositórios oficiais não se traduz, necessariamente, em qualidade de informação para a tomada de decisão. O rigoroso processo de qualificação algorítmica empregado nesta pesquisa revelou uma “economia dos dados” que fragiliza a gestão ambiental: ao submeter o inventário inicial de 209 estações a filtros de consistência física e continuidade temporal, observou-se que apenas 43,5% da rede (91 estações) possuía robustez estatística para modelagem de longo prazo. Essa redução drástica não constitui uma perda informativa, mas uma salvaguarda metodológica indispensável para evitar o fenômeno das “falsas secas” induzidas por falhas instrumentais ou lacunas de monitoramento, garantindo que as análises de tendência subsequentes fossem pautadas em registros de alta fidedignidade.

Este cenário evidencia que a infraestrutura de observação hidrometeorológica na bacia hoje obedece a uma lógica de manutenção institucional que, muitas vezes, ignora a complexidade ecológica e as necessidades de monitoramento em áreas de fronteira agrícola. A identificação de vazios de dados em regiões cruciais para a preservação e recarga hídrica, como no Baixo Araguaia e em setores elevados de chapada, impõe uma “cegueira técnica” que compromete a capacidade de resposta dos órgãos gestores frente aos eventos extremos. A validação das rotinas automatizadas desenvolvidas em linguagem R prova que a auditoria sistemática dos metadados é o único caminho para assegurar a reprodutibilidade científica, permitindo que a investigação avance da simples descrição numérica para um diagnóstico que reflete a real fragilidade do sistema hídrico frente às pressões climáticas e antrópicas contemporâneas.

O diagnóstico central da modelagem temporal aponta para uma mudança estrutural profunda, indicando que a bacia não atravessa apenas uma oscilação climática cíclica, mas um processo de ressecamento contínuo e severo. A taxa de redução pluviométrica identificada pelo Estimador de Sen (Sen's Slope), na ordem de -25,49 mm/ano, aliada à inversão drástica do Índice de Anomalia de Chuva (IAC), marca o ano de 2007 como o ponto de inflexão definitiva na série histórica contemporânea. Desde este marco, o padrão de “Alta Umidade” que caracterizou o final do século XX foi substituído por um bloco de anos classificados como “Muito Secos”, sugerindo que a bacia opera agora sob um novo patamar de disponibilidade hídrica. Esta ruptura no comportamento histórico desafia as premissas de

planejamento regional, uma vez que a magnitude da perda anual acumulada ultrapassa a capacidade de autorrecuperação do sistema em escalas de tempo curtas.

Este novo regime pluviométrico é acompanhado por uma alteração qualitativa na “assinatura” das chuvas, evidenciada pelo comportamento dos eventos extremos (P90). Observa-se que, embora o volume total precipitado apresente uma tendência de queda, a energia hídrica manifesta-se de forma mais concentrada e agressiva, reduzindo o número de dias com chuva, mas aumentando a severidade das tempestades isoladas. Tal dinâmica compromete diretamente a partição do balanço hídrico: a intensidade dos eventos favorece o escoamento superficial rápido em detrimento da infiltração profunda, o que resulta num paradoxo hidrológico onde o solo permanece seco apesar de eventos de precipitação severos. A compreensão desta transição, que substitui a regularidade pela intermitência extrema, fornece a base necessária para discutir como esta crise se distribui de forma desigual no espaço e no relevo da bacia.

Espacialmente, a crise hídrica manifesta-se de forma assimétrica e revela o fenômeno crítico do “secamento do topo”. Os resultados evidenciam que o setor Sul da bacia - que abriga as cabeceiras do Araguaia e do Rio das Mortes - é o território mais impactado, sofrendo as maiores reduções justamente nas áreas de chapadas e platôs acima de 500 metros de altitude. Por serem as “caixas d’água” naturais do sistema, o déficit hídrico nestas zonas de recarga estratégica compromete a manutenção do fluxo de base em toda a calha principal. Esta polarização geográfica sugere que a porção setentrional da bacia apresenta maior resiliência pluviométrica devido à sua posição latitudinal e à proximidade com a dinâmica convectiva da Massa Equatorial Continental (mEc), enquanto os compartimentos do Sul enfrentam uma perda crônica de conectividade hídrica que ameaça a perenidade dos seus principais afluentes. A compreensão deste contraste latitudinal é fundamental para identificar que a vulnerabilidade do Araguaia não é puramente climática, mas está intrinsecamente ligada à compartimentação geomorfológica e à localização das suas áreas de recarga.

Esta distribuição desigual do déficit pluviométrico aponta para uma sinergia direta entre a variabilidade climática e a transformação antrópica da superfície, na qual os compartimentos de relevo, por si só, não atuam como um fator causal ou determinante na alteração dos padrões de chuva da bacia do Araguaia. Os resultados tornam evidente que o relevo funciona estritamente como um cenário passivo de alta vulnerabilidade geográfica, enquanto a conversão massiva da vegetação nativa por áreas antropizadas consolida-se como o fator real e motriz que impulsionou o ressecamento constatado nas séries históricas. O fenômeno do desabastecimento das zonas elevadas implica uma redução na pressão

hidrostática necessária para alimentar os aquíferos que sustentam o rio durante a estação seca, acelerando o processo de intermitência de tributários que historicamente eram perenes. Tal cenário demonstra que a degradação do ciclo hidrológico regional não é fruto de dinâmicas lito-geomorfológicas intrínsecas, mas sim uma resposta climática direta à supressão acelerada da cobertura vegetal original em compartimentos do relevo que deveriam atuar como as cabeceiras alimentadoras de todo o sistema fluvial (SPERA et al., 2016).

A sinergia entre as alterações climáticas globais e a dinâmica local de uso do solo constitui o motor central do desequilíbrio hídrico observado, revelando que a antropização acelerada exacerbou a vulnerabilidade natural da bacia. A substituição massiva da vegetação nativa do Cerrado por pastagens e monoculturas, amplamente documentada pelos dados do MapBiomas entre 1985 e 2023, não representou apenas uma mudança na cobertura vegetal, mas a desativação de uma complexa “bomba biótica” de reciclagem de umidade. Ao remover a estrutura arbórea e profunda do Cerrado, o sistema perdeu a sua capacidade de regular o balanço termodinâmico e de devolver vapor de água à atmosfera, o que enfraquece a formação de chuvas locais e intensifica o aquecimento da superfície. Este processo cria um ciclo de retroalimentação positiva onde a degradação do solo e a escassez pluviométrica se alimentam mutuamente, empurrando a bacia para um estado de aridez estrutural que a variabilidade climática isolada não explica.

Este impacto manifesta-se fisicamente na alteração da partição do fluxo de água, onde a perda da rugosidade vegetal eliminou o “freio hidráulico” que historicamente retardava o movimento da água sobre o terreno. Sem a resistência oferecida pela vegetação nativa, os eventos de precipitação - que se tornaram mais agressivos e concentrados, conforme demonstrado pela assinatura do P90 - resultam num escoamento superficial rápido e violento, reduzindo o tempo de residência da água na superfície e, consequentemente, a taxa de infiltração profunda. O resultado é um compromisso direto da recarga dos aquíferos, que deixam de receber o subsídio hídrico necessário para sustentar os rios durante a estação seca, resultando em cheias repentinas e estiagens cada vez mais severas. Esta degradação das funções eco-hidrológicas nas cabeceiras e áreas de chapada repercute-se de forma em cascata por toda a rede de drenagem, alcançando os ecossistemas mais sensíveis do médio curso que dependem da regularidade do fluxo fluvial para a sua sobrevivência.

Esta desconexão hidrológica entre o ressecamento das cabeceiras e a integridade das zonas úmidas no médio curso projeta uma ameaça direta sobre a Ilha do Bananal, o epicentro da biodiversidade da bacia. A redução da pluviosidade nas áreas de recarga estratégica implica um enfraquecimento progressivo do pulso de inundação, o processo vital que garante

a troca de nutrientes, sedimentos e organismos entre o canal principal do rio e as suas planícies adjacentes. Sem a amplitude hídrica necessária para saturar periodicamente estes ecossistemas, a Ilha do Bananal perde a sua função de “esponja” biológica, comprometendo a resiliência das matas de galeria e a manutenção das lagoas marginais que servem de berçário para a ictiofauna. Este cenário de “estrangulamento” do pulso hídrico sugere que a bacia está perdendo a sua capacidade de amortecimento ecológico, tornando o sistema mais vulnerável a incêndios severos e à perda de conectividade entre os habitats aquáticos e terrestres.

A degradação deste ciclo de inundação não afeta apenas a biodiversidade local, mas desestrutura toda a retroalimentação sistêmica que sustenta o equilíbrio do Araguaia. A planície de inundação, ao receber menos água das cabeceiras secas do Sul, deixa de atuar como um regulador térmico e hídrico para o baixo curso, o que pode intensificar os efeitos de aridez nas regiões a jusante. A observação desta fragilidade ecológica, ancorada nos dados de tendência pluviométrica, revela que o custo ambiental da ocupação das chapadas é pago pela perda de integridade funcional dos ecossistemas mais sensíveis do médio curso. Tal evidência força uma reflexão crítica sobre os limites da exploração dos recursos naturais, deslocando o foco da simples análise climática para um alerta institucional sobre a viabilidade futura do monitoramento e da gestão do território, diante de um padrão hídrico que já não permite o retorno a estados de equilíbrio anteriores.

Por fim, o alerta institucional derivado desta investigação é inequívoco: o paradigma da estacionariedade na gestão de recursos hídricos, que pressupõe que o passado é um guia fiel para o futuro, chegou ao fim. Os resultados aqui apresentados demonstram que o modelo atual de concessão de outorgas de água, fundamentado em médias históricas estáticas que já não refletem a realidade climática do século XXI, corre o risco iminente de gerar as chamadas “outorgas de papel”. No contexto de uma fronteira agrícola em rápida expansão e da explosão do uso de pivôs centrais de irrigação, conceder direitos de uso baseados num regime de chuvas que já não existe é um caminho direto para conflitos sociais, econômicos e ecológicos irreversíveis, uma vez que a água real disponível no rio é significativamente menor do que a projetada nos registros de décadas passadas.

A preservação do rio Araguaia exige, portanto, uma transição urgente para modelos de governança hídrica adaptativos. Esta mudança de postura institucional deve priorizar a proteção rigorosa das áreas de recarga nas chapadas do Planalto Central, tratando-as não apenas como zonas de conservação ambiental, mas como infraestruturas críticas de segurança hídrica nacional. A perda da capacidade de infiltração profunda e o ressecamento estrutural detectado nas zonas de topo indicam que o tempo de resposta para políticas de mitigação é

escasso. O diagnóstico aqui traçado, ancorado na transparência do código e na fidedignidade dos dados qualificados, fornece o embasamento técnico necessário para que a gestão do território deixe de ser reativa e passe a ser pautada pela realidade factual de uma bacia que luta para manter a sua perenidade face à pressão antropogênica e climática.

Conclui-se que o destino do Araguaia está intrinsecamente ligado à nossa capacidade de ler as novas assinaturas do clima e de ajustar a nossa pegada hídrica a esses limites. Se o “ar condicionado” natural da bacia e a sua “bomba biótica” continuarem sendo desmantelados em favor de uma visão produtiva de curto prazo, o cenário de intermitência hídrica deixará de ser uma projeção estatística para se tornar a realidade geográfica de um dos rios mais emblemáticos do Brasil Central. Este estudo entrega, assim, não apenas uma análise de tendências, mas um instrumento de auditoria territorial que clama pela manutenção do pulso hídrico como condição soberana para o futuro da vida e da economia na bacia do rio Araguaia.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADITYA, F. et al. Rainfall trend analysis using Mann-Kendall and Sen’s slope estimator test in West Kalimantan. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 893, n. 1, p. 012006, 2021.

ACOSTA, R. **Um modelo biosfera-hidrosfera para a bacia do Tocantins-Araguaia**. 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023: Informe Anual**. Brasília: ANA, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras**. Edição Especial. Brasília: ANA, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2005.

AQUINO, S.; LATRUBESSE, E. M.; FILHO, E. E. S. **Caracterização Hidrológica e Geomorfológica dos Afluentes da Bacia do Rio Araguaia**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 10, n. 1, p. 43-54, 2009.

AQUINO, S.; STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. **Regime Hidrológico e Aspectos do Comportamento Morfohidráulico do Rio Araguaia**. Revista Brasileira de Geomorfologia, ano 6, n. 2, p. 29-41, 2005.

ARAÚJO, L. E.; MORAES NETO, J. M.; SOUSA, F. A. S. **Classificação da precipitação anual e da quadra chuvosa da bacia do rio Paraíba utilizando índice de Anomalia de Chuva (IAC)**. Ambiente & Água, v. 4, n. 3, p. 93–110, 2009.

ARCHIBALD, S. et al. **Distribution and Determinants of Savannas**. In: Savanna Woody Plants and Large Herbivores, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119081111.ch1>.

ASSIS, P.; BAYER, M. (2020). **Análise multitemporal do sistema fluvial do rio Araguaia, Aruanã – Goiás, Brasil**. Élisée - Revista De Geografia Da UEG, 9(2), e922003. Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/elisee/article/view/10438>.

ASSIS, P. C.; FARIA, K. M. S.; BAYER, M. Unidades de Conservação e sua efetividade, 2021.

BAYER, M. **Diagnóstico dos processos de erosão/assoreamento na planície aluvial do rio Araguaia: entre Barra do Garças e Cocalinho**. 2002. 138 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2002.

BAYER, M. **Dinâmica do transporte, composição e estratigrafia dos sedimentos da planície aluvial do Rio Araguaia**. 2010. 98 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

BAYER, M.; ZANCOPÉ, M. H. C. **Ambientes sedimentares da planície aluvial do rio Araguaia**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 15, n. 2, p. 203-220, 2014.

BRASIL. Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BUISSON, E. et al. **Resilience and restoration of tropical and subtropical grasslands, savannas, and grassy woodlands**. Biological Reviews, v. 93, n. 2, p. 590–609, 2018.

CARVALHO, A. T. F. **Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no Brasil**. Caderno Prudentino de Geografia, n. 42, v. 1, 2020.

CHRISTOFOLETTI, A. **A análise de bacias hidrográficas**. In: Geomorfologia. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. p. 102-127.

COE, M. T.; BRANDO, P. M.; DEEGAN, L. A.; MACEDO, M. N.; NEILL, C.; SILVÉRIO, D. V. **The forests of the Amazon and Cerrado moderate regional climate and are the key to the future.** Tropical Conservation Science, v. 10, p. 1-6, 2017. DOI: 10.1177/1940082917720671.

COE, M. T.; LATRUBESSE, E. M.; FERREIRA, M. E.; AMSLER, M. L. **The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil.** Biogeochemistry, v. 105, n. 1-3, p. 119-131, 2011.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences.** 2. ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.

COSTA, C. W.; MOSCHINI, L. E.; LORANDI, R. **Aquisição de dados geográficos em plataformas livres para estudos ambientais em bacias hidrográficas.** Em: MORAES, M. E. B.; LORANDI, R. (Orgs.). **Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas.** Ilhéus, BA: Editus, 2016. p. 15-33.

COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. **Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia.** Journal of Hydrology, v. 283, n. 1, p. 206-217, 2003.

De Araújo, L., Neto, J., & Sousa, F. (2009). **Classificação da precipitação anual e da quadra chuvosa da bacia do rio Paraíba utilizando índice de Anomalia de Chuva (IAC).** Ambiente E Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 4, 93-110. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.105>.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. (1998). **Water in Environmental Planning,** New York: W.H. Freeman and Company. 818p.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. **WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas.** International Journal of Climatology, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.

GOMES, D. J. C.; FERREIRA, N. S.; LIMA, A. M. M. **Tendências de variabilidade espaço-temporal pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Araguaia.** Enciclopédia Biosfera, Goiânia, v. 16, n. 29, p. 1421-1434, 2019.

GONÇALVES, R.; ENGELBRECHT, B.; CHANG, H. **Evolução da contribuição do Sistema Aquífero Urucua para o Rio São Francisco, Brasil.** Águas Subterrâneas, v. 32, p. 1-10, 2017. DOI: 10.14295/ras.v32i1.28916.

HOFFMANN, W. A. et al. **Ecological thresholds at the savanna–forest boundary: how plant traits, resources and fire govern the distribution of tropical biomes.** Ecology Letters, v. 15, n. 7, p. 759–768, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **BDiA: Banco de Dados e Informações Ambientais**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021b.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report. Geneva: IPCC, 2007.

LATRUBESSE, E. M.; ARIMA, E.; FERREIRA, M. E.; NOGUEIRA, S. H.; WITTMANN, F.; DIAS, M. S.; DAGOSTA, F. C. P.; BAYER, M. **Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome**. Conservation Science and Practice, v. 1, n. 9, e77, 2019.

LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C. **Geomorphology and Environmental Aspects of Araguaia Fluvial Basin, Brazil**. Zeitschrift für Geomorphologie, v. 129, p. 109-127, 2002.

LEHMANN, C.; ARCHIBALD, S.; HOFFMANN, W.; BOND, W. **Deciphering the distribution of the savanna biome**. The New Phytologist, v. 191, n. 1, p. 197-209, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03689.x>.

LININGER, K. B.; LATRUBESSE, E. M. **Flooding hydrology and peak discharge attenuation along the middle Araguaia River in central Brazil**. Catena, v. 143, p. 90-101, 2016.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição de cenários climáticos para o território brasileiro no futuro, ao longo do século XXI**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCH, R. M.; KUNDZEWICZ, Z. W.; LETTENMAIER, D. P.; STOUFFER, R. J. **Climate change: Stationarity is dead: whither water management?** Science, v. 319, n. 5863, p. 573-574, 2008.

MIZIARA, F.; FERREIRA, N. C. **Expansão da fronteira agrícola e evolução da ocupação e uso do espaço no estado de Goiás: subsídios à política ambiental**. In: FERREIRA, L. G. (Org.). A encruzilhada socioambiental – biodiversidade, economia e sustentabilidade no Cerrado. Goiânia: Editora UFG, 2008. p. 112-126.

MORAIS, M. A. V. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Araguaia**. 2019, p. 64, Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2019. Disponível em: http://177.105.2.222/bitstream/1/38008/2/TESE_Simula%C3%A7%C3%A3o%20hidrol%C3%B3gica%20na%20bacia%20hidrogr%C3%A1fica%20do%20Rio%20Araguaia.pdf.

NASCIMENTO, Diego Tarley Ferreira; MARTINS, Alécio Perini; LUIZ, Gislaine Cristina; LOPES, Regina Maria (Org.). **Climatologia do Cerrado: variabilidades, suscetibilidades e mudanças climáticas no contexto do Cerrado brasileiro**. Goiânia: C&A Alfa Comunicação, 2021.

OSBORNE, C. et al. **Human impacts in African savannas are mediated by plant functional traits**. *The New Phytologist*, v. 220, n. 1, p. 10-24, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.15236>.

PAZ, A. R. **Hidrologia Aplicada**. Caxias do Sul: UERGS, 2004. (Apostila didática).

PEREIRA JÚNIOR, L. C.; FERREIRA, N. C.; MIZIARA, F. **A expansão da irrigação por pivôs centrais no estado de Goiás: 1984-2015**. *Boletim Goiano de Geografia*, Goiânia, v. 37, n. 2, p. 3323-341, maio/ago. 2017.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. 2025. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>.

RATNAM, J. et al. **When is a ‘forest’ a savanna, and why does it matter?** *Global Ecology and Biogeography*, v. 20, n. 5, p. 653–660, 2011.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Conceitos básicos de modelagem hidrológica**. Santa Maria: INPE, 2008.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. **As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado**. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília: EMBRAPA, 2008. v. 2.

SANO, E. E. et al. **Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil**. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 166, p. 113–124, 2010.

SANKARAN, M. et al. **Determinants of woody cover in African savannas**. *Nature*, v. 438, p. 846–849, 2005.

SCHETINE, I. B. **Modelagem hidrológica do trecho médio do rio Araguaia (2000 - 2020)**. 2023. 24 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Ambientais) – Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023.

SPERA, S.; GALFORD, G.; COE, M.; MACEDO, M.; MUSTARD, J. **Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier**. *Global Change Biology*, v. 22, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.13298>.

ROCHA, P. H. M.; FARIA, K. M. S. **Arquétipos geomorfométricos para a compartimentação do relevo: uma proposta para o bioma Cerrado**. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 23, n. 3, p. 1473-1491, 2022.

ROOY, M. P. van. **A rainfall anomaly index independent of time and space**. *Notos*, 1965.

SALMONA, Y. B. et al. **A worrying future for river flows in the Brazilian Cerrado provoked by land use and climate changes.** Sustainability, v. 15, n. 5, 2023.

SUIZU, T. M. et al. **Resposta da morfologia do médio-curso superior do Rio Araguaia às mudanças no regime hidrossedimentar no período 2001-2018.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 23, n. 2, 2022.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 1993.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia.** Recife: Edição do Autor, 2005.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. *Journal of Hydrology*, v. 342, p. 261-269, 2007. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.05.033.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **WMO-No. 168: Guide to Hydrological Practices.** Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. 6. ed. Geneva: WMO, 2008.