unesp

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DAS ÁREAS ÚMIDAS GEOGRAFICAMENTE ISOLADAS NAS BACIAS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ

FRANCIELLI MARIA VIEIRA DE CARVALHO

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

RIO CLARO / SP
2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"Júlio de Mesquita Filho"
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

FRANCIELLI MARIA VIEIRA DE CARVALHO

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DAS ÁREAS ÚMIDAS GEOGRAFICAMENTE ISOLADAS NAS BACIAS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente

Orientador: Profa. Dra. Vania Silvia Rosolen

Rio Claro - SP
2026

C331a

Carvalho, Francielli Maria Vieira de
Avaliação da vulnerabilidade ambiental das áreas úmidas geograficamente isoladas nas Bacias Piracicaba, Capivari e Jundiaí / Francielli Maria Vieira de Carvalho. -- Rio Claro, 2026
72 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientadora: Vania Silvia Rosolen

1. Mudanças climáticas. 2. Vulnerabilidade ambiental. 3. Sensoriamento remoto. 4. Área úmida. 5. Intervenção antrópica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa inova ao aplicar a metodologia Ramsar para avaliar a vulnerabilidade de áreas úmidas isoladas (AUGIs) na Bacia PCJ. O estudo revela o papel crítico das pressões climáticas e antrópicas na degradação desses ecossistemas, fornecendo bases científicas inéditas para subsidiar políticas públicas de conservação e manejo ambiental, alinhando-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável ODS 6, ODS 13 e ODS 15 da ONU.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research innovates by applying the Ramsar methodology to assess the vulnerability of geographically isolated wetlands (GIWs) in the PCJ Basin. The study reveals the critical role of climate and anthropic pressures on the degradation of these ecosystems, providing unprecedented scientific bases to support public conservation and environmental management policies, directly aligning with the UN Sustainable Development Goals SDG 6, SDG 13, and SDG 15.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

FRANCIELLI MARIA VIEIRA DE CARVALHO

AVALIAÇÃO DA VULNERABILDIADE AMBIENTAL DAS ÁREAS ÚMIDAS GEOGRAFICAMENTE ISOLADAS NAS BACIAS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Profa. Dra. VANIA SILVIA ROSOLEN
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. DANILO MARQUES MAGALHÃES
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. JEPHERSON CORREIA SALES
ICHS / UFR /Rondonópolis (MT)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 30 de abril de 2026.

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar essa etapa, a lembrança mais marcante que me vem à cabeça é o momento em que tomei a decisão de vir para a Unesp fazer a graduação. Titubeei um pouco diante dessa escolha por receio de sair de casa e de me deparar com o novo. Felizmente ao meu lado estava a mulher que sempre me motivou. E que ainda me motiva a estudar, a honrar meus sonhos e a me amar. Essa sempre será, mesmo na ausência, minha maior inspiração na vida: minha mãe, Ana.

Outro momento muito importante para mim foi durante a graduação ter tido a oportunidade de me introduzir no mundo da pesquisa por meio da orientação do professor Miltinho e de meus coorientadores, sempre atenciosos e cuidadosos, que continuo acompanhando de longe e admirando: João Carlos Pena e Julia Assis. Essa fase foi fundamental para meu amadurecimento como pesquisadora, aluna e futura profissional. Obrigada por me permitirem aprender tanto no LEEC, conhecimentos que levo comigo até hoje, e por me motivarem a continuar pesquisando.

Na finalização desse primeiro ciclo, cheguei à professora Vania, que, desde o primeiro e-mail em que demonstrei interesse em cursar o mestrado, me acompanhou de forma muito atenciosa ao longo de todo o processo. Obrigada por me proporcionar um encontro intelectual, profissional e afetivo, e por me apoiar em tantos momentos diferentes nesse período, mesmo quando era preciso me atender em sua sala às 7h ou às 19h.

Aos meus amigos, que me apoiaram não apenas nesta etapa, mas em tantas outras fases da minha vida, pelas palavras e por quem são. Agradeço especialmente à Mariele, que há mais de 14 anos compartilha comigo as desventuras da vida e, nessa fase, sempre teve uma escuta ativa e acolhedora, fundamental para que eu continuasse. Agradeço também ao Aron, que sempre me incentivou a seguir a caminhada acadêmica, a qual ele também trilha, e que, por meio de nossas conversas e do companheirismo, me entusiasma a continuar. À Beatriz Leonardo, amiga de longa data e companheira de grupo de pesquisa, agradeço por sempre me motivar e apoiar, tanto na academia quanto em outras frentes.

Aos amigos que Rio Claro me proporcionou: Mayara, João, Felipe, Marcela Nogueira, Carol, Isabela, Morgana, Aya, Júlia Faria, Júlia Fernandes, Isadora, Letícia, Ana Júlia, Giovanna, Juliana, Beatriz Cavalheri, Marcela Kondo, Ariel e Soraya. Mesmo seguindo em alguns casos caminhos diferentes e com o distanciamento físico, nossos reencontros e conversas sempre me fortalecem e renovam minha energia.

As pessoas que passaram por essa caminhada comigo, aos colegas de graduação, pós-graduação e de trabalho, que acompanharam parte dessa trajetória. Em especial, aos amigos da Fundação Florestal, ambiente em que mais permaneci durante o mestrado e onde encontrei grande apoio e incentivo para avançar na pesquisa.

Ao meu companheiro, José, que, com afeição, compromisso e confiança, vem me acompanhando e sendo acalanto nessa caminhada. Obrigada por compartilhar a vida e sonhar junto comigo.

À minha família, especialmente aos meus tios e meus irmãos, que, em meio a tantas tempestades, permaneceram ao meu lado. E agradeço aos meus sogros, que são uma grata surpresa na minha vida, por serem tão acolhedores e me apoiarem.

Aos professores das disciplinas cursadas, que contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação, ao programa de pós-graduação, que possibilitou minha participação em eventos importantes para o trabalho, e à seção técnica, por todo o apoio.

Ao grupo de pesquisa do qual faço parte: Karen, Deise, Everton, Lucas e Dhemerson que, mesmo atuando em diferentes frentes, contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa por meio dos encontros e trocas.

Por fim, agradeço aos membros da banca, professores Danilo Magalhães e Jepherson Salles, pela leitura atenta e pelos apontamentos realizados, que colaboraram substancialmente para a finalização deste trabalho.

RESUMO

As áreas úmidas são ecossistemas com baixa resiliência e que, atualmente, vêm sendo degradadas principalmente em decorrência da expansão agrícola e, de forma combinada, das mudanças climáticas. Diante dessa problemática e da escassez de pesquisas que avaliem a vulnerabilidade desses ambientes no Brasil, especialmente das Áreas Úmidas Geograficamente Isoladas (AUGIs), mais suscetíveis aos impactos dessas ameaças, esta pesquisa teve como objetivo identificar o estado atual, as principais pressões incidentes sobre as AUGIs localizadas nas Bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ) e a resposta ambiental frente a esses vetores. Esse processo integra a primeira etapa da Avaliação de Vulnerabilidade de Áreas Úmidas proposta pela Convenção de Ramsar. As bacias de contribuição das áreas úmidas foram adotadas como unidades de análise, permitindo a avaliação da suscetibilidade desses ecossistemas com base em fatores de relevo e solo. Para a identificação da vulnerabilidade, o índice SPEI-12 e o uso antrópico foram utilizados como variável de ameaça climática, enquanto os índices espectrais NDVI e MNDWI, derivados de imagens Landsat (1985–2024), representaram as respostas do meio. O processamento dos dados foi realizado na plataforma Google Earth Engine, associado a análises estatísticas de tendência e significância (testes de Mann-Kendall, Theil-Sen, correlação de Spearman). Os resultados indicam que as condições físicas relacionadas ao relevo e ao solo não configuram, de modo geral, fatores determinantes para o aumento da suscetibilidade natural das AUGIs. Entretanto, observou-se que essas áreas se estruturam como enclaves predominantemente circundados por matrizes antrópicas, o que potencializa sua vulnerabilidade a processos de degradação como poluição, assoreamento e redução da lâmina d'água. A análise de tendência evidenciou o aumento severo das pressões climáticas, especialmente em função da elevação da temperatura média e da ocorrência de secas moderadas a severas nos anos mais recentes, intensificando a evapotranspiração e a perda de água superficial, associado a isso houve também o aumento da pressão antrópica. As análises estatísticas reforçaram o papel protagonista dos fatores climáticos agindo em sinergia com a paisagem antropizada.

Palavras-chave: Áreas úmidas geograficamente isoladas; Sensoriamento remoto; Índices espectrais; Mudanças climáticas; Vulnerabilidade ambiental.

ABSTRACT

Wetlands are ecosystems with low resilience that are currently being degraded, primarily as a result of agricultural expansion and, in a combined manner, climate change. In light of this issue and the scarcity of research evaluating the vulnerability of these environments in Brazil, especially Geographically Isolated Wetlands (GIWs), which are more susceptible to the impacts of these threats, this study aimed to identify the current state, the main pressures acting upon GIWs located in the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí (PCJ) River Basins, and the environmental response to these vectors. This process integrates the first stage of the Wetland Vulnerability Assessment proposed by the Ramsar Convention. The catchment basins of the wetlands were adopted as the units of analysis, allowing for the assessment of the susceptibility of these ecosystems based on relief and soil factors. To identify vulnerability, the SPEI-12 index and anthropic land use were used as climate threat variables, while the spectral indices NDVI and MNDWI, derived from Landsat imagery (1985–2024), represented the environmental responses. Data processing was performed on the Google Earth Engine platform, associated with statistical analysis of trend and significance (Mann-Kendall, Theil-Sen, and Spearman correlation tests). The results indicate that physical conditions related to relief and soil do not generally constitute determining factors for increasing the natural susceptibility of GIWs. However, it was observed that these areas are structured as enclaves predominantly surrounded by anthropic matrices, which enhances their vulnerability to degradation processes such as pollution, silting, and the reduction of the water table. The trend analysis showed a severe increase in climate pressures, especially due to rising average temperatures and the occurrence of moderate to severe droughts in recent years, intensifying evapotranspiration and the loss of surface water; associated with this, there was also an increase in anthropic pressure. Statistical analyses reinforced the leading role of climate factors acting in synergy with the anthropized landscape.

Keywords: Isolated geographically wetlands; Remote sensing; Spectral indices; Climate change; Environmental vulnerability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Uso da terra nos municípios onde as AUGIs estudadas se localizam 12
Figura 2 - Modelo conceitual dos compartimentos de uma área úmida depressiva e seu balanço hídrico. 16
Figura 3 - Localização das áreas úmidas estudadas 23
Figura 4 - Fluxograma metodológico para a geração das bacias de contribuição 26
Figura 5 - AUGIs e suas respectivas Bacias de Contribuição 38
Figura 6 - Perfil Longitudinal da AUGIS 1 e 6 39
Figura 7 - Declividade das Bacias de Contribuição 41
Figura 8 - Solos presentes nas bacias de contribuição 43
Figura 9 - Correlação de Spearman: Índices espectrais vs SPEI (1985 - 2024) para as bacias de contribuição 46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Dinâmica temporal (1985 – 2024) dos índices espectrais (NDVI e MNDWI) e de precipitação-evapotranspiração das bacias de contribuição 45
Gráfico 2 - Distribuição das classes de uso da terra de 1985 a 2024 na área de estudo (limites das bacias de contribuição das AUGIs) 48
Gráfico 3 - Classificação de intensidade de seca e umidade (1985-2024) a partir dos valores do SPEI-12 (média geral de todas as bacias de contribuição) 48
Gráfico 4 - Evolução temporal da precipitação acumulada e da temperatura média nas bacias de contribuição 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização das AUGIs estudadas 24
Tabela 2 - Classificação da seca de acordo com os valores do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) 32
Tabela 3 - Aspectos morfométricos das bacias de contribuição 37
Tabela 4 - Distribuição de área ocupada em porcentagem por cada classe de relevo total 40
Tabela 5 - Ocupação em hectares e em percentual das classes de solo nas bacias de contribuição 42
Tabela 6 - Valores dos índices estatísticos obtidos para a validação dos dados climatológicos (precipitação acumulada mensal e temperatura média mensal) 44
Tabela 7 – Valores de S, p-valor e inclinação (β) e tendência de mudança de cada uma das variáveis analisadas 46
Tabela 8 – Valores de S, p-valor, β e tendência de mudança da precipitação acumulada e da temperatura média 49
Tabela 9 - Valores da Inclinação de Sen (β) para cada variável e suas respectivas características suscetibilidade 50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Índices morfométricos utilizados para analisar as bacias de contribuição.....27
Quadro 2 - Classes de relevo de acordo com a declividade (%) 28
Quadro 3 - Sensores Landsat utilizados para geração dos índices espectrais (1985-2024) 30
Quadro 4 - Índices estatísticos utilizados para a validação dos dados de precipitação e temperatura média, suas respectivas fórmulas, objetivos, valores padrão e referências 33

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANADEM – Modelo Digital de Elevação da ANA para a América do Sul

AU – Área Úmida

AUGI – Área Úmida Geograficamente Isolada

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CHIRPS – *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations*

ECMWF - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

GEE – *Google Earth Engine*

Ic – Índice de Circularidade

IFS - *Integrated Forecasting System*

IGC - Instituto Geográfico e Cartográfico de São Paulo

Kc – Coeficiente de Compacidade

MDE – Modelo Digital de Elevação

MK – Teste de Mann-Kendall

MNDWI – Índice de Diferença Normalizada da Água Modificado

NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

PCJ – Piracicaba, Capivari e Jundiaí

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SPEI – Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração

TS – Estimador de Tendência de Theil-Sem

UGRHI - Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11
1.2 Justificativa 12
1.3 Objetivos 14
1.3.1 Objetivo geral 14
1.3.2 Objetivos específicos 14
1.4 Estrutura da dissertação 14
2. REFERENCIAL TEÓRICO 15
2.1 Área úmidas geograficamente isoladas 15
2.2 Avaliação de Vulnerabilidade de Áreas Úmidas 17
2.2.1 Fatores de ameaça para as áreas úmidas 18
2.3 Abordagens de identificação da vulnerabilidade de áreas úmidas 20
3. MATERIAIS E MÉTODOS 23
3.1 Área de estudo 23
3.2 Geração das unidades de análise geográfica: as bacias de contribuição 25
3.2.1 Morfometria 26
3.3 Características de suscetibilidade 27
3.3.1 Declividade 28
3.3.2 Solos 28
3.4 Diagnóstico de perigo e riscos 29
3.4.1 Variáveis resposta 29
3.4.2 Ameaça 30
3.4.3 Análises estatísticas 34
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 36
4.1 Apresentação das bacias de contribuição e aspectos morfométricos 36
4.2 Suscetibilidade das bacias de contribuição 40
4.2.1 Relevo 40
4.2.2 Solos 41
4.2.4 Suscetibilidade das bacias de contribuição 43
4.3 Pressões e mudanças nas AUGIs 44
4.3.1 Validação dos dados climatológicos 44
4.3.2 Dinâmica dos fatores ao longo do tempo 45
5. CONCLUSÕES 51
6. REFERÊNCIAS 53
ANEXO A – DADOS DE PRECIPITAÇÃO ACUMULADA E TEMPERATURA MÉDIA ESTIMADOS E OBSERVADOS UTILIZADOS 65

1. INTRODUÇÃO

As áreas úmidas são ecossistemas de transição entre ambientes terrestres e aquáticos, perenes ou sazonalmente inundados, que abrigam plantas e animais adaptados aos processos hídricos característicos destes locais (Junk *et al*., 2013). Esses ecossistemas variam, e são agrupados em diversas classes, entre elas as áreas úmidas geograficamente isoladas (AUGIs), que correspondem a depressões topográficas, abastecidas por água da chuva e/ou do lençol freático, configurando um isolamento geográfico em relação a outros corpos d'água superficiais (Tiner, 2003; Junk, 2024).

É comum que esses compartimentos ambientais possuam uma resiliência reduzida e uma capacidade limitada para suportar as transformações naturais ou antropogênicas e que sejam frequentemente subestimados nas estratégias e ações de planejamento e conservação ambiental (Mitsch *et al*., 2010). Conforme chama atenção a Convenção sobre Zonas Úmidas Ramsar[1] (2025), o isolamento e o pequeno tamanho desses ambientes dificultam análises ambientais sobre o estado de vulnerabilidade dessas áreas. Sendo assim, os efeitos de mudanças diversas e sobretudo climáticas ainda são pouco compreendidos tratando-se das AUGIs.

A compreensão da degradação dos diferentes ecossistemas, incluindo as áreas úmidas, é de suma importância para projetar cenários e elaborar políticas de conservação. Em contraste com outros países, como nações europeias, EUA e China, onde pesquisas que envolvem desde modelagem climáticas até implantação de planos de conservação são elaboradas (Lefebvre *et al*., 2019; Londe *et al*., 2022; Xiang *et al*., 2020), o Brasil possui carência de estudos sobre o estado de vulnerabilidade desses ecossistemas, com pesquisas concentradas em sua caracterização hidrofísico-química (Almeida *et al*., 2016) e na compreensão da sua hidrodinâmica (Furlan *et al*., 2021).

Na região das Bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), um grupo de pesquisa inventariou uma quantidade expressiva de AUGIs, sobretudo na sub-bacia do Rio Corumbataí. A identificação foi realizada principalmente por meio de imagens de satélite e delimitadas com base na análise visual em critérios hidrogeomorfológicos (Junqueira, 2021; Furlan *et al*., 2021). Os pesquisadores também elaboraram outros estudos importantes sobre esses ambientes, envolvendo análises da hidrodinâmica, da recarga de aquíferos e potencial para estoque superficial de água, assim como análises abordando o uso da terra no entorno (Furlan *et al*.,2021; Furlan *et al*., 2023; Junqueira *et al*., 2024). Essas investigações compõem

[1] A Convenção de Ramsar é o tratado mais importante em nível global, cuja função é estabelecer os mecanismos que devem ser aplicados para a conservação de áreas úmidas

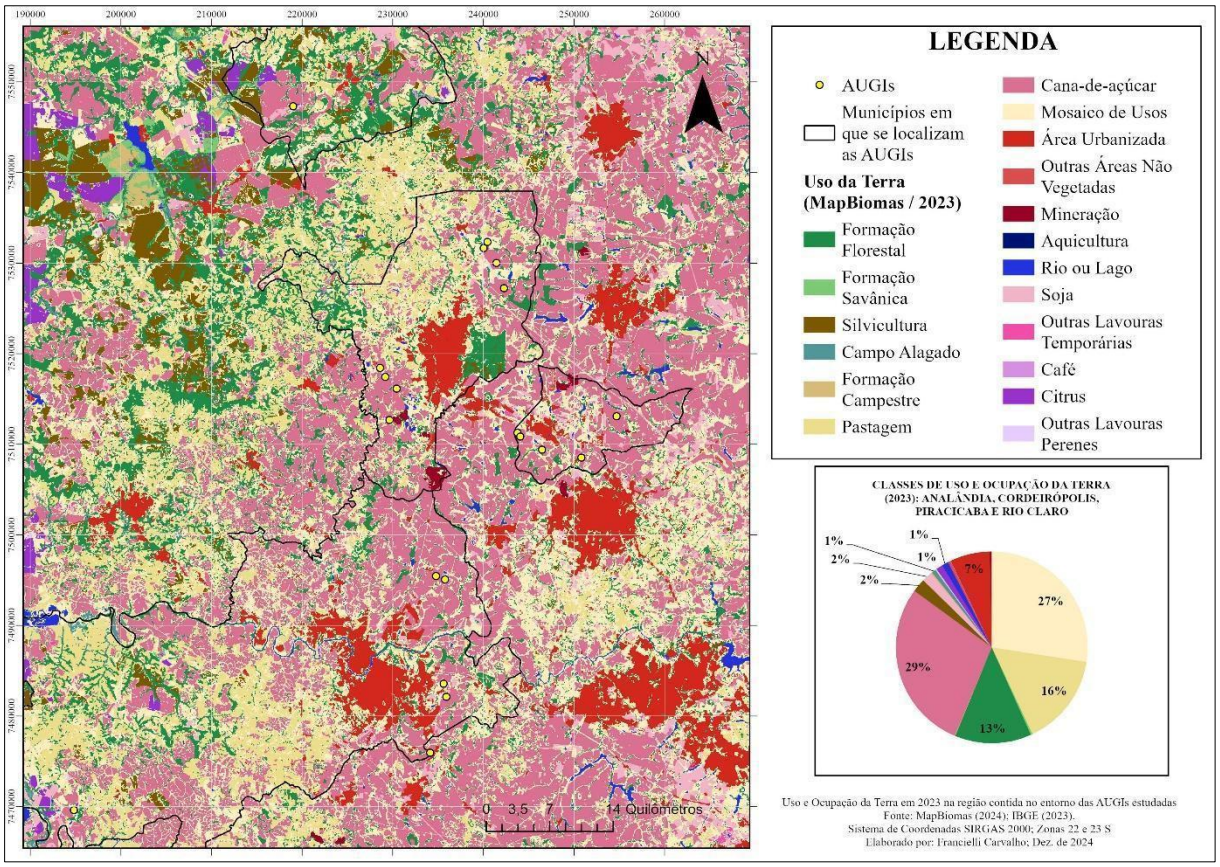
elementos importantes para o monitoramento das AUGIs, no entanto muitas outras lacunas de pesquisa persistem.

Uma delas é a avaliação da vulnerabilidade desses ambientes. Estudos recentes indicam que a conversão do uso da terra e as condições climáticas são os principais fatores de vulnerabilidade de áreas úmidas (Londe *et al*., 2022; Xu *et al*., 2019). Tais pesquisas não são localizados em território brasileiro, nem em locais com condições físicas semelhantes aos locais onde se localizam as AUGIs das Bacias PCJ.

1.2 Justificativa

A região a ser estudada apresenta características que conferem elevada vulnerabilidade às áreas úmidas. Um dos principais fatores é o uso da terra, com intensa ocupação agrícola no entorno das AUGIs há mais de 4 décadas. Esse processo está associado à predominância da atividade agroindustrial, com destaque para o cultivo de cana-de-açúcar, que atualmente ocupa 29% da área total dos municípios que abrigam essas áreas (Analândia, Cordeirópolis, Rio Claro e Piracicaba), suprindo a demanda de usinas locais (MapBiomas, 2023; Figura 1).

Figura 1 - Uso da terra nos municípios onde as AUGIs estudadas se localizam



Fonte: MapBiomas (2023)

Outro fator de ameaça para as AUGIs são problemas relacionados à sustentabilidade hídrica, uma vez que em meados de 2024, praticamente todos os municípios da área de estudo encontravam-se sob condição de seca extrema, conforme monitoramento do Cemaden (2024). Mesmo antes desses eventos, a região já enfrentava estresse hídrico significativo. Conforme indica o último relatório do Comitê das Bacias PCJ (2023), a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI 5), da qual o recorte analisado faz parte, apresenta atualmente disponibilidade hídrica *per capita* classificada como crítica, com apenas 944,33 m³/hab.ano, valor bem abaixo do mínimo recomendado para cenários críticos, que é de 1.500 m³/hab.ano (São Paulo, 2013). Adicionalmente, a mesma UGRHI apresenta um uso intensivo das águas subterrâneas, com uma taxa de exploração de 52,70%. Embora a região disponha de importantes reservas hidrogeológicas, incluindo os aquíferos Guarani, Tubarão, Rio Claro (não confinado) e o Aquiclude Passa Dois (nas formações Irati e Corumbataí) (Rocha, 2005), a sobre-exploração pode provocar o rebaixamento da superfície potenciométrica e, consequentemente, a exaustão dos aquíferos. Diante desse panorama, as áreas úmidas podem ser impactadas de uma maneira mais direta a curto ou médio prazo, uma vez que dependem do fluxo de água superficial e subterrâneo, além de volumes de precipitação e temperatura adequadas para continuarem existindo (COP RAMSAR, 2002; Londe *et al*., 2022).

Esses indicativos são propulsores para a investigar como está o estado da vulnerabilidade das AUGIs frente a esses e outros aspectos que podem ser potencialmente danosos para esses ecossistemas. Estudos assim são escassos nos países em desenvolvimento o que acaba por não gerar dados que possam contribuir com as políticas de gestão dessas áreas, desafio que pode ser mitigado através do uso do SIG (Sistemas de Informação Geográficas), do Sensoriamento Remoto e das imagens de satélite fornecidas gratuitamente (Thamaga *et al*., 2021). Essa abordagem possibilita o uso de uma cobertura de dados espacialmente extensa com uma resolução multitemporal relativamente fina, além de ser uma prática de baixo custo (Hoffman, 2005). Nesse campo, novos sensores de satélite robustos surgiram recentemente, com resolução espacial aprimorada, e estão sendo extremamente úteis para compreender os estados das zonas úmidas (Thamaga *et al*., 2021).

Uma iniciativa que pode colaborar com diagnósticos como o proposto aqui é o MapBiomas, que a partir das imagens de satélite Landsat (resolução de 30 metros) gera o mapeamento da cobertura do uso da terra de 1985 até 2024 para todo o território brasileiro, com os dados distribuídos gratuitamente. Através desse produto, tem sido possível uma análise facilitada da vulnerabilidade a longo prazo, observando o processo de conversão do uso da terra de ambientes naturais para ocupação antrópica. Para ter um diagnóstico em escala regional,

como na Região Hidrográfica da Amazônia ou na Região Semiárida acerca da degradação de ambientes naturais, estão associando dados do MapBiomas a índices de água e vegetação, obtidos por meio de imagens de satélite de livre acesso (Silva *et al*., 2022; Bento *et al*., 2025).

Assim, produtos como MapBiomas e ferramentas provenientes do Sensoriamento Remoto podem viabilizar a tentativa de compreender o estado de vulnerabilidade das AUGIs da Bacia PCJ, que tem como contexto uma análise escassa não só a nível local, mas também nacional e que se faz necessária, servindo tanto como informações básicas para tomadores de decisão na região, quanto numa escala mais ampla, indicando maneiras de identificar AUs potencialmente vulneráveis no recorte nacional por meio das ferramentas mostradas ao longo do estudo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar o estado de conservação das Áreas Úmidas Geograficamente Isoladas (AUGIs) presentes nas Bacias dos rios PCJ frente às pressões antrópicas e ambientais sobre esses ambientes ao longo dos últimos 39 anos (1985–2024).

1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar como os elementos de suscetibilidade a processos de erosão e transporte de poluentes/sedimentos podem impactar na resiliência das AUGIs;
- Avaliar a contribuição dos fatores de ameaça (SPEI-12 e uso atrópico) para a degradação das AUGIs a partir do uso de variáveis resposta (NDVI e MNDWI);
- Avaliar quais são as AUGIs mais vulneráveis frente às variáveis utilizadas.

1.4 Estrutura da dissertação

A execução da pesquisa será detalhada por meio dos capítulos seguintes. No Capítulo 2 foi elaborada a revisão bibliográfica fundamental para o desenvolvimento da pesquisa, se aprofundando no arcabouço teórico dos seguintes aspectos: AUGIs, Bacias de Contribuição, Avaliação de Vulnerabilidade de Áreas Úmidas, Fatores de ameaça para as AUs e o Sensoriamento Remoto para avaliações em áreas úmidas. No capítulo 3 foi apresentada a área de estudo e são indicados os materiais e métodos estabelecidos à luz do referencial teórico. No Capítulo 4 foram apresentados os resultados obtidos por meio de gráficos, tabela que embasaram a discussão. Por fim, no Capítulo 5 foram apresentadas as conclusões do estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico foi centrado na fundamentação da metodologia empregada, esclarecimento e adequação de termos e conceitos, contextualização das técnicas utilizadas e definição do objeto de estudo.

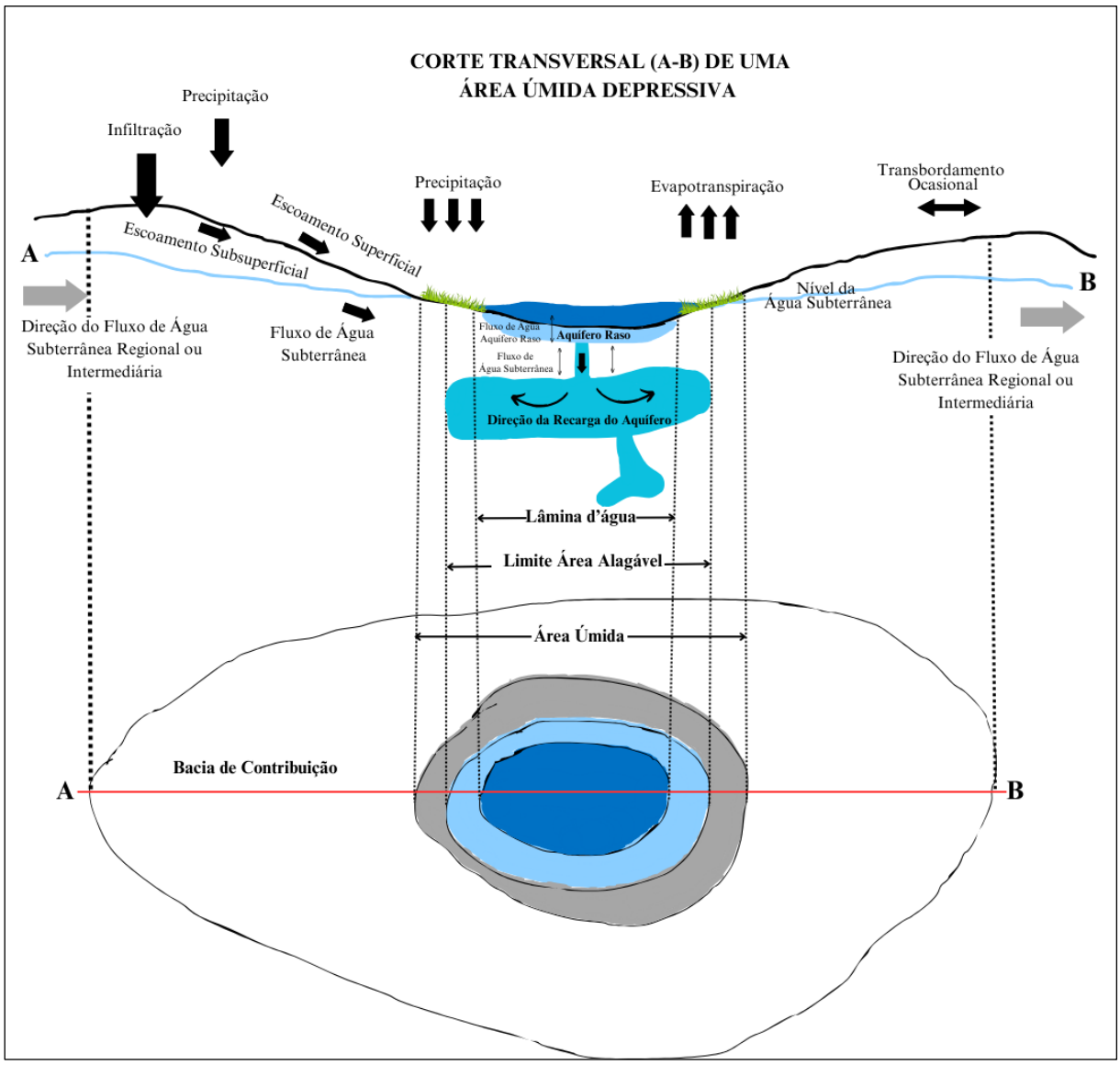
2.1 Área úmidas geograficamente isoladas

As áreas úmidas geograficamente isoladas, tem essa denominação por conta do seu isolamento topográfico, sendo ambientes topograficamente rebaixados em relação ao seu redor. Isso não torna esses ambientes isolados nos demais aspectos, como por exemplo, no âmbito hidrológico, pois apesar da ausência aparente de conexão com outros corpos hídricos a nível local, existem fluxos subterrâneos ou superficiais de curta duração (como transbordamentos de outros corpos d'água). Além disso, a nível regional ou global as AUGIs podem estar associadas a bacias hidrográficas ou outros sistemas hídricos (Tinner *et al*., 2003).

Na Depressão Periférica Paulista, região que abrange a área de estudo, as AUGIs estão localizadas sobretudo em paisagens antropizadas, assumindo uma forma circular ou oval, tendo uma área não muito expressiva comparada à ocupação do seu entorno (2 a 3 ha) e podem ser sazonal ou permanentemente alagadas. As áreas permanentes apresentam água superficial ao longo de todo ano, tendo aumento ou redução no volume de água a depender do nível de chuva, enquanto as sazonais em períodos de estiagem não possuem cobertura de água superficial (Furlan *et al*., 2024).

As AUGIs podem ser subdivididas em quatro compartimentos principais (Figura 1): (a) lâmina d'água – área inundada central; (b) limite da área alagável – extensão máxima ocupada pela água durante os períodos de cheia; (c) área úmida propriamente dita – zona com solos permanentemente saturados ou quase saturados, frequentemente coberta por vegetação densa; (d) bacia de contribuição – superfície delimitada por divisores de água, de onde se originam fluxos hídricos, sedimentos e material dissolvido em direção à AU (van der Kamp; Hayashi, 2009; Netto, 2015; Hayashi *et al*., 2016; Zuquette *et al*., 2020). Com base nos estudos citados, apresenta-se a seguir um modelo conceitual das regiões que compõem uma área úmida depressiva e o funcionamento do seu balanço hídrico.

Figura 2 - Modelo conceitual dos compartimentos de uma área úmida depressiva e seu balanço hídrico.



Fonte: Adaptado pela autora, 2026 (Baseado em van der Kamp; Hayashi, 2009; Furlan *et al*., 2020 e Zuquette *et al*., 2020)

Vale salientar que cada AU possui uma dinâmica hidrológica específica, marcada por diferentes períodos e frequências de inundação, além de variações no nível da água. Assim, o balanço hídrico não é idêntico entre as áreas úmidas, pois fatores como regime de precipitação, temperatura, características físicas e atributos bióticos, que podem variar entre localidades, modulam um balanço hídrico particular para cada ambiente (Joyce, 2025).

Essas áreas possuem vegetação de pequeno porte como gramíneas e pequenos arbustos, adaptados a solos com nível freático elevado (Leite, 2021). Em relação à fauna, essas áreas podem ser habitats de aves conforme registrado num estudo em uma AU próxima às estudadas (Motta-Junior *et al*., 2008), além de serem atrativos para mamíferos de médio e grande porte

(Hülle, 2006). Vale ressaltar, que ainda são escassos estudos sobre aspectos faunísticos e florísticos das AUs estudadas (Ruy, 2025).

Essas áreas úmidas estão situadas no compartimento geomorfológico-geológico da Depressão Periférica Paulista, na zona do Médio Tietê (Almeida, 1964). Distribuem-se principalmente em interflúvios em altitudes entre 500 e 750 m, caracterizados por colinas de topo aplainado e encostas suavemente convexas, delimitadas por rupturas acentuadas de declive (Penteado, 1976).

Sobre a distribuição dos solos, nas áreas bem drenadas predominam Latossolos e Argissolos com argila de baixa atividade e ricos em óxidos de ferro. Já nas zonas úmidas e várzeas, ocorrem majoritariamente Gleissolos, solos hidromórficos periodicamente ou permanentemente saturados, cuja coloração acinzentada resulta da redução do ferro causada pela saturação dos poros com água e pela proximidade do lençol freático (Lepsch, 2002). Devido às condições de encharcamento, esses solos apresentam baixa disponibilidade de oxigênio, o que reduz a decomposição da matéria orgânica e os torna importantes sumidouros de carbono, uma característica estratégica para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (Coletti *et al*., 2013).

2.2 Avaliação de Vulnerabilidade de Áreas Úmidas

A questão da vulnerabilidade das AUs é um ponto prioritário para a Convenção de Ramsar, que divulgou um relatório que abrange definições e orientações essenciais para esse tipo avaliação (Gitay *et al*., 2011). Como esse tratado é a maior referência para estudos e preservação de zonas úmidas, optou-se por aderir aos direcionamentos desse documento, que estão alinhados as referências mais consolidadas no que diz respeito aos estudos de vulnerabilidade.

Alguns aspectos que permeiam esse tipo de avaliação apresentados no documento são importantes para facilitar a compreensão da vulnerabilidade e da análise realizada nesta pesquisa. Uma terminologia fundamental é o conceito de perigo, que se refere às manifestações físicas capazes de ameaçar as áreas úmidas, como por exemplo os eventos de seca.

Outro aspecto inerente a esses estudos é o risco, entendido como a probabilidade e a magnitude dos efeitos de um perigo sobre o sistema, como a perda de zonas úmidas em decorrência de períodos de estiagem.

A partir desses dois elementos-chave, a compreensão da vulnerabilidade é facilitada, sendo esta compreendida como a relação entre a exposição a um perigo, os impactos gerados sobre a área úmida e a sua capacidade de responder, adaptar-se ou minimizar esses efeitos. A

resposta da AU dependerá das características de suscetibilidade, que se trata das condições naturais do meio, como relevo e solo que condicionam a área a um maior risco a eventos diversos, como por exemplo processos de erosão ou transporte de sedimentos para dentro desses compartimentos.

Não é raro que se interprete risco como sinônimo de vulnerabilidade. Desse modo, é valido salientar os aspectos que os diferenciam para evitar equívocos no entendimento de avaliações de vulnerabilidade e estudos paralelos. O risco se refere à probabilidade de ocorrência de impactos associados a um perigo, enquanto a vulnerabilidade está relacionada à sensibilidade do sistema e à sua capacidade de enfrentamento frente a esses eventos (PNUD, 2007).

A partir desses conceitos entende-se a avaliação de vulnerabilidade como a abordagem que fornece informações e orientações para a preservação das áreas úmidas sujeitas a perigos adversos, de acordo com informações das condições físicas e ambientais desses ecossistemas e possíveis ameaças.

No relatório são elencadas as etapas para Avaliação de Vulnerabilidade. A primeira seria descrever a condição das AUs e as pressões recentes sobre elas. Posteriormente, deve-se determinar a sensibilidade e a capacidade de adaptação das zonas úmidas frente a essas múltiplas pressões. Em seguida, deve-se elencar os possíveis danos para esses ecossistemas e quais seriam as ações de mitigação. Por fim, é preciso definir as etapas necessárias para conseguir preservar essas áreas.

Esta pesquisa se propõe a realizar a primeira etapa supracitada, isto é a identificação preliminar do estado de conservação e das ameaças às áreas úmidas com o uso de dados espacializados, sem uma escala de detalhe tão refinada, justificada pelas limitações dos dados disponíveis, mas que pode servir de base para coleta de informações mais específicas posteriormente, por meio de atividades de monitoramento.

2.2.1 Fatores de ameaça para as áreas úmidas

Globalmente, o fator que mais contribui para a perda de áreas úmidas é a conversão de áreas para a agricultura (Ballut-Dajud *et al*., 2022; Ma *et al*., 2024). Esse tipo de ocupação pode influenciar a entrada de água para as AUs pois dificulta a interceptação da água da chuva, elevando o escoamento superficial e a evaporação, dificultando assim a infiltração e a recarga dos aquíferos (Tricart, 1977; Failache; Zuquette, 2018). Áreas agrícolas também estão diretamente relacionadas ao perigo de escoamento de poluentes e sedimentos para os ambientes

úmidos, afetando sua qualidade ambiental e seus serviços ecossistêmicos (Ross, 1994; Yang *et al*., 2021).

Diagnósticos vêm apontando em locais próximos a região deste estudo para a degradação de áreas úmidas por conta de áreas agrícolas, sobretudo onde houve a substituição de atividades florestais para cana-de-açúcar (Zuquette *et al*., 2020). Além disso, áreas úmidas pequenas e ripárias localizadas no Cerrado, estão sofrendo com o esgotamento dos recursos hídricos e a poluição difusa gerada pelo uso intensivo de agroquímicos (Junk *et al*., 2024; Rosolen *et al*., 2015).

Outro perigo predominante para as AUs são as mudanças climáticas, que geram alterações no padrão de precipitação e temperatura (Ballut-Dajud *et al*., 2022). Segundo a revisão realizada por Salimi *et al*. (2021), alterações nesses aspectos podem reduzir a disponibilidade de água superficial e intensificar processos como evapotranspiração e decomposição, comprometendo a dinâmica bioquímica dessas áreas e a provisão de serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono e a regulação hídrica.

Vale salientar que as AUGIs são particularmente vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas devido ao papel significativo que a precipitação e o escoamento superficial desempenham na formação de sua hidrologia (Hayashi et al., 2016; Zuquette et al., 2020).

Um estudo realizado em zonas úmidas depressionadas da Ecorregião das Dunas de Areia do Pleistoceno, em Oklahoma (EUA), desenvolveu um modelo hidrológico regional para prever o status de inundação desses ambientes e concluiu que a precipitação total e a temperatura média são os preditores mais relevantes para a inundação, enquanto o uso do solo apresenta um impacto relativamente menor, indicando que os fatores climáticos dominam a dinâmica hidrológica (Londe *et al*., 2022).

No Nordeste da China, foi identificado os principais fatores que modificaram as AUGIs locais de 1978 a 2015. Como resposta, nos 30 anos iniciais (1978-2008) atividades antropogênicas (conversão agrícola, a urbanização, a atividade industrial e projetos de infraestrutura) foram os principais propulsores para a perda das zonas úmidas, enquanto que no período mais recente (pós-2008) as mudanças climáticas têm desempenhado um papel mais significativo, o que inclui aumento de temperatura, redução de precipitação, períodos de déficit hídrico mais frequentes e alteração de padrões sazonais de chuva (Ma *et al*., 2024).

Em nível global, uma análise sobre o status de ameaça dos Sítios Ramsar[2] indicou que especificamente para a América do Sul a agricultura e mudanças na precipitação são os fatores mais degradantes para essas AUs, com destaque para o Pantanal que vem sendo degradado pelo uso antrópico da área, que gera impactos somáticos, como o a poluição da água e a invasão de espécies exóticas e somado a isso tem enfrentado mudanças no pulso de inundação, com secas mais severas do que no passado (Xu *et al*., 2019; Lázaro *et al*., 2020).

De forma complementar, outro estudo avaliou a vulnerabilidade áreas úmidas Ramsar de todo o globo, indicando que para a América do Sul, nas bacias hidrográficas das zonas úmidas, a conversão de uso da terra impactou diretamente o escoamento, a precipitação terrestre e a disponibilidade de água superficial (Fahrländer *et al*., 2024). O estudo explica que para esse recorte espacial, a umidade desses sítios depende sobretudo de florestas como a Amazônia para ter manutenção, e como essas áreas estão passando por elevados níveis de desmatamento para uso antrópico, há um comprometimento da disponibilidade de umidade.

Assim, as áreas úmidas de maneira geral estão sendo alvo de degradação sobretudo pela ocupação agrícola associada mais recentemente às mudanças climáticas, sendo estes fatores os agentes principais utilizados para o diagnóstico inicial da vulnerabilidade das AUGIs estudadas.

2.3 Abordagens de identificação da vulnerabilidade de áreas úmidas

Diversas ferramentas e projetos utilizando SIG e Sensoriamento Remoto têm viabilizado análises de vulnerabilidade ambiental. Para avaliar os impactos da conversão de uso da terra para ecossistemas diversos a nível nacional, o MapBiomas tem-se mostrado uma importante fonte de dados. Trata-se de uma rede global de monitoramento das transformações de uso da terra e seus impactos, realizada por meio do uso de imagens de satélite Landsat, aprendizagem de máquina e computação em nuvem (Souza Jr. *et al*., 2020). Para os sítios Ramsar brasileiros, os dados de cobertura hídrica do MapBiomas foram utilizados para entender seca climática de 1998 a 2022 (Moreira *et al*., 2025). Um estudo em Lima (Chile), utilizou os dados de usa da terra do MapBiomas de 1985 a 2021 para investigar como se deu o aumento de fragmentação e perda de áreas úmidas urbanas (Torres Mallma; Torres Mallma, 2024).

Estudos associaram a análise da ocupação do uso da terra com o NDVI – Indice de Vegetação Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*). Isso porque, essa métrica

[2] Os Sítios Ramsar, estabelecidos em 2005 pela Convenção de Ramsar, são Áreas Úmidas de Importância Internacional, que têm papel essencial na manutenção da biodiversidade e da vida humana. Os países assumem o compromisso de manter as características ecológicas dessas zonas úmidas. O Brasil possui 27 sítios Ramsar, incluindo o Parque Estadual do Rio Doce e a Reserva Particular do Patrimônio Natural SESC Pantanal (Convention on Wetlands Secretariat, 2026)

indica o estado de vigor da vegetação, podendo contribuir para mensurar a degradação da terra e o desmatamento (Fagun *et al*., 2025), e pode se correlacionar com fatores climáticos, uma vez que a precipitação e a temperatura influenciam na saúde e no desenvolvimento da flora (Persico *et al*., 2024). Esses aspectos, influenciam significativamente a vulnerabilidade das áreas úmidas (Castelle *et al*., 1994; Salimi *et al*., 2021)

No que se refere aos perigos climáticos associados à variabilidade hidroclimática, para a precipitação acumulada, estudos têm utilizado em análises de AUs o *Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS; Dodangeh *et al*., 2025; Masige *et al*., 2025). São dados espacializados de precipitação que estão disponíveis num banco (50°S–50°N), com resolução espacial razoável (0,05°) e disponibilidade de dados diária e mensal. Esses dados são produzidos a partir da combinação do modelo climático de longo prazo CHPclim, que utiliza dados fisiográficos (elevação, latitude e longitude), com estimativas provenientes de cinco sensores de satélite, baseados em micro-ondas, infravermelho e temperatura da superfície terrestre. A esses dados, são integradas observações *in situ*, provenientes de estações meteorológicas locais fornecidas pelos países participantes, sendo o Brasil um dos que mais colaboram com o compartilhamento dessas informações (Funk *et al*., 2015).

Diversas análises em território brasileiro demonstraram a confiabilidade do CHIRPS. No Nordeste, os dados mostraram alta correlação com as estações locais (r = 0,94) (Paredes-Trejo *et al*., 2017). Nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, resultados semelhantes foram obtidos, com r = 0,86 e índice de concordância próximo de 1 (Oliveira-Júnior *et al*., 2021). Costa *et al*. (2021) também realizaram uma análise comparando os dados CHIRPS com informações provenientes de estações do INMET/CPTEC, no período de 1998 a 2010, constatando elevada correlação (r = 0,95), sendo que a região Sudeste apresentou o maior coeficiente de correlação (r = 0,98). Esses resultados reforçam a robustez e a aplicabilidade dos dados CHIRPS para estudos climáticos no Brasil.

Para a temperatura média mensal, os dados ERA5-Land têm sido utilizados em estudos de vulnerabilidade de áreas úmidas (Fahrländer *et al*., 2024). Os dados provêm da reanálise ERA-5, produzida pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF), construída a partir do modelo atmosférico *Integrated Forecasting System* (IFS) na versão *Cycle* 41r2, com a incorporação de dados observacionais, considerando as variações de tempo e espaço, além de um componente conjunto que permite estimar as incertezas associadas aos dados. O ERA5-Land é uma reanálise aprimorada, sobretudo pela melhoria na resolução espacial, que passou de 31 km para 9 km na nova atualização (Muñoz-Sabater *et al*., 2021).

No Brasil, essas informações vêm sendo utilizadas e validadas em estudos como o realizado em Pernambuco, que comparou os dados de temperatura média do ar da reanálise com os das estações meteorológicas do estado e obteve uma precisão média superior a 90% na maioria da área analisada (Araújo *et al*., 2022). Na Bahia, uma validação semelhante foi realizada com sete municípios e obteve-se um r = 0,90 para temperatura máxima e um r = 0,88 para temperatura mínima, mostrando a acurácia dos dados da ERA5-Land (Matsunaga *et al*., 2024).

Ainda sobre as questões climáticas, alguns indicadores meteorológicos têm sido utilizados para avaliar as mudanças climáticas, como o SPEI (Índice padronizado de precipitação e evaporação - *Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*), que é um índice de seca multiescalar obtido por dados de precipitação acumulada, temperatura média e latitude que indica a condição de umidade do espaço analisado (Vicente-Serrano *et al*., 2010)

Ma *et al*. (2024) utilizaram o SPEI para quantificar o impacto da seca em AUGIs no nordeste chinês, por um período de 36 anos. Fez uso do SPEI-12, isto é, o índice de evapotranspiração padronizado para uma janela de 12 meses, que serve para identificar seca hidrológica (Tirivarombo *et al*., 2018).

Outros estudos, para investigar os riscos gerados pelas mudanças climáticas vêm identificando a substituição de áreas alagadas por outros usos. Um dos índices utilizados para isso, sobretudo para pequenas áreas úmidas é o MNDWI (Índice de Diferença Normalizada da Água Modificado - *Modified Normalized Difference Water Index*), proposto por Xu (2006), que se diferencia do NDWI convencional, um índice mais recorrente em análises desse tipo, por empregar a banda do infravermelho de ondas curtas (SWIR). Nessa faixa espectral, a reflectância dos corpos d'água é significativamente menor em comparação à banda do infravermelho próximo (NIR), utilizada no NDWI, o que realça as superfícies com presença de água. Além disso, essa modificação reduz o ruído gerado por áreas urbanizadas, vegetação e solo, que tendem a se misturar no NDWI, superestimando seus valores. Essas características favorecem a ampliação da capacidade de identificação das áreas alagadas (Debanshi *et al*., 2020; Melnychenko; Solovey, 2024).

Através dos exemplos trazidos, fica claro que o uso de índices espectrais obtidos a partir de imagens de satélite, somado a dados climatológicos estimados que são consistentes na literatura, é possível fazer a caracterização de ambientes como as AUGIs, apontando os principais fatores de perigo e risco para esses ambientes.

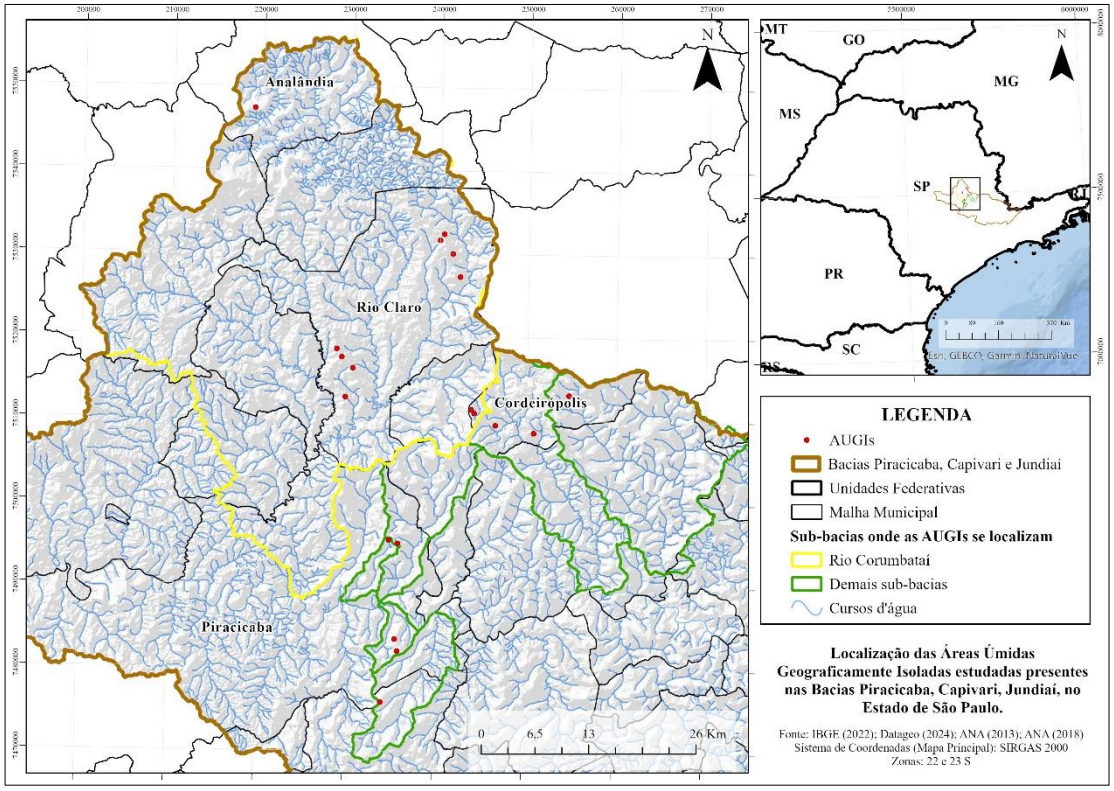
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo será apresentada a localização das áreas úmidas estudadas, assim como as formas de geração de unidade de análise, como serão obtidos os dados relativos à suscetibilidade, ameaças e risco às AUGIs, além das análises estatísticas utilizadas para ajudar a responder à questão central da pesquisa.

3.1 Área de estudo

A localização das áreas úmidas inventariadas pelo grupo de pesquisa e que serão estudadas neste trabalho é mostrada na Figura 2. Como se pode verificar, elas localizam-se nas Bacias PCJ, concentradas na sub-bacia do Rio Corumbataí e estão nos municípios de Analândia, Cordeirópolis, Piracicaba e Rio Claro, com predominância neste último (Tabela 1; Figura 2).

Figura 3 - Localização das áreas úmidas estudadas



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Tabela 1 - Localização das AUGIs estudadas

AUGI	Coordenadas Geográficas (23 K) - Centro AU		Município
	X	Y	
1	240030	7531654	Rio Claro
2	240443	7532353	Rio Claro
3	241448	7530025	Rio Claro
4	242297	7547232	Rio Claro
5	242297	7547324	Analândia
6	218985	7518433	Rio Claro
7	228595	7517459	Rio Claro
8	229170	7516140	Rio Claro
9	230447	7512666	Rio Claro
10	229640	7511251	Cordeirópolis
11	243773	7510862	Cordeirópolis
12	244091	7509420	Cordeirópolis
13	246484	7508513	Cordeirópolis
14	250806	7513112	Cordeirópolis
15	234790	7495466	Piracicaba
16	235782	7495088	Piracicaba
17	235618	7483559	Piracicaba
18	235939	7482132	Piracicaba
19	234129	7475940	Piracicaba

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

O clima local, segundo a classificação de Köppen (1948), é do tipo Cwa, subtropical úmido, com estação seca no inverno e verão chuvoso. O verão é marcado por temperaturas maiores, com média mensal de 24.9 ºC e precipitação mais volumosa, com média mensal acumulada de 212.5 mm, enquanto o inverno é caracterizado por temperaturas mais amenas, com média de 20.1ºC de e menor pluviosidade, com uma média de 42.25 mm por mês nesse período. A temperatura média e a precipitação acumulada anual são respectivamente de 22,56 ºC e 1.433 mm (Peel et al., 2007; CEPAGRI, 2024).

3.2 Geração das unidades de análise geográfica: as bacias de contribuição

Para definição da unidade de análise geográfica, foi pensado qual seria o limite utilizado para estudar a vulnerabilidade das AUs, com base nos compartimentos que formam esse ecossistema (Figura 1).

Para análises hidrológicas, é essencial considerar a bacia de contribuição como recorte para estudo, pois a existência da AU depende diretamente dos fluxos que ocorrem nesse limite (Hayashi *et al*., 2016), por isso ela foi adotada como unidade de análise.

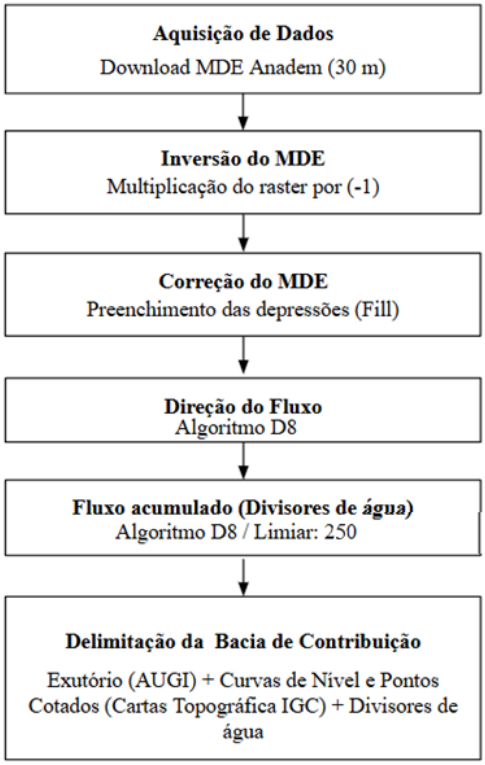
Antes de gerar as áreas de contribuição, a partir das coordenadas das AUGIs inventariadas anteriormente pelo grupo de pesquisa, foi feita a delimitação delas, utilizando as Cartas Topográficas do IGC (Instituto Geográfico e Cartográfico de São Paulo) com escala 1:10.000 e as imagens do Google Satélite atuais como base.

Para delimitar as bacias de contribuição, primeiramente, foi gerado o divisor de águas por meio do ARCGIS Pro. Para isso, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) ANADEM, que possui correção do viés causado pela vegetação (Laipelt *et al.,* 2024).

O processamento dessa etapa consistiu em inverter o MDE, por meio da multiplicação do raster original por -1. Em seguida, aplicou-se a ferramenta *Fill*, que preenche depressões artificiais, ajustando os valores de elevação para tornar o modelo hidrologicamente consistente (Saunders; Maidment, 1996; ESRI, 2024). Então foi determinada a direção do fluxo por meio do algoritmo D8 (Single Flow Direction), o qual atribui a cada célula uma única direção de fluxo, correspondente à vizinha de menor elevação (Moraes *et al*., 2014). Respectivamente, com base na direção de fluxo, foi gerado o fluxo acumulado utilizando o mesmo algoritmo, representando originalmente (com MDE real) o volume relativo de água que converge em cada célula (Moreira, 2022; Silva; Silva, 2008). Para a definição dos divisores de água adotou-se um limiar mínimo de fluxo acumulado de 250, que apresentou melhor aderência à rede de drenagem oficial das Bacias PCJ (ANA, 2013) e aos dados topográficos apresentados nas Cartas do IGC.

Após essa etapa considerando os pontos cotados e a geometria das curvas de nível apresentadas na carta topográfica, os divisores de água gerados pelo MDE invertido e as AUGIs como o exultório foi possível delimitar as bacias, que foram suavizadas na etapa final.

Figura 4 - Fluxograma metodológico para a geração das bacias de contribuição



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A apresentação das bacias foi realizada por meio de um painel e em seguida foi elaborado o perfil longitudinal de 2 AUGIs escolhidas aleatoriamente, utilizando como modelo de elevação base o ANADEM, indicando a compatibilização da topográfica das áreas úmidas estudadas em relação ao Modelo Conceitual.

3.2.1 Morfometria

Após a delimitação das bacias, foram extraídos os dados de perímetro e área de cada uma delas. Essas informações foram utilizadas para realizar a caracterização morfométrica das áreas de contribuição, para entender seu potencial para inundação, com base em dois fatores: índice de circularidade (Ic) e coeficiente de compacidade (Kc), conforme Alves *et al*. (2020) e Cavalcante *et al*. (2021). O Quadro 1 descreva cada índice e sua respectiva fórmula, onde A é a área em km² e P é o perímetro da bacia em km.

Quadro 1 - Índices morfométricos utilizados para analisar as bacias de contribuição

Índice	Definição	Equação	Classificação
Índice de Circularidade (Ic)	Indica a tendência da bacia ser circular consequentemente mais propensa a enchentes, correspondendo a valores próximos de 1	$Ic=12,57.A / P^2$	-
Coeficiente de compacidade (Kc)	Indica o grau de compacidade da bacia, expresso pela relação entre seu perímetro e o perímetro de um círculo de mesma área. Valores próximos de 1 indicam bacias mais circulares e compactas, com maior tendência à concentração rápida do escoamento superficial. Valores mais elevados indicam bacias menos compactas, geralmente mais alongadas ou irregulares	$Kc= 0,282. P / \sqrt{A}$	1,00 – 1,25- Alta propensão a grandes enchentes 1,25 – 1,50- Mediana a grandes enchentes >1,50- Não sujeita a grandes enchentes

Fonte: Adaptado de Alves *et al*. (2020) e Cavalcante *et al*. (2021)

A área e o perímetro das bacias foram calculados com o uso da calculadora de campo no ARCGis Pro. Esses dados foram salvos em uma planilha de Excel, onde foram elaborados os cálculos dos índices morfométricos e a classificação do índice Kc. Vale ressaltar que existem outros índices utilizados em análises morfométricas, porém dependentes de informações não disponíveis ou de procedimentos que podem introduzir subjetividade. É o caso do comprimento do eixo longitudinal da bacia (L), definido como a distância entre a foz e o ponto mais distante a montante ao longo da rede de drenagem. A determinação desse parâmetro requer a existência de uma rede de drenagem bem delimitada, o que não estava disponível com a precisão necessária neste estudo, podendo levar a estimativas arbitrárias.

3.3 Características de suscetibilidade

Para identificar qual a condição de conservação ambiental dos padrões de ocupação hídrica e vegetacional das AUGIs atualmente, *a priori* foi importante fazer um diagnóstico geral de atributos topográficos e físico-hídricos e de ocupação da terra, uma vez que esses aspectos influenciam diretamente no padrão de escoamento superficial e na capacidade de resposta das

áreas úmidas frente aos perigos que possam surgir, como mudanças no regime climático (Fernandes *et al*., 2013). Desse modo, serão apresentados os aspectos de relevo, solo e uso e ocupação da terra que cobrem essas áreas.

3.3.1 Declividade

A declividade influencia diretamente a dinâmica do escoamento superficial, a produção e a convergência de água, bem como o transporte e a deposição de sedimentos e poluentes. Encostas mais íngremes tendem a apresentar maior escoamento superficial e menor capacidade de infiltração, enquanto terrenos com declividade mais suave favorecem maior infiltração e redução do escoamento (Abu-Bakr, 2020).

O cálculo da declividade foi realizado a partir do Modelo de Elevação ANADEM, utilizando a ferramenta *Slope*, configurada para apresentar os valores em porcentagem. Para garantir maior precisão na representação das bordas, utilizou-se um *buffer* de 30 metros em relação ao limite das bacias, visto que restrições na extensão dos dados poderiam gerar perdas de informações nas áreas limítrofes.

A classificação da declividade seguiu os critérios estabelecidos pela Embrapa (1979; Quadro 2), sendo aplicada uma simbologia específica. Para quantificar a área ocupada por cada classe, foi realizada uma reclassificação dos valores de declividade por meio da ferramenta *Reclassify*, categorizando os intervalos percentuais de acordo com os seguintes critérios: de 0 a 3% (classe 1), de 3 a 8% (classe 2) e assim sucessivamente.

Quadro 2 - Classes de relevo de acordo com a declividade (%)

Classes de relevo	Declividade (%)	Simbologia (cor)
Plano	0 a 3	#34A900
Suave ondulado	> 3 a 8	#79CB05
Ondulado	> 8 a 20	#CDED03
Forte ondulado	> 20 a 45	#FDCD01
Montanhoso	> 45 a 75	#FF6600
Escarpado	> 75	#F80204

Fonte: Elaborado pela autora com base em Embrapa (2026)

Após a reclassificação, foi feito o cálculo da área de cada classe com o uso da ferramenta r.report no software QGIS.

3.3.2 Solos

Nas análises de vulnerabilidade ambiental, as propriedades do solo são amplamente utilizadas para indicar o potencial de erodibilidade dos solos. Isso ocorre porque propriedades

como granulometria, estrutura, agregação, capacidade de infiltração e retenção de água, permeabilidade, teor de matéria orgânica, profundidade e espessura dos horizontes, além de atributos químicos, biológicos e mineralógicos, influenciam diretamente na resistência dos solos aos processos erosivos (Fushimi, 2016; Santoro, 2015). A textura, por exemplo, tem papel determinante: solos argilosos são geralmente mais resistentes à desagregação, enquanto solos de textura arenosa são mais suscetíveis ao transporte de sedimentos (Vitte; Mello, 2008).

Nesse sentido, a análise dos solos busca compreender se os tipos presentes nas bacias de contribuição condicionam maior ou menor suscetibilidade à erosão e, consequentemente, ao transporte de sedimentos para dentro das áreas úmidas.

Para essa etapa, foi utilizado o mapa pedológico do Estado de São Paulo, elaborado por Rossi (2017), que é uma atualização do levantamento realizado por Oliveira *et al*. (1999), incorporando delineamentos de levantamentos em escala 1:100.000 e outros de maior detalhamento.

3.4 Diagnóstico de perigo e riscos

Por meio da série histórica de dados espacializados dos últimos 39 anos (1985-2024) foi realizada a identificação de mudanças no regime climático e no uso da terra, além das respostas de vigor da vegetação e ocupação superficial de água, identificando sinais perigos e degradação nas bacias das AUGIs. Para isso foram utilizados os fatores: cobertura da terra, NDVI, MNDWI e SPEI, que serão detalhados a seguir.

3.4.1 Variáveis resposta

Dois índices espectrais derivados de imagens de satélite foram utilizados para verificar o estado da cobertura hídrica e da vegetação nas bacias de contribuição e especificamente no limite das AUGIs ao longo da série estudada.

Para a identificação de superfícies com a presença de água, empregou-se o MNDWI. Valores positivos obtidos por esse índice indicam a presença de corpos d'água água. O índice foi obtido através da Equação 1:

$$\frac{(\rho\ GREEN - \rho\ SWIR)}{(\rho\ GREEN + \rho\ SWIR)} (1)$$

Já para verificar o vigor e a densidade da vegetação, o NDVI. Valores próximos de 1 indicam a presença de vegetação. Esse índice é obtido conforme a Equação 2:

$$\frac{(\rho\ NIR - \rho\ RED)}{(\rho\ NIR + \rho\ RED)} \quad (2)$$

Para calcular os índices utilizou-se a série Landsat, considerando o período mais chuvoso (de novembro a março), com objetivo de obter dados mais robustos, sobretudo das AUGIs sazonais, que frequentemente apresentam ausência de lâmina d'água no período de estiagem. Para garantir a cobertura temporal dentro do mesmo intervalo espectral ao longo das décadas, utilizou-se uma composição de diferentes sensores da série Landsat (Quadro 3).

Quadro 3 - Sensores Landsat utilizados para geração dos índices espectrais (1985-2024)

Período	Sensores
1985–1998	Landsat 5 (*Thematic Mapper - TM*)
1999–2012	Landsat 7 (*Enhanced Thematic Mapper Plus - ETM+*)
2013–2021	Landsat 8 (*Operational Land Imager - OLI*)
2022–2024	Integração dos sensores Landsat 8 e Landsat 9

Fonte: Organizado pela autora (2026)

A obtenção e o processamento das imagens orbitais foram realizados na plataforma Google Earth Engine, utilizando catálogos de dados de refletância de superfície (*Surface Reflectance - Tier 1*).

As imagens foram submetidas a um protocolo de pré-processamento automatizado via GEE. Foi aplicado um filtro de nuvens com um limiar de tolerância de até 75% de cobertura de nuvens por cena. Também foi feita a correção de escala, com a aplicação dos fatores de escala multiespectral (0.0000275) e deslocamento (-0.2) para conversão dos valores digitais em refletância real. Para a composição temporal das imagens, utilizou-se o redutor estatístico da mediana (*median*) para cada ciclo chuvoso, por apresentar menor sensibilidade a valores discrepantes (*outliers*) e a ruídos atmosféricos remanescentes, quando comparado à média.

3.4.2 Ameaça

3.4.2.1 Uso antrópico

Entendendo como uma das ameaças o uso antrópico da terra foi utilizado mapeamento anual do MapBiomas, Coleção 10. O download dos dados foi feito no *Google Earth Engine*

(GEE), por meio do *Toolkit*[3] disponibilizado pela equipe do MapBiomas, utilizando como limite para recorte dos mapeamentos as bacias de contribuição. Em seguida, foi feita a reclassificação no ambiente R, considerando como uso antrópico as classes mineração, todas ocupações agrícolas (como mosaico de usos, soja, cana e citrus), além de áreas urbanas.

3.4.2.2 Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI)

Para entender a dinâmica climática, foi utilizado o SPEI, com o cálculo do valor anual (12 meses) para identificar uma possível seca hidrológica. Para obter esse índice, foi utilizado o pacote desenvolvido no software RStudio por Beguería et al. (2023), com o uso de dados de precipitação acumulada e temperatura média mensal.

O índice é obtido por meio de uma distribuição log-logística que estima a probabilidade de não haver diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial. Ele baseia-se no princípio do SPI (Standard Precipitation Index), contudo, incorpora o impacto da temperatura na demanda atmosférica por meio do balanço climático de água, o que o torna mais apropriado para analisar cenários de aquecimento global (Vicente-Serrano et al., 2010).

O cálculo do Potencial de Evapotranspiração (PET) mensal (mm) seguiu a Equação 3.

$$PET = 16 \cdot K \cdot (\frac{10 \cdot T}{I})^m \quad (3)$$

Onde T é a temperatura média mensal, I é o índice de calor anual (obtido pela soma dos 12 índices de calor mensais), m é um coeficiente cúbico dependente de I; e K é um fator de correção baseado no número de dias do mês e na latitude (horas de sol / fotoperíodo).

Com os valores de PET, calculou-se a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração para cada mês i, estabelecendo uma medida direta de excedente ou déficit hídrico (Equação 4).

$$D_i = P_i - PET_i \quad (4)$$

Os valores dessa diferença foram agregados na escala temporal de 12 meses (SPEI-12) para analisar anomalias de longo prazo. Para a escala de tempo k (onde k = 12), a acumulação seguiu a Equação 5.

$$D_n^k = \sum_{l=0}^{k-1} D_n - 1 \quad (5)$$

[3] Disponível em: https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit&scriptPath=users%2Fmapbiomas%2Fuser-toolkit%3Amapbiomas-user-toolkit-lulc.js

Por fim, a série temporal ajustada foi normalizada por meio de uma distribuição de probabilidade log-logística, permitindo que os valores finais do SPEI representassem desvios padrões em relação à média histórica da região.

Valores positivos desse índice indicam condições de umidade, já valores negativos caracterizam cenários de seca, sendo que quanto mais negativo, maior o nível de seca. Com base nos valores resultantes, pode-se obter 9 diferentes classes de seca (Tabela 2) (Dikici; Aksel, 2019). Foi feita essa classificação para todos os anos analisados, de modo a entender a dinâmica desse índice nas bacias de contribuição.

Tabela 2 - Classificação da seca de acordo com os valores do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI)

Valores de SPEI	Classificação
SPEI ≥ 2.0	Excessivamente úmido
1.5 ≤ SPEI < 1.99	Muito úmido
1.0 ≤ SPEI < 1.50	Moderadamente úmido
0.5 ≤ SPEI < 1.0	Próximo ao Normal
- 0.5 ≤ SPEI < 0.5	Normal
- 1.0 ≤ SPEI < -0.5	Perto da seca normal
- 1.5 ≤ SPEI < -1.0	Seca moderada
- 2.0 < SPEI < -1.5	Seca severa
SPEI ≤ - 2.0	Seca extrema

Fonte: Dikici; Aksel (2019)

Para os dados de precipitação acumulada mensal foi utilizado os dados do CHIRPs e para a temperatura média o ERA- 5 Land, ambos obtidos por meio de scripts do Google Earth Engine, delimitados às bacias de contribuição.

3.4.2.3 Validação dos dados climatológicos

Para reforçar a confiabilidade dos dados meteorológicos utilizados neste estudo (CHIRPS e ERA-5 Land), foi realizada uma validação simplificada com base nas informações de precipitação acumulada e temperatura média mensal da Estação Meteorológica do CEPAGRI, abrangendo o período de janeiro de 2010 a dezembro de 2024. Para verificar a precisão das estimativas, com o uso do software R foram aplicados índices estatísticos de desempenho, amplamente utilizados em conjunto em validações de dados ambientais.

O Quadro 4 apresenta o nome de cada índice, sua respectiva fórmula, o objetivo de sua aplicação e os valores de referência que indicam a qualidade da estimativa (E_i) em relação aos dados observados(O_i), frente ao número de registros (N).

Quadro 4 - Índices estatísticos utilizados para a validação dos dados de precipitação e temperatura média, suas respectivas fórmulas, objetivos, valores padrão e referências

Índice estatístico	**Sigla**	**Fórmula**	**Objetivo**	**Valores de referência**	**Referência**
Erro quadrático médio	RMSE	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - E_i)^2}{N}}$	Expressa a magnitude de erro entre os valores estimados e os medidos.	Quanto mais próximo de zero, melhor o modelo.	Janssen; Heuberger (1995)
Índice de erro de viés médio	MBE	$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(E_i - O_i)$	Expressa o desvio médio dos valores estimados em relação aos valores observados, indicando que o modelo tende a superestimar ou subestimar	Quanto mais próximo de zero, menor a magnitude do erro sistemático do modelo	Willmott; Matsuura (2006)
Coeficiente de determinação	R^2	$1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(E_i - \underline{E})^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \underline{O})^2}$	Indica o grau de precisão do conjunto de dados	Varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste do modelo avaliado	Di Bucchianico (2008)
Coeficiente de correlação de Pearson	r	$\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \underline{O})(E_i - \underline{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i - \underline{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^{N}(E_i - \underline{E})^2}}$	Mede a força da relação linear entre	Variando de −1 a 1 com uma	Sedgwick (2012)

			estimativas e observações	pontuação perfeita de 1	
Índice de Concordância de Willmott	d	$1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(\lvert E_i - O_i \rvert)^2}{\sum_{i=1}^{N}(\lvert E_i - \underline{O} \rvert + \lvert O_i - \underline{O} \rvert)^2}$	Indica a precisão / concordância entre os dados observados e estimados	Varia entre 0 e 1, onde valor 1 indica concordância perfeita entre os dados	Willmott (1981)

Fonte: Organizado pela autora (2026)

3.4.3 Análises estatísticas

Foram utilizadas algumas análises estatísticas para entender 4 aspectos: as mudanças dos fatores de forma individual ao longo do tempo; a correlação entre os fatores analisados; verificar quais bacias / AUGIs são mais ameaçadas; qual o nível de influência dos fatores de suscetibilidade a processos de erosão e escoamento de poluentes. Cada tipo de análise será explicado a seguir. Todas foram desenvolvidas no software RStudio.

3.4.3.1 Análise de Tendência e Significância Estatística (Theil-Sen e Mann-Kendall)

Para verificar a dinâmica das variáveis utilizadas (Dados de Precipitação acumulada, Temperatura Média, SPEI e uso antrópico da terra), se eles vêm sofrendo redução ou aumento em seus valores de maneira significativa, foi utilizada a análise de tendência mediana de Theil-Sen (TS), juntamente ao teste de Mann-Kendall (MK).

A análise de Theil-Sen, é uma análise de tendência mediana, que por meio da inclinação da linha de um conjunto de dados indica a tendência de mudança (para aumento ou redução) de um aspecto. Por utilizar a mediana, reduz o impacto da anomalia de dados (Theil, 1950; Sen, 1968). Essa técnica geralmente é utilizada para entender as alterações de séries temporais aspectos ligados tanto à aspectos hidrometeorológicos e de índices espectrais em áreas úmidas (Jin *et al*., 2020; Lv *et al*., 2019). O estimador de tendência TS é obtido pela Equação 6, onde β é o estimador de inclinação, x_j e x_i são os valores observados nos tempos j e i.

$$\beta = mediana\ \frac{(x_j - x_i)}{(j - i)} \quad (6)$$

Já o teste de Mann-Kendall corresponde à significância estatística, indicando assim se a tendência de mudança indicada pela análise TS é real, ou seja, se o dado é consistente (Mann,

1945; Kendall; Gibbons, 1962). A base deste teste é a estatística S, que resulta da soma da diferença dos sinais entre os pares de valores da série. Um valor de S positivo indica que, ao longo do tempo, os valores subsequentes da métrica tendem a ser maiores que os anteriores, configurando uma tendência de elevação. Inversamente, um S negativo aponta para uma tendência de declínio. Além disso, é gerada a estatística Z, cuja magnitude e sinal indicam, respectivamente, a significância e o sentido da tendência (positiva ou negativa). Neste estudo, adotou-se um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), sendo consideradas estatisticamente significativas as tendências com $|Z| \geq 1,96$ (Lv *et al*., 2019; Jin *et al*., 2019). A probabilidade de significância (p-valor) foi utilizada para testar a hipótese nula de ausência de tendência ou correlação. Dessa forma, resultados com $p \leq 0,05$ foram considerados estatisticamente significativos, indicando evidências robustas de mudanças sistemáticas ou associações entre as variáveis.

3.4.3.2 Correlação entre as variáveis

Para entender o grau de associação entre os índices espectrais (NDVI e MNDWI) com o SPEI foi empregada a correlação de Spearman. Essa estatística foi escolhida por não exigir que as variáveis apresentem relação linear nem que as variáveis sejam medidas em escalas intervalares, sendo adequada para dados não-paramétricos. Além disso, a correlação de Spearman permite detectar a intensidade e o sentido de uma relação monotônica entre duas variáveis (Hauke; Kossowski, 2011). O resultado a correlação é o fator ρ que varia entre -1 e 1, onde valores mais próximos a esses extremos indicam relações mais fortes.

3.4.3.3 Identificação de AUGIs mais vulneráveis

Para avaliar quais AUGIs estão mais propensas à degradação, foram realizadas análises estatísticas gerais (Teste MK, Teste TS e Correlação de Spearman) em cada uma das 19 bacias de contribuição. Isso foi feito para identificar padrões espaciais distintos de resposta aos eventos climáticos. O pacote *purr* presente no RStudio foi utilizado para fazer os cálculos.

Os resultados foram consolidados em uma tabela resumo, permitindo a hierarquização das bacias conforme sua vulnerabilidade ambiental e a identificação de áreas de comportamento resiliente ou anômalo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos por meio de gráficos, mapas e tabelas, além de uma discussão acerca desses dados, com base nos objetivos da pesquisa.

4.1 Apresentação das bacias de contribuição e aspectos morfométricos

Com o cálculo da área, do perímetro e dos índices morfométricos, foi possível entender alguns aspectos hidrológicos relevantes das bacias. Primeiramente, observa-se que as áreas de contribuição não têm grande magnitude, com tamanho médio de 44,87 ha, sendo a maior 102,59 ha e a menor 10,23 ha (Tabela 3). Esses valores dialogam com as dimensões obtidas por Zuquette *et al*. (2020).

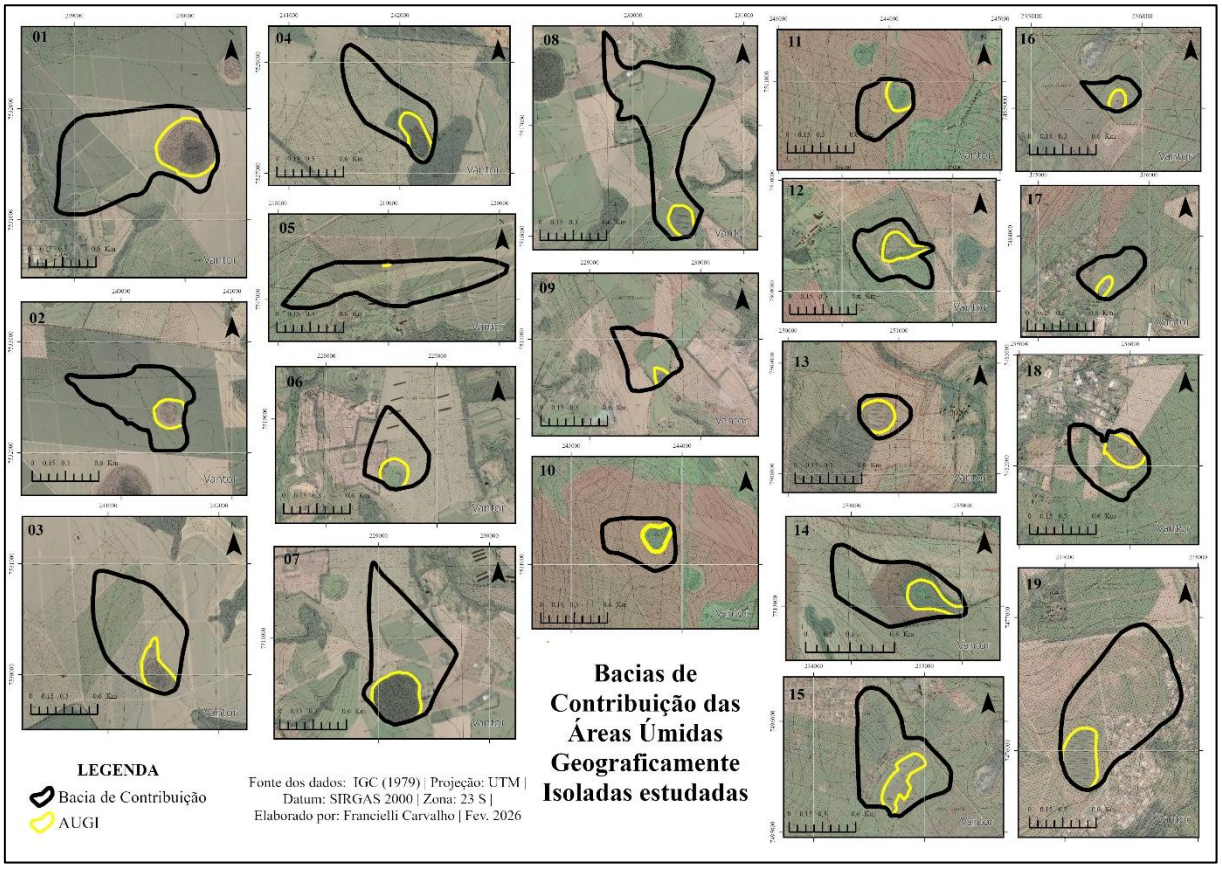
Além disso, foi possível observar pelo índice de circularidade, que boa parte das bacias apresentam valores próximos de 1, o que indica uma maior propensão a alagamento no seu ponto mais baixo, ou seja, as AUGIs. A delimitação (Figura 4) e os valores de Kc corroboram com isso, indicando que 16 bacias têm alta propensão a grandes alagamentos. A Bacia 13 apresenta o maior Índice de Circularidade (Ic = 0,94) e o menor Coeficiente de Compacidade (Kc = 1,03), que corresponde a uma resposta hidrológica rápida com picos de vazão elevados devido ao curto tempo de concentração. Em contrapartida, as bacias 5 e 8 possuem formatos mais alongados, característica que retarda a chegada da água ao exultório e reduz o potencial de cheias.

Tabela 3 - Aspectos morfométricos das bacias de contribuição

Bacia	Área (ha)	Perímetro (Km)	Índice de Circularidade (Ic)	Coeficiente de Compacidade (Kc)	Propensão a grandes enchentes
1	102.59	4.29	0.70	1.20	Alta
2	47.88	3.23	0.58	1.32	Mediana
3	65.74	3.11	0.85	1.08	Alta
4	42.95	2.91	0.64	1.25	Alta
5	58.90	4.37	0.39	1.61	Não sujeita
6	28.55	2.05	0.85	1.08	Alta
7	71.10	3.65	0.67	1.22	Alta
8	78.04	5.18	0.36	1.65	Não sujeita
9	22.77	1.93	0.77	1.14	Alta
10	24.39	1.91	0.84	1.09	Alta
11	20.78	1.70	0.90	1.05	Alta
12	28.60	2.32	0.67	1.22	Alta
13	13.95	1.37	0.94	1.03	Alta
14	55.29	3.16	0.70	1.20	Alta
15	61.57	3.32	0.70	1.19	Alta
16	10.23	1.33	0.73	1.17	Alta
17	17.51	1.64	0.82	1.11	Alta
18	33.08	2.26	0.82	1.11	Alta
19	68.53	3.28	0.80	1.12	Alta

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

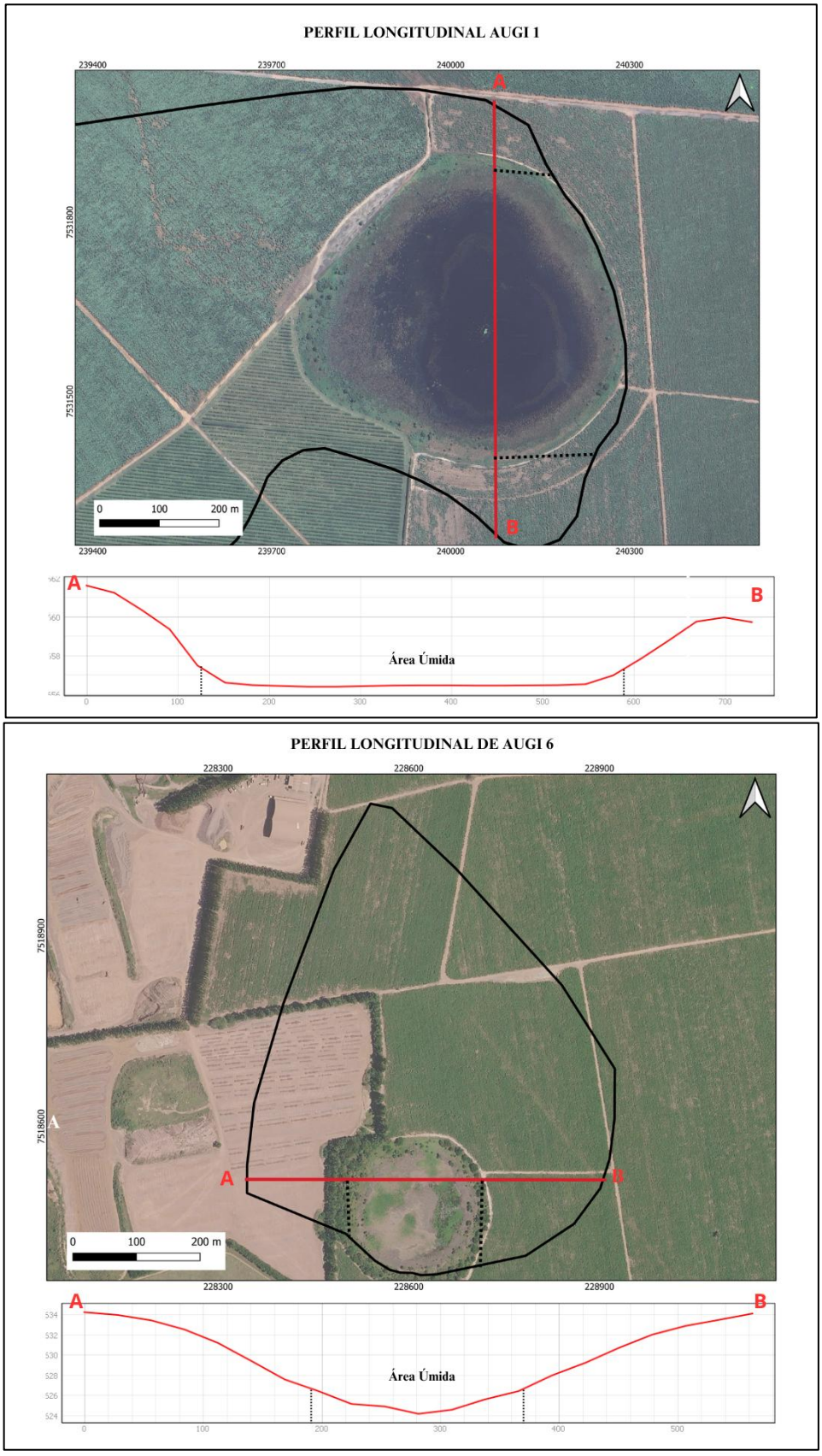
Figura 5 - AUGIs e suas respectivas Bacias de Contribuição



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Como pode-se observar pela Figura 5, os perfis longitudinais de duas AUGIs escolhidas de forma aleatória, indicam a setorização conforme o Modelo Conceitual, com a área úmida em uma área topograficamente rebaixada, tendo no seu entorno áreas elevadas que formam sua bacia de contribuição.

Figura 6 - Perfil Longitudinal da AUGIS 1 e 6



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

4.2 Suscetibilidade das bacias de contribuição

Nesse item será apresentado a condição de cada bacia de contribuição no que concerne os aspectos morfométricos, físicos (relevo e solo), fatores esses que podem influenciar na capacidade desses ecossistemas responderem a processos de erosão e transporte de poluentes.

4.2.1 Relevo

A partir dos procedimentos descritos na metodologia, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4 e Figura 6. Verifica-se que a maior parte da área das bacias de contribuição é composta por terrenos com superfícies planas (0 a 3% de declividade), correspondendo a 61,5% do total analisado. Essa característica geomorfológica é condizente com a literatura, uma vez que as AUGIs são tipicamente encontradas em áreas de baixo relevo (*low-relief*), situando-se, no caso desta região, em topos aplainados (Rosolen *et al*., 2025; McLaughlin *et al*., 2014). Essa configuração favorece a existência de bacias hidrologicamente fechadas, onde o escoamento superficial não é a dinâmica prevalente. Consequentemente, a ausência de conectividade superficial, imposta pelo relevo plano, potencializa o armazenamento de água superficial e a subsequente recarga de aquíferos rasos (McLaughlin *et al*., 2014).

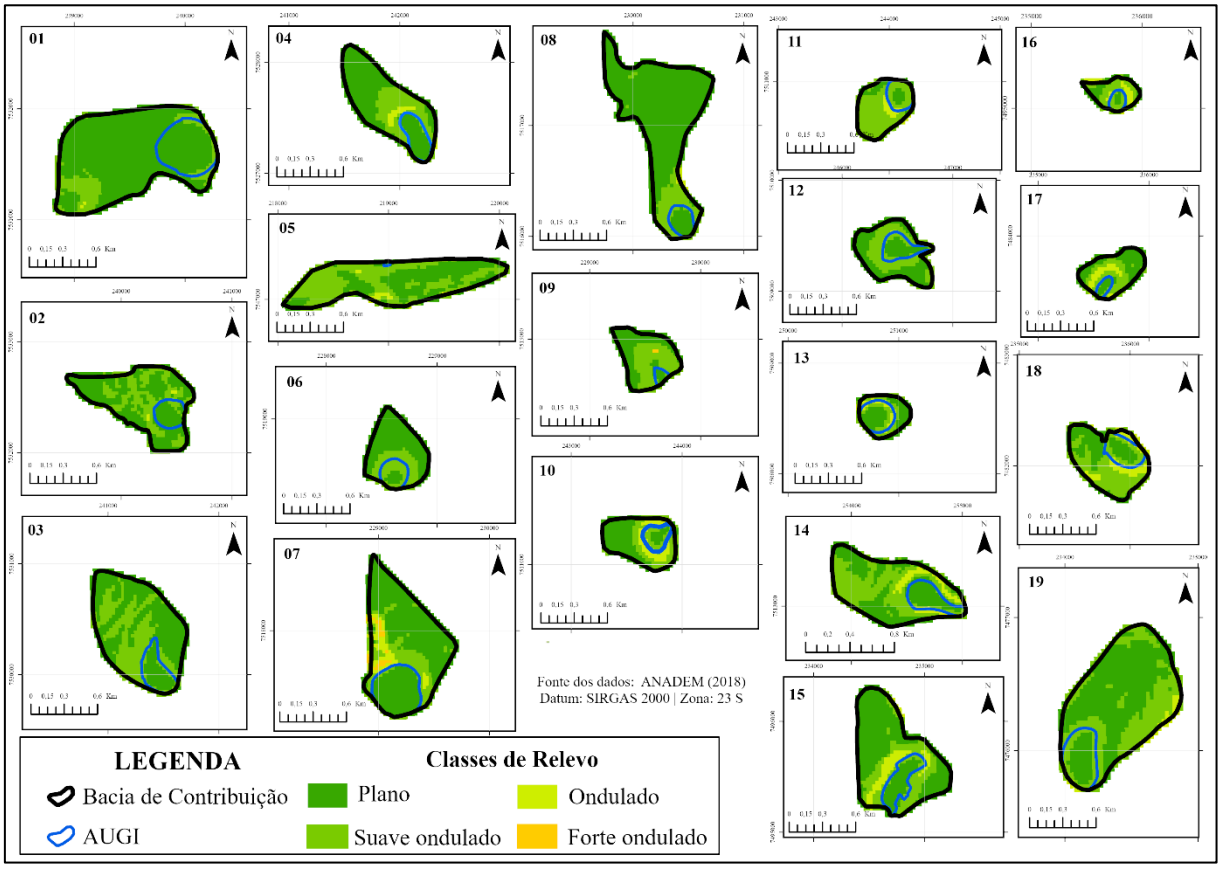
Vale salientar que a topografia aplainada reduz a efetividade dos processos erosivos e o transporte de sedimentos ou poluentes para esses ecossistemas (Abu-Bakr, 2020; Weill; Pires Neto, 2007).

Tabela 4 - Distribuição de área ocupada em porcentagem por cada classe de relevo total

Relevo	Área (ha)	% ocupada
Plano	524,56	61.5%
Suave ondulado	286,32	33.6%
Ondulado	39,86	4.7%
Forte Ondulado	1,71	0.2%

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Figura 7 - Declividade das Bacias de Contribuição



Fonte: Elaborado pela autora (2026) a partir de ANADEM (2018)

4.2.2 Solos

A partir do mapeamento de Rossi (2017), foi possível verificar que 3 das AUGIs analisadas são consideradas lagoas. Possivelmente essas áreas são AUGIs permanentes, ou seja, que não secam em algum período do ano, e que possuem umidade expressiva e por isso foram identificadas como lagoas. Além disso, outras 5 AUs têm gleissolo como solo prevalente. Isso faz sentido, uma vez que essa classe é característica de domínios de planícies aluviais e alveolares, áreas de depressões ou de relevo plano, sendo solos hidromorfizados pelo contato temporário ou permanente com águas fluviais (EMBRAPA, 2025). A presença desse tipo de solo reforça o potencial das AUGIs contribuírem para a recarga de aquíferos (Furlan *et al*., 2024). Além disso, esses solos são importantes sumidouros de carbono, uma vez que o ambiente de redução (pouco oxigênio) causado pelo lençol freático elevado, propicia a decomposição da matéria orgânica mais lenta, permitindo um alto acúmulo de carbono (Amendola *et al*., 2018; Fidalgo, 2007).

Nas bacias de maneira geral prevalecem os latossolos de textura média a argilosa, seguidos dos latossolos argilosos a muito argilosos. Esses dois tipos são típicos de regiões de relevo plano e suave ondulado, o que vai ao encontro da condição indicada no item 4.2.1. Essas

classes de solo são esperadas de acordo com a cobertura original da área, isto é, o Cerrado Aberto (Projeto Radambrasil, 1983; Reatto *et al*., 2008). São solos com boa porosidade o que os torna pouco sucestíveis a processos erosivos (Palmieri; Larach, 2009).

Vale salientar que em atividades de campo do grupo de pesquisa, em AUGIs com esse tipo de solo foram identificados visualmente processos de erosão superficial por escoamento de água, o que evidencia a necessidade de análises mais aprimoradas para identificar os fatores geradores desse impacto.

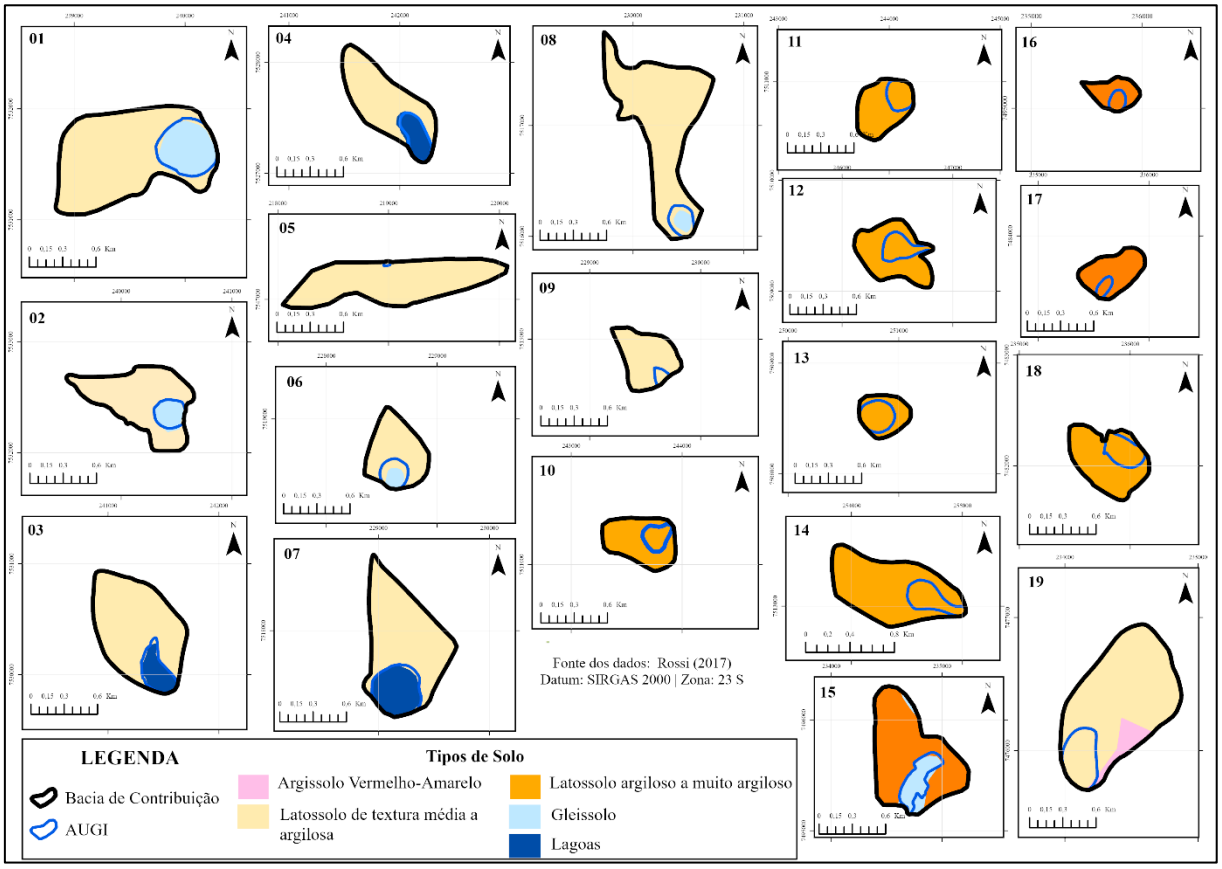
Por fim, percebe-se uma sutil presença de argissolos vermelho-amarelos, são solos caracterizados por textura fina arenosa no horizonte A e fino-areno argilosa no horizonte B, que por serem mais drenados e com mudança textural abrupta, tem um potencial para erodibilidade (Oliveira; Prado, 1984).

Tabela 5 - Ocupação em hectares e em percentual das classes de solo nas bacias de contribuição

Solo	Área (ha)	% ocupada
Latossolos de textura média a argilosa	518,52	60.8%
Latossolos argilosos a muito argiloso	253,55	29.7%
Gleissolos	42,35	5.0%
Lagoas	31,98	3.8%
Argissolo Vermelho-Amarelo	6,06	0.7%

Fonte: Organizado pela autora (2026)

Figura 8 - Solos presentes nas bacias de contribuição



Fonte: Rossi (2017)

4.2.4 Suscetibilidade das bacias de contribuição

A partir das condições físicas e morfológicas apresentadas não indicam elevada propensão a processos erosivos e de escoamento de poluentes.

A prevalência de relevo plano e de solos do tipo Latossolo não favorece a ocorrência frequente de processos erosivos profundos. No entanto, a presença de erosão superficial nesse tipo de solo, conforme identificada em atividade de campo, pode indicar que outros fatores, como o uso da terra pode desencadear esse tipo de impacto. A topografia pouco declivosa, associada à presença de Gleissolos, potencializa o armazenamento de água, o que também foi indicado pelos índices morfométricos (Ic e Kc).

As características hidromórficas no entorno das AUGIs também indicam potencial para o estoque de carbono e para o abastecimento do aquífero raso. Desse modo, a análise dessas condicionantes evidencia o potencial de provisão de serviços ecossistêmicos por esses ambientes.

4.3 Pressões e mudanças nas AUGIs

Nesse item será indicado e analisado os valores das variáveis de perigo (SPEI) e riscos (MNDWI e NDVI) apresentados para as bacias de contribuição e para as AUGIs.

4.3.1 Validação dos dados climatológicos

A validação das informações de temperatura média e de precipitação anual é mostrada na Tabela 6. Como pode ser observado, tanto a temperatura média mensal quanto a precipitação acumulada mensal estimadas pelas fontes ERA5-Land e CHIRPS apresentaram bom desempenho quando comparadas aos dados observados pela estação meteorológica do CEPAGRI.

Tabela 6 - Valores dos índices estatísticos obtidos para a validação dos dados climatológicos (precipitação acumulada mensal e temperatura média mensal)

Índices Estatísticos	**Valor Referência**	**Valor Obtido**	
		Temperatura média mensal (ERA-5 Land)	**Precipitação acumulada mensal (CHIRPS)**
RMSE	Próximo de 0	1.43°C	50.81 mm
MBE	Próximo de 0	-0.79°C	5.87 mm
r	Próximo de 1	0.91	0.84
R^2	Próximo de 1	0.83	0.70
d	Próximo de 1	0.93	0.91

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Os dados de temperatura mensal demonstraram desempenho significativamente positivo em relação aos dados de referência, com alta correlação (r = 0,91), coeficiente de determinação elevado (R^2 = 0,83) e índice de concordância (d = 0,93) próximo do ideal. Já o erro médio quadrático (RMSE = 1,43 °C) e o viés médio (MBE = -0,79 °C) foram considerados moderados, mas ainda dentro de parâmetros aceitáveis para aplicações ambientais e climáticas (Muñoz-Sabater *et al*., 2021).

Os dados de precipitação mensal do CHIRPS, embora tenham apresentado um RMSE mais elevado (50,81 mm), também mostraram desempenho estatisticamente satisfatório, com r = 0,84, R^2 = 0,70 e d = 0,91. Isso indica que, apesar da maior variabilidade nos dados de precipitação, característica comum a essa variável, o modelo foi capaz de representar adequadamente a tendência e a distribuição dos valores observados.

Dessa forma, ambos os conjuntos de dados demonstram qualidade suficiente para análises ambientais, sendo especialmente confiáveis no caso da temperatura.

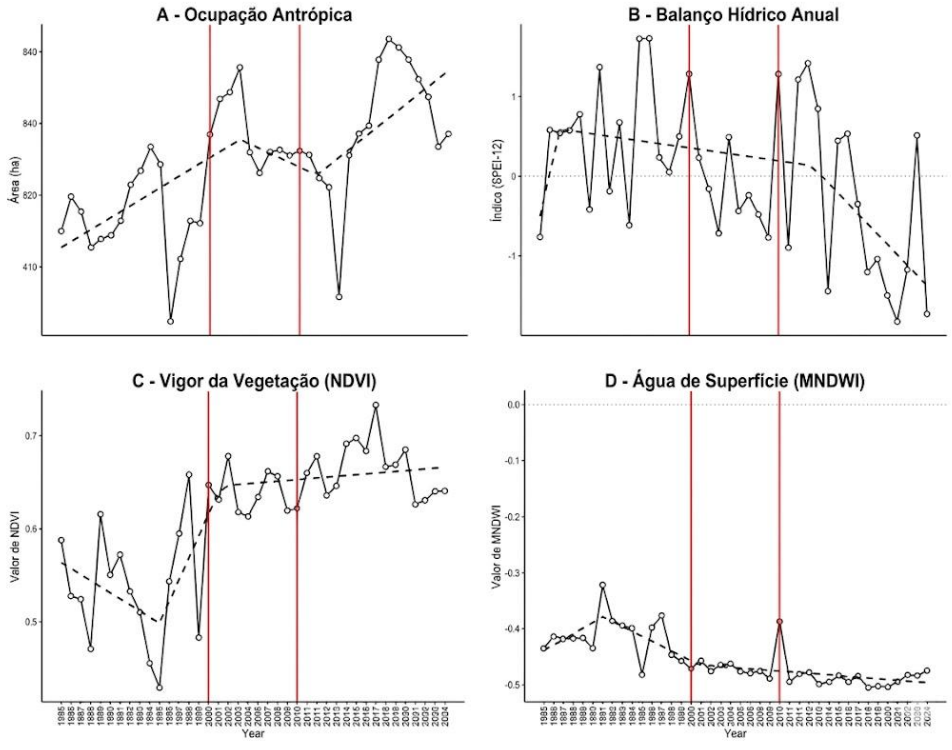
4.3.2 Dinâmica dos fatores ao longo do tempo

4.3.2.1 Análise geral

Por meio das análises estatísticas foi possível identificar as mudanças nas métricas avaliadas e assim avaliar em que medida as bacias de contribuição e especificamente as AUGIs estão sendo afetadas por processos de degradação frente a essas variáveis.

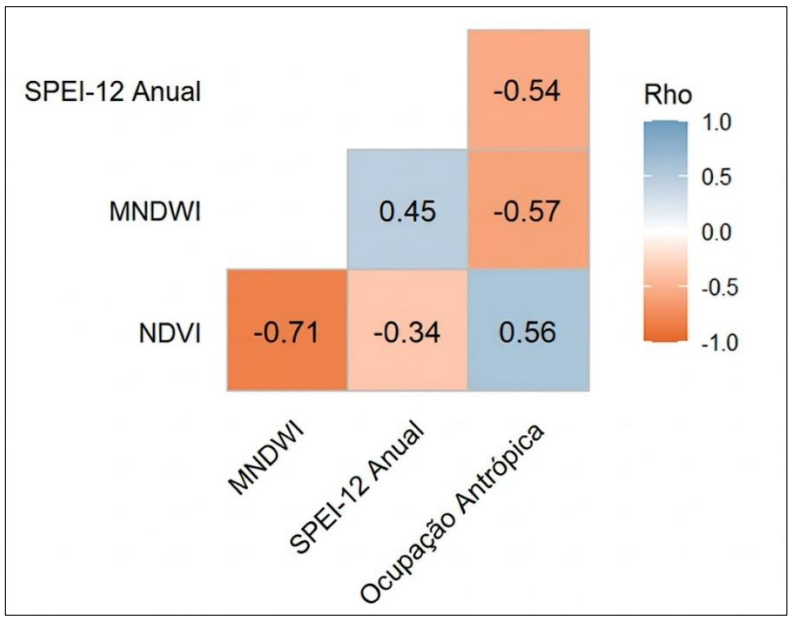
Em nível de bacia, percebe-se que o ano de 2000 foi um marco para todos os fatores avaliados (Gráfico 2). O NDVI a partir desse momento apresenta uma tendência de aumento, enquanto o MNDWI e o SPEI iniciam um processo gradual de declínio. Essa relação inversamente proporcional é corroborada pela correlação de Spearman (Figura 9), sobretudo em relação ao NDVI e ao MNDWI (ρ = -0.71). Tal comportamento pode ser justificado pelo fato de que em períodos de seca há um aumento na cobertura de vegetação em AUGIs e em momentos de maior presença de água, o contrário ocorre (Ahmed; Akter, 2017). Também é observada uma correlação positiva (ρ = 0.45) entre o SPEI-12 e o MNDWI, o que indica a dependência da existência da lâmina d'água em relação ao clima. Por fim, moderada entre o NDVI e a ocupação antrópica (ρ = 0,56), o que sugere que o aumento da biomassa vegetal pode corresponder à expansão de áreas de uso antrópico, como pastagens e culturas agrícolas, o que é evidenciado na tendência temporal.

Gráfico 1 – Dinâmica temporal (1985 – 2024) dos índices espectrais (NDVI e MNDWI) e de precipitação-evapotranspiração das bacias de contribuição



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Figura 9 - Correlação de Spearman: entre as variáveis de ameaça (Ocupação Antrópica e SPEI-12) e resposta (NDVI e MNDWI)



Fonte: Organizado pela autora (2026)

No que diz respeito a tendência de mudança dos índices avaliados, percebe-se que todas as métricas, possuem uma tendência significativa ($p < 0.05$; Tabelas), sendo negativas para o MNDWI e SPEI e positivas para NDVI e Ocupação antrópica.

Tabela 7 – Valores de S, p-valor e inclinação (β) e tendência de mudança de cada uma das variáveis analisadas

Variável	S (Z-score)	p-valor	β (Inclinação de Sen)	Tendência
SPEI-12	-256	0.003	-0.044	Significativa
Ocupação antrópica	365	< 0.001	0.484	Significativa
NDVI	400	0	0.004	Significativa
MNDWI	-460	0	-0.002	Significativa

Fonte: Organizado pela autora (2026)

Sobre o uso antrópico da terra, observa-se uma tendência crescente significativa (β = 0,484 ha/ano), caracterizada por um uso consolidado da terra que se mantém consistentemente acima de 800 ha.

A análise temporal do uso e ocupação da terra nas bacias de contribuição das áreas úmidas revela que, ao longo dos 39 anos analisados, o padrão dominante corresponde à ocupação por cana-de-açúcar, acompanhada pela retração de usos extensivos, como pastagens e mosaicos de usos (Gráfico 2).

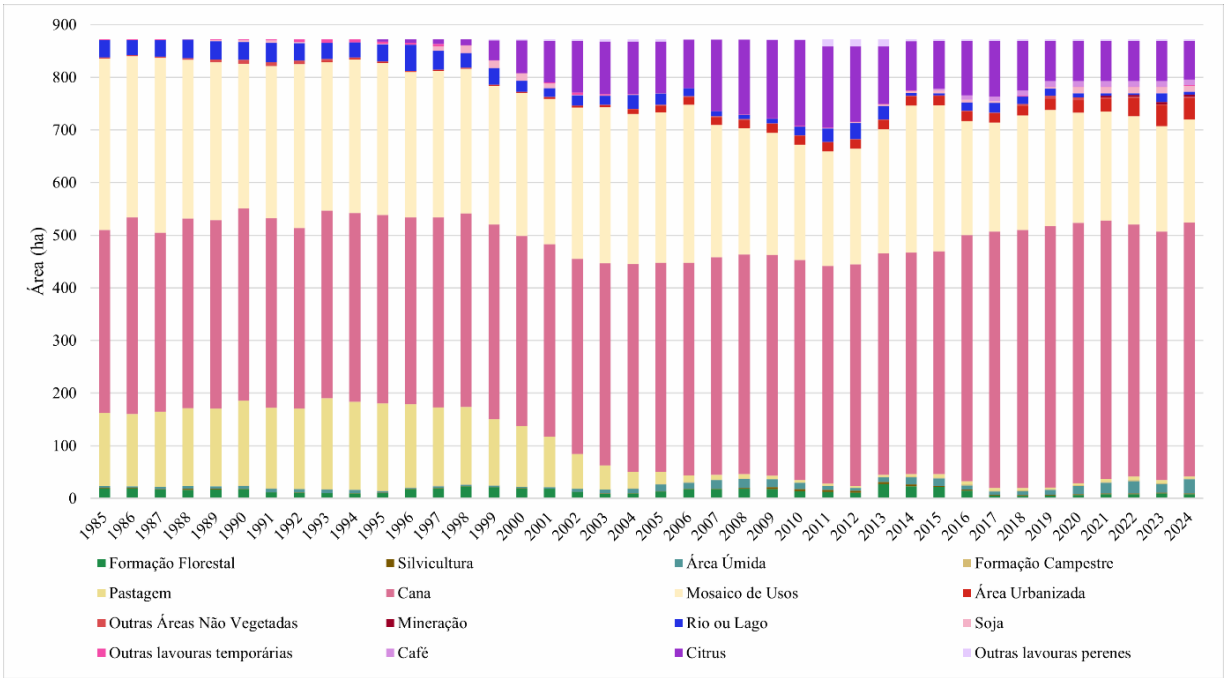
A cana pode gerar efeitos contrastantes sobre a infiltração da água no solo. Por um lado, pode favorecer a agregação das partículas do solo e, consequentemente, aumentar a infiltração, o que pode resultar na contaminação de aquíferos (Jiang *et al*., 2012). Por outro, pode promover a dispersão de partículas, reduzindo a capacidade de infiltração e intensificando o escoamento superficial, que pode transportar poluentes até os corpos d'água (Silva *et al*., 2007). Ademais, esse tipo de cultivo pode promover a compactação da camada superficial do solo ao longo dos anos, em função do tráfego de máquinas agrícolas, reduzindo a infiltração nesses ambientes e potencializando o escoamento em direção às áreas úmidas (Failache; Zuquette, 2018). Por fim, pode gerar aumento da taxa de sedimentação proveniente da erosão hídrica e desequilíbrio hidrológico (Atkinson *et al*., 2013; Smith *et al*., 2022; Barratt Heitmann *et al*., 2025).

Além disso, conforme observado na Figura 7, essa ocupação configura um processo de confinamento das bacias de contribuição à presença da cana-de-açúcar, indicando também a fragmentação desses ecossistemas em função desse padrão de uso da terra.

Como já indicado anteriormente, a conversão de áreas naturais para a agricultura é um dos principais perigos para as áreas úmidas, e o que se percebe nesse caso não é uma mudança no uso da terra ao longo do período analisado, mas sim a constância de uma matriz antrópica que pode acarretar de maneira gradativa danos às AUGIs, como, por exemplo, contaminação por poluentes e erosão.

Esses impactos poderiam ser mitigados pelas zonas tampão, isto é, áreas naturais vegetadas ao redor da área alagada que promovem a remoção de sedimentos e poluentes para as zonas úmidas, além de contribuírem para a adaptação às mudanças nos regimes de precipitação e temperatura (Castelle *et al*., 1994; Liu *et al*., 2016).

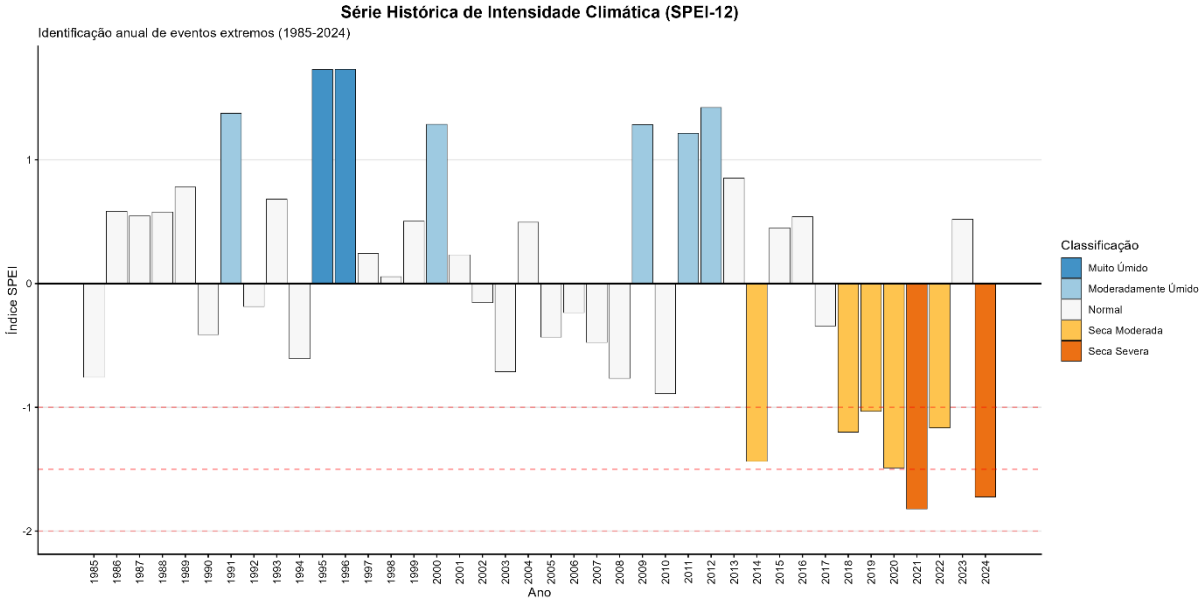
Gráfico 2 - Distribuição das classes de uso da terra de 1985 a 2024 na área de estudo (limites das bacias de contribuição das AUGIs)



Fonte: MapBiomas (2026)

Já o SPEI anual indica uma tendência de queda expressiva, sendo observado a partir de 2014 as classificações de seca moderada e seca severa, que se fazem presentes em quase todos os anos subsequentes (Gráfico 4).

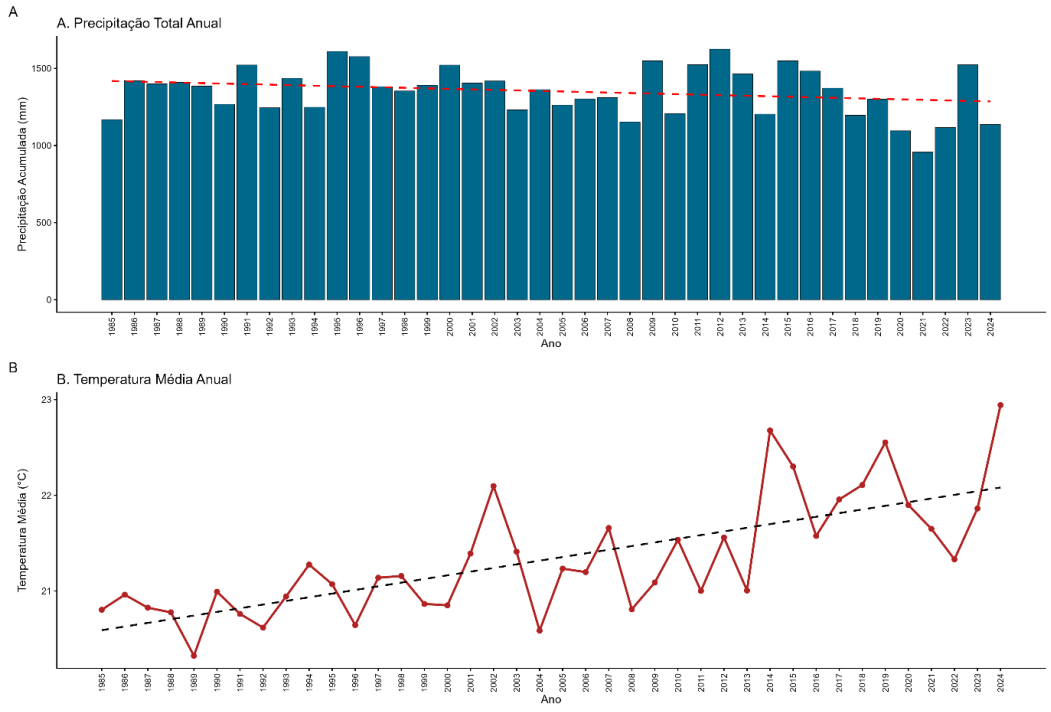
Gráfico 3 - Classificação de intensidade de seca e umidade (1985-2024) a partir dos valores do SPEI-12 (média geral de todas as bacias de contribuição)



Fonte: Organizado pela autora (2026)

Esse comportamento está associado sobretudo pelo aumento da temperatura média, que tem uma tendência de aumento significativa ($p < 0,001$) de +0,034 °C/ano (Gráfico 5; Tabela 8). Essa tendência tem impacto direto na evaporação, o que potencializa a vulnerabilidade das AUGIs, pois pode acelerar a perda da lâmina d'água desses ecossistemas.

Gráfico 4 - Evolução temporal da precipitação acumulada e da temperatura média nas bacias de contribuição



Fonte: Organizado pela autora (2026)

Tabela 8 – Valores de S, p-valor, β e tendência de mudança da precipitação acumulada e da temperatura média

Variável	S	Valor de p	β	Tendência
Precipitação acumulada	-1.573	0.116	-3.457	Não Significativa
Temperatura média	4.952	0.000001	0.034	Significativa

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Diante dos dados apresentados, observa-se que no período mais recente, sobretudo a partir de 2014 as secas meteorológicas impulsionadas pela diminuição das chuvas anuais e principalmente pelo aumento da temperatura média anual estão prevalecendo. Essa dinâmica é percebida na redução da lâmina d'água (MNDWI) das AUGIs representando uma resposta negativa direta aos efeitos climáticos que se mostra como um dos principais agentes de degradação desses ecossistemas.

4.3.2.2 Análise por bacia e AUGI

Com os valores da inclinação de Sen por bacia (Tabela 9) das variáveis que indicaram mudanças significativas na análise geral (NDVI, MNDWI, ocupação antrópica e SPEI-12), percebe-se que a Bacia 19 apresentou a maior queda no SPEI-12 (β = -0,053), acompanhada com uma redução na lâmina d'água (β = -0,002). As Bacias 14, 16, 17 e as que registraram as maiores perdas de água superficial (β = -0,004). A bacia 18 também apresentou a maior tendência de aumento na ocupação antrópica, juntamente às bacias 1 e 7 (β = 0,0002).

Tabela 9 - Valores da Inclinação de Sen (β) para cada variável e suas respectivas características suscetibilidade

Bacia	Suscetibilidade	Uso Antrópico (β)	SPEI-12 (β)	MNDWI (β)	NDVI (β)
1	Latossolo / Plano	0,0002	-0,047	-0,003	0,009
2	Latossolo / Plano	-0,0001	-0,043	-0,003	0,01
3	Latossolo / Plano	0	-0,047	-0,001	0,006
4	Latossolo / Suave Ond.	-0,0001	-0,047	-0,001	0,003
5	Latossolo / Suave Ond.	0	-0,038	-0,002	0,006
6	Latossolo / Suave Ond.	0	-0,042	-0,001	0,002
7	Latossolo / Ondulado	0,0002	-0,042	-0,003	0,004
8	Gleissolo / Plano	0	-0,042	-0,001	0,004
9	Latossolo / Plano	0	-0,037	-0,001	0,002
10	Latossolo / Plano	--	-0,042	-0,003	0,001
11	Latossolo / Plano	--	-0,042	-0,003	0,001
12	Latossolo / Plano	0	-0,042	-0,002	0,004
13	Latossolo / Suave Ond.	0	-0,041	-0,003	0,003
14	Latossolo / Suave Ond.	0	-0,038	-0,004	0,002
15	Gleissolo / Ondulado	--	-0,033	-0,003	0,004
16	Latossolo / Plano	--	-0,033	-0,004	0,001
17	Latossolo / Ondulado	0	-0,044	-0,004	0,002
18	Latossolo / Ondulado	0,0002	-0,044	-0,004	0,003
19	Argissolo / Plano	-0,0001	-0,053	-0,002	0,001

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Vale destacar que por essas áreas estarem sob regimes climáticos muito semelhantes em razão da escala regional, as condições de suscetibilidade podem ajudar a entender algumas diferenças observadas nos índices entre as bacias. Nota-se que as bacias com solos do tipo Argissolo (Bacia 19) ou relevos mais movimentados (Ondulado - Bacias 7, 17 e 18) tendem a sofrer impactos mais severos de perda de água ou estresse hídrico do que os Latossolos Planos, devido à menor capacidade de retenção de água ou maior escoamento superficial.

5. CONCLUSÕES

Os métodos e as técnicas empregadas ao longo de um período de 39 anos (1985–2024) possibilitaram identificar o estado atual e a evolução temporal das AUGIs. Verificou-se que as características físicas locais de relevo e solo não constituem, por si só, fatores de risco significativo ou de alta suscetibilidade natural a ameaças como erosão ou perda severa de água. No entanto, a vulnerabilidade dessas áreas aumentou expressivamente nas últimas décadas devido a fatores externos, o que destaca o protagonismo da ação humana combinada às mudanças climáticas nos impactos negativos gerados nesses ecossistemas.

Quando analisado o uso e ocupação da terra, percebe-se que as AUGIs se configuram atualmente como verdadeiros enclaves (ilhas) no interior de uma matriz antrópica dominante, ocupada especialmente pela monocultura intensiva de cana-de-açúcar. Essa dinâmica expõe tais ambientes a riscos constantes de poluição, sedimentação e desequilíbrio hidrológico. Embora o NDVI tenha apresentado uma tendência crescente ao longo da série histórica, esse aumento não reflete o desenvolvimento de espécies nativas, mas sim o avanço e o vigor das culturas agrícolas circundantes. O predomínio da cana-de-açúcar atua como um forte condicionante ambiental, elevando as taxas de evapotranspiração e contribuindo para a redução progressiva da lâmina d'água superficial.

Em paralelo, a análise dos índices meteorológicos e espectrais revelou que os fatores climáticos exercem um papel crucial na degradação das AUGIs. O aumento da temperatura média impulsionou uma tendência de valores de SPEI progressivamente mais baixos, culminando na ocorrência de secas moderadas e severas sem precedentes dentro do período analisado. A análise de correlação corrobora que essa forte pressão climática atua em sinergia com a matriz agrícola, intensificando o estresse hídrico e ameaçando a manutenção e os serviços ecossistêmicos dessas áreas úmidas.

Diante desse cenário, a restauração ecológica surge como uma alternativa viável de mitigação. A conversão de faixas agrícolas periféricas, hoje ocupadas pela cana-de-açúcar, em áreas de vegetação natural (zonas de amortecimento) poderia amortecer os impactos do aumento térmico regional, preservando os corpos d'água e a biodiversidade local. Por fim, embora as respostas aqui apresentadas constituam um alerta imediato e robusto, ressalta-se a necessidade de estudos futuros mais aprofundados, amparados por dados meteorológicos locais de alta resolução e mapeamentos de uso da terra e de atributos físicos ainda mais precisos. Os resultados deste estudo evidenciam a urgência na aplicação de medidas protetivas, servindo como subsídio técnico essencial para que decisores políticos e a sociedade civil formulem

instrumentos legais e políticas públicas de preservação direcionadas às AUGIs, hoje inexistentes.

6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Base hidrográfica ottocodificada das bacias hidrográficas do Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ). Brasília: ANA, 2013.

ABU-BAKR, Heba Abd el-Aziz. Groundwater vulnerability assessment in different types of aquifers. **Agricultural Water Management**, v. 240, p. 106275, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Cursos d'água (shp). Brasília: ANA, 2012. Disponível em: < https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/5dd8982f-afe3-4bf0-88d1-73fd53bc196c>. Acesso em: 17 mar. 2025.

AHMED, Kazi Rifat; AKTER, Simu. Analysis of landcover change in southwest Bengal delta due to floods by NDVI, NDWI and K-means cluster with landsat multi-spectral surface reflectance satellite data. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 8, p. 168-181, 2017.

ALMEIDA, F.F.M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. São Paulo: Instituto Geográfico e Geológico, Geologia do Estado de São Paulo, p. 167-263 (Boletim, 41). 1964.

ALMEIDA, Fabrício Pelizer de. Distribution and correlation of soil physical and chemical parameters in Cerrado wetland applying mathematical models. 2016. 131 f. Tese (Doutorado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. DOI https://doi.org/10.14393/ufu.te.2016.59

ALVES, W. S.; MARTINS, A. P.; MORAIS, W. A.; PÔSSA, É. M.; MOURA, D. M. B.; SANTOS, L. N. S.; MOREIRA, E. P. Morfometria da bacia hidrográfica do Rio Verdinho, sudoeste de Goiás, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 13, n. 07, p. 3636-3658, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3636-3658. Acesso em: 31 jan. 2026.

AMENDOLA, D.; MUTEMA, M.; ROSOLEN, V.; CHAPLOT, V. Soil hydromorphy and soil carbon: A global data analysis. **Geoderma**, v. 324, p. 9–17, 2018.

ARAÚJO, Caio Sérgio Pereira de; SILVA, Ivis Andrei Campos e; IPPOLITO, Matteo; ALMEIDA, Ceres Duarte Guedes Cabral de**.** Evaluation of air temperature estimated by ERA5-Land reanalysis using surface data in Pernambuco, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessmen***t*, [S.l.], v. 194, n. 381, 2022.

ATKINSON, C. L.; GOLLADAY, S. W.; FIRST, M. R. Water quality and planktonic microbial assemblages of isolated wetlands in an agricultural landscape. **Wetlands**, v. 31, p. 885–894, 2011. DOI: https://doi.org/10.1007/s13157-011-0203-6.

BALLUT-DAJUD, G. A.; SANDOVAL HERAZO, L. C.; FERNÁNDEZ-LAMBERT, G.; MARÍN-MUÑIZ, J. L.; LÓPEZ MÉNDEZ, M. C.; BETANZO-TORRES, E. A. Factors affecting wetland loss: a review. ***Land***, v. 11, n. 3, p. 434, 2022. DOI: 10.3390/land11030434.

BARRATT HEITMANN, J.; MASON, B. M.; CALLAGHAN, C. T**.** Land cover and area influence bird biodiversity in geographically isolated wetlands. **Diversity and Distributions**, v. 31, n. 3, e70012, 2025.

BENTO, Letícia Longanezi; RIBEIRO, Hugo José; KOPP, Kátia Alcione. Análise de uso e cobertura da terra e índices de diferença normalizada de vegetação e água em terras indígenas e entorno na Região Hidrográfica da Amazônia. ***Sociedade & Natureza***, v. 37, p. e74902, 2025.

BERNARDELLI, V.C. **Diagnóstico das alterações geomorfológicas em área de expansão urbana no setor sul de Araras (SP): subsídio para o planejamento urbano**. 2019. 199f. Dissertação (mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro, 2020.

BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S. M. SPEI: calculation of the standardized precipitation-evapotranspiration index. 2023. Disponível em: https://spei.csic.es; https://github.com/sbegueria/SPEI. Acesso em: 3 dez. 2025.

CASTELLE, A. J.; JOHNSON, A. W.; CONOLLY, C. Wetland and stream buffer size requirements: a review. **Journal of Environmental Quality,** v. 23, n. 5, p. 878–882, 1994.

CAVALCANTE, A. E. Q. M.; GRIGIO, Alfredo Marcelo; DIODATO, Marco Antônio. Morfometria e diagnóstico físico conservacionista (dfc) em 19 sub-bacias da bacia hidrográfica Apodi Mossoró. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 7, p. 3891-3909, 2021.

CEMADEN. Mapas Secas. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - Cemaden/MCTI, 2024. Disponível em: <https://mapasecas.cemaden.gov.br/>. Acesso em: 13 set. 2024.

CEPAGRI. Climatologia Campinas. Centro de Pesquisas Metereológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura, 2024. Disponível em:<https://www.cpa.unicamp.br/graficos>. Acesso em: 13 set. 2024.

COLETTI, J.Z.; HINZ, C.; Vogwill, R.; HIPSEY, M.R. Hydrological controls on carbon metabolism in wetlands. **Ecological Modelling**, v. 249, p. 3-18, 2013. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2012.07.010.

Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2022: ano base 2021**. Piracicaba: Fundação Agência das Bacias PCJ, 141 p., 2023. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhsm/relatoriodesituacao>. Acesso em: 28 nov. 2023.

CONVENÇÃO SOBRE ZONAS ÚMIDAS**.** Pequenas zonas úmidas: sua importância e estratégias para uma conservação eficaz. Gland, Suíça: Secretariado da Convenção sobre Zonas Úmidas, 2025. (Policy Brief, 7). DOI: 10.69556/strp.pb7.25. Versão em português.

COP RAMSAR. Ramsar COP8 DOC. 11: Climate Change and Wetlands.8th Meeting of the Conference of the Contracting Parties to the Convention on Wetlands (Ramsar, Iran, 1971), Valencia, p. 18-26, nov. 2002. Disponível em: <https://cdi.mecon.gob.ar/bases/docelec/dp1452.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2024.

COSTA, Julio; PEREIRA, Gabriel; SIQUEIRA, Maria Elisa; CARDOZO, Francielle; SILVA, Viviane Valéria da. VALIDAÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO ESTIMADOS PELO CHIRPS PARA O BRASIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, *[S.*

l.], v. 24, 2021. DOI: 10.5380/abclima.v24i0.60237. Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/14127. Acesso em: 21 jun. 2025.

DEBANSHI, Sandipta; PAL, Swades. Wetland delineation simulation and prediction in deltaic landscape. **Ecological indicators**, v. 108, p. 105757, 2020.

DI BUCCHIANICO, A. Coefficient of Determination (R^2). In: RUGGIERO, W. V. (Ed.). **Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability**. Chichester: Wiley, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1002/9780470061572.eqr173. Acesso em: 5 jul. 2025.

DIKICI, Mehmet; AKSEL, Murat. Comparison of SPI, SPEI and SRI drought indices for Seyhan Basin. **International Journal of Electronics Mechanical and Mechatronics Engineering**, v. 9, n. 4, p. 1751-1762, 2019.

DODANGEH, Parisa; SHAH-HOSSEINI, Reza; HOMAYOUNI, Saeid. Wetland monitoring using a comprehensive drought indicator based on meteorological, agricultural, hydrological, and anthropogenic parameters. **Earth Systems and Environment**, p. 1–28, 2025.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, ed.6, 2025, 393 p.

ESRI. **ArcGIS Pro geoprocessing tool reference - ArcGIS Pro 3.3**. ESRI, 2024. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/main/arcgis-pro-tool-reference.htm>. Acesso em: 27 ago. 2024.

FAGUN, I. A.; CHOWDHURY, S. J. K.; SHIPRA, N. T.; KUNDA, M.; YANG, C.-S.; HARUN-AL-RASHID, A. Assessing spatiotemporal LULC changes using NDVI and EVI in a freshwater swamp forest of Bangladesh. **Discover Forestry**, v. 1, p. 34, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s44415-025-00037-w

FAHRLÄNDER, S. F.; WANG-ERLANDSSON, L.; PRANINDITA, A.; JARAMILLO, F. Hydroclimatic vulnerability of wetlands to upwind land use changes. **Earth's Future**, v. 12, n. 3, p. e2023EF003837, 2024.

FAILACHE, M.F.; ZUQUETTE, L.V. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in basin in southern Brazil**. Engineering Geology**, v. 246, p. 107-122, 2018. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.09.032.

FERNANDES, R.P.; SILVA, R.W.C.; SALEMI, L.F.; ANDRADE, T.M.; MORAES, J.M. Geração do escoamento superficial em uma microbacia com cobertura de cana-de-açúcar e floresta ripária. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n.3, Taubaté, 2013. DOI: 10.4136/ambi-agua.1236.

FIDALGO, Elaine Cristina Cardoso. Estoque de carbono nos solos do Brasil [recurso eletrônico]. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 121. ISSN 1678-0892).

FUNK, Chris; PETERSON, Pete; LANDSFELD, Martin; PEDREROS, Diego; VERDIN, James; SHUKLA, Shraddhanand; HUSAK, Gregory; ROWLAND, James; HARRISON, Laura; HOELL, Andrew; MICHAELSEN, Joel**.** The climate hazards infrared precipitation with stations,a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015.

FURLAN, L.M.; FERREIRA, M.E.; MOREIRA, C.A.; ALENCAR, P.G.; CASAGRANDE, M.F.S.; ROSOLEN, V. Satellite, UAV and Geophysical Data to Identify Surface and Subsurface Hydrodynamics of Geographically Isolated Wetlands: Understanding an Undervalued Ecosystem at the Atlantic Forest-Cerrado Interface of Brazil. **Remote Sensing**, v. 15, ed. 7, 2023. DOI: 10.3390/rs15071870. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/7/1870>. Acesso em: 05 ago. 2024.

FURLAN, Lucas Moreira; JUNQUEIRA, Deise Aparecida; MOREIRA, César Augusto; ROSOLEN, Vania. Pequenas áreas úmidas geograficamente isoladas do setor de cuesta e depressão periférica paulista: inventário, hidrologia e governança ambiental. In: JUNK, Wolfgang J.; CUNHA, Cátia Nunes da (org.). **Inventário das áreas úmidas brasileiras: distribuição, ecologia, manejo, ameaças e lacunas de conhecimento** [recurso digital]. 1. ed. Cuiabá: Carlini & Caniato Editorial, 2024. p. 619–631. ISBN 978-85-8009-353-7.

FURLAN, Lucas M.; MOREIRA, Cesar A.; ALENCAR, Paulo G.; ROSOLEN, Vania. Environmental monitoring and hydrological simulations of a natural wetland based on high-resolution unmanned aerial vehicle data (Paulista Peripheral Depression, Brazil). **Environmental Challenges**, v. 4, ago. 2021. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100146. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667010021001256>. Acesso em: 28 nov. 2023.

FURLAN, L.M.; ROSOLEN, V.; SALLES, J.; MOREIRA, C.; FERREIRA, M.E.; BUENO, G.T.; COELHO, C.V.S.; MOUNIER, S. Natural superficial water storage and aquifer recharge assessment in Brazilian savana wetland using unmanned aerial vehicle and geophysical survey. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v.8, n.3, set. 2020. DOI: 10.1139/juvs-2020-0004. Disponível em: <https://cdnsciencepub.com/doi/full/10.1139/juvs-2020-0004>. Acesso em: 05 ago. 2024.

FUSHIMI, Melina. **Vulnerabilidade ambiental aos processos erosivos lineares de parte dos municípios de Marabá Paulista-SP e Presidente Epitácio-SP**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2016.

GITAY, H.; FINLAYSON, C. M.; DAVIDSON, N. C. A framework for assessing the vulnerability of wetlands to climate change. Ramsar Technical Report No. 5/CBD Technical Series No. 57. Gland: Ramsar Convention Secretariat; Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2011. ISBN 92-9225-361-1 (impresso); 92-9225-362-X (online).

HAUKE, J.; KOSSOWSKI, T. Comparison of values of Pearson's and Spearman's correlation coefficients on the same sets of data. **Quaestiones Geographicae**, v. 30, n. 2, p. 87–93, 2011.

HAYASHI, M.; van der KAMP, G.; ROSENBERRY, D.O. Hydrology of Prairie Wetlands: Understanding the Integrated Surface-Water and Groundwater Processes. **Wetlands**, v. 36, p. 237-254, 2016. DOI: 10.1007/s13157-016-0797-9.

HOFFMAN, J. The future of satellite remote sensing in hydrogeology. **Hydrogeology Journal**, v. 13, p. 247-250, 2005. DOI: 10.1007/s10040-004-0409-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-004-0409-2>. Acesso em: 31 jul. 2024.

HÜLLE, B. L**.** Mamíferos de médio e grande porte num remanescente de Cerrado no sudeste do Brasil (Itirapina, SP). 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) — Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

IBGE. Malha municipal. 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=downloads. Acesso em: 20 jun. 2024.

IMDAD, Kashif; SAHANA, Mehebub; GAUTAM, Ouseen; CHAUDHARY, Archana; MISRA, Shubhi; DWIVEDI, Sudha; AHMED, Rayees**.** Anthropogenic and hydroclimatic drivers of livelihood vulnerability in wetland communities: a geospatial and pragmatic assessment. **Water Resources Management**, p. 1–23, 2025.

INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - IGC. **Mapeamento sistemático do estado de São Paulo**. São Paulo: IGC, 1979. Escala 1:10.000.

JANSSEN, Peter HM; HEUBERGER, Peter SC. Calibration of process-oriented models. **Ecological modelling**, v. 83, n. 1-2, p. 55-66, 1995.

JEROZOLIMSKI, Ricardo; TAGLIARI, Mário M.; CAMPOS, José R. R. Temporal Changes in Land Use Highlight the Vulnerability of Highland Grasslands in Protected Areas in Southern Brazil. **Biotropica**, v. 58, n. 1, p. e70145, 2026.

JIANG, Ze-Pu; LI, Yang-Rui; WEI, Guang-Po; LIAO, Qing; SU, Tian-Ming; MENG, Yan-Cheng; ZHANG, Hai-Ying; LU, Chang-Yan. Effect of long-term vinasse application on physico-chemical properties of sugarcane field soils. **Sugar Tech**, v. 14, p. 412–417, 2012.

JIN, X.; QIANG, H.; ZHAO, L.; JIANG, S.; CUI, N.; CAO, Y.; FENG, Y. SPEI-based analysis of spatio-temporal variation characteristics for annual and seasonal drought in the Zoige Wetland, Southwest China from 1961 to 2016. ***Theoretical and Applied Climatology***, v. 139, n. 1, p. 711–725, 2020.

JOYCE, Chris. Wetlands, ecology and landscapes. In: DIXON, Alan; MADDOCK, Ian (eds.). **Routledge Handbook of Wetlands**. London: Routledge, 2025. DOI: 10.4324/97810003219644.

JUNK, W.J.; PIEDADE, M.T.F.; LOURIVAL, R.; WITTMANN, F.; KANDUS, P.; LACERDA, L.D.; BOZELLI, R.L., ESTEVES; F.A., NUNES DA CUNHA C.; MALTCHICK, L.; SCHÖNGART, J.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; AGOSTINHO, A.A. Brazilian wetlands: definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Environments**, v. 24, ed. 1, p. 5-22, 2013. DOI: 10.1002/aqc.2386.

JUNK, W.J. Definição, delineamento e classificação brasileira das áreas úmidas. In: JUNK, Wolfgang J.; Cunha, Cátia N. (Orgs.). **Inventário das áreas úmidas brasileiras: Distribuição, ecologia, manejo, ameaças e lacunas de conhecimento.** Cuiabá, Mato Grosso: Carlini & Caniato Editorial, 2024. Cap. 1, p. 29-42.

JUNQUEIRA, Deise A. **Princípios da governança ambiental na gestão de recursos hídricos com foco em áreas úmidas (AU's) na Depressão Periférica Paulista**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. 2021.

JUNQUEIRA, D.A.; CONCIANI, D.E.; FURLAN, L.M.; RIZZIERI, R.M.; ROSOLEN, V. An analysis of spatiotemporal local governance toward the management of geographically isolated wetlands (Paulista Peripherial Depression, Brazil. **Wetlands Ecology and Management**, 2024. DOI: 10.1007/s11273-024-10008-1.

KENDALL, Maurice George; GIBBONS, Jean Dickinson**.** Rank correlation methods. London: Griffin, 1962.

LAIPELT, Leonardo; ANDRADE, Bruno Comini de; COLLISCHONN, Walter; TEIXEIRA, Alexandre de Amorim; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de; RUHOFF, Anderson. **ANADEM: A Digital Terrain Model for South America**. *Remote Sensing*, v. 16, n. 13, p. 2321, 2024. DOI: 10.3390/rs16132321.

LÁZARO, W. L.; OLIVEIRA-JÚNIOR, E. S.; SILVA, C. J. D.; CASTRILLON, S. K. I.; MUNIZ, C. C**.** Climate change reflected in one of the largest wetlands in the world: an overview of the Northern Pantanal water regime. **Acta Limnologica** *Brasiliensia*, v. 32, p. e104, 2020.

LEFEBVRE, G.; REDMOND, L.; GERMAIN, C.; PALAZZI, E.; TERZAGO, S.; WILLM, L.; POULIN, B. Predicting the vulnerability of seasonally-flooded wetlands to climate change across the Mediterranean Basin. **Science of the Total Environment**, v. 692, p. 546-555, 2019.

LEPSCH, I.F. **Formação e Conservação dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178 p.

LIU, Y.; THELLER, L. O.; PIJANOWSKI, B. C.; ENGEL, B. A. Optimal selection and placement of green infrastructure to reduce impacts of land use change and climate change on hydrology and water quality: An application to the Trail Creek Watershed, Indiana. **Science of the Total Environment**, v. 553, p. 149–163, 2016.

LONDE, D.W.; Dvorett, D.; DAVIS, C.A.; LOSS, S.R.; ROBERTSON, E.P. Inundation of depressional wetlands declines under a changing climate. **Climatic Change**, v. 172, n.27, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10584-022-03386-z. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-022-03386-z>. Acesso em: 06 ago. 2024.

LV, Jinxia; JIANG, Weiguo; WANG, Wenjie; WU, Zhifeng; LIU, Yinghui; WANG, Xiaoya; LI, Zhuo. Wetland loss identification and evaluation based on landscape and remote sensing indices in Xiong'an new area. **Remote Sensing**, v. 11, n. 23, p. 2834, 2019.EAUxzL0sW7CSJIM-TAnHCLKuh7xpDnX5YOOOD9vPaFCh25TFlcRp1P1rsfp9athDvz8#b0105>. Acesso em: 09 abr. 2024.

MA, Q.; WU, Y.; ZHANG, G.; JIANG, L.; ROUSSEAU, A. N.; ZHANGL, W. Quantitative assessment of the key drives shaping the long-term dynamics of geographically isolated wetlands: A case study within the Nenjiang River Basin, Northeast China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, p. 952, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10661-024-13116-w

MANN, Henry B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the Econometric Society**, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.

MAPBIOMAS – Coleção 9 da série anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em 30 abr. 2025 através do link: https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection_9/lclu/coverage/brasil_coverage_2023.tif

MARANDOLA JR, Eduardo; HOGAN, Daniel Joseph. As dimensões da vulnerabilidade. **São Paulo em perspectiva**, v. 20, n. 1, p. 33-43, 2006.

MASIGE, G.; OPERE, A.; MULWA, J**.** Assessing the indicators of water stress in Usangu agricultural wetland, Tanzania. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 13, n. 8, p. 102–120, 2025.

MATSUNAGA, Wendy Kaori; SALES, Eliton Sancler Gomes; ASSIS JÚNIOR, Gervásio Costa; SILVA, Madson Tavares; LACERDA, Francinete Francis; LIMA, Evaldo de Paiva; SANTOS, Carlos Antonio Costa dos; BRITO, José Ivaldo Barbosa de. Application of ERA5-Land reanalysis data in zoning of climate risk for corn in the state of Bahia,Brazil. **Theoretical and Applied Climatology,** [S.l.], v. 155, n. 2, p. 945–963, 2024. DOI: 10.1007/s00704-023-04508-8

MCLAUGHLIN, Daniel L.; KAPLAN, David A.; COHEN, Matthew J. A significant nexus: Geographically isolated wetlands influence landscape hydrology. **Water Resources Research**, v. 50, n. 9, p. 7153-7166, 2014.

MELNYCHENKO, Tetiana; SOLOVEY, Tatiana. Mapping Water Bodies and Wetlands from Multispectral and SAR Data for the Cross-Border River Basins of the Polish–Ukrainian Border. **Water**, v. 16, n. 3, p. 407, 2024.

MITSCH, Willian J.; NAHLIK, Amanda; WOLSKI, Piotr; BERNAL, Blanca; ZHANG, Li; RAMBERG, Lars. Tropical wetlands: seasonal hydrologic pulsing, carbon sequestration, and methane emissions. **Wetlands ecology and management**, v. 18, n. 5, p. 573- 586, 2010. DOI: 10.1007/s11273-009-9164-4.

MORAES, I. C.; CONCEIÇÃO, F. T. da; LUPINACCI, C. M.; MORUZZI, R. B. Comparação de Metodologias na Definição de Fluxos Acumulados a Partir de Modelos Digitais de Elevação do Terreno Aplicado a Suscetibilidade de Inundações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, n.2, 223-235, 2014.

MOREIRA, L. F. B.; MACHADO, I. F.; MALTCHIK, L**.** Water budget, fire, and land use in the Brazilian Ramsar sites: wetlands drying out. **Wetlands**, v. 45, p. 102, 2025. DOI: 10.1007/s13157-025-01986-w.

MOREIRA, V.O.G. Uso de ferramenta do software ArcGIS na delimitação da bacia hidrográfica do Rio Curu - CE. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 43, p.1-10, 2022.

MOTTA-JUNIOR, J. C.; GRANZINOLLI, M. A. M.; DEVELEY, P. F. Aves da estação ecológica de Itirapina, estado de São Paulo, Brasil. **Biota Neotropica**, v. 8, p. 207–227, 2008.

MUÑOZ-SABATER, Joaquín; DUTRA, Emanuel; AGUSTÍ-PANAREDA, Anna; ALBERGEL, Clément; ARDUINI, Gabriele; BALSAMO, Gianpaolo; BOUSSETTA, Souhail; CHOULGA, Margarita; HARRIGAN, Shaun; HERSBACH, Hans; MARTENS, Brecht; MIRALLES, Diego G.; PILES, María; RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, Nemesio J.; ZSOTER, Ervin; BUONTEMPO, Carlo; THÉPAUT, Jean-Noël. ERA5-Land: a state-of-the-

art global reanalysis dataset for land applications. **Earth System Science Data,** [S.l.], v. 13, n. 9, p. 4349–4383, 2021. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.

NETTO, A. L.C. Hidrologia de Encosta na interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S.B. (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015. p. 93-111.

OLIVEIRA, J.B. de; CAMARGO, M.N.de; ROSSI, M. & CALDERANO FILHO, B. 1999. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida. Campinas: Instituto Agronômico/EMBRAPA Solos, 1999. v. 1. 64 p. (inclui Mapa, escala 1:500.000).

OLIVEIRA, J. B. de.; PRADO, H. do**. Levantamento pedológico semidetalhado do estado de São Paulo: Quadricula de São Carlos II. Memorial descritivo** . Campinas: Instituto Agronômico/EMBRAPA, 1984. 188 p.

OLIVEIRA-JÚNIOR, José Francisco de; SILVA JUNIOR, Carlos Antonio da; TEODORO, Paulo Eduardo; ROSSI, Fernando Saragosa; BLANCO, Cláudio José Cavalcante; LIMA, Mendelson; GOIS, Givanildo de; CORREIA FILHO, Washington Luiz Félix; SANTIAGO, Dimas de Barros; VANDERLEY, Mário Henrique Guilherme dos Santos. Confronting CHIRPS dataset and in situ stations in the detection of wet and drought conditions in the Brazilian Midwest. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 9, p. 4478-4493, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.7045.

PALMIERI, F.; LARACH, J.O.I. Pedologia e Geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T; CUNHA, S.B da (Orgs.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, ed. 7, 2009, cap.2, p.59-122.

PAREDES-TREJO, Franklin J.; BARBOSA, H. A.; KUMAR, TV Lakshmi. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. **Journal of arid environments**, v. 139, p. 26-40, 2017.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; McMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644, 2007.

PENTEADO, M.M. **Geomorfologia do Setor Centro-Ocidental da Depressão Periférica Paulista**. Tese (Doutorado)- Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, Rio Claro. 1976.

PERSICO, G.; SEYOUM, W. M.; PETERSON, E. W. Interrelationships between NDVI, surface water, and regional hydro-climatic variables in the Sudd Wetland. **Wetlands**, v. 44, p. 92, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s13157-024-01851-2

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). **Relatório do Desenvolvimento Humano 2007/2008**: Combater as mudanças climáticas: solidariedade humana em um mundo dividido. Nova York: PNUD, 2007.

PROJETO RADAMBRASIL**.** Folhas SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1983.

REATTO, A.; COREIA, J.R.; SPERA, S.T.; MARTINS, E.S. Solos do bioma cerrado: aspectos. In: SANO, S.M. (ORG.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília: EMBRAPA Informações Tecnológicas, p. 107-149, 2008.

ROCHA, Gerôncio Albuquerque (coord.). **Mapa hidrogeológico do Estado de São Paulo (1:1.000.000).** São Paulo: DAEE; IPT; CPRM, 2005.

ROSOLEN, V.; DE-CAMPOS, A. B.; GOVONE, J. S.; ROCHA, C**.** Contamination of wetland soils and floodplain sediments from agricultural activities in the Cerrado Biome (State of Minas Gerais, Brazil). **Catena**, v. 128, p. 203–210, 2015.

ROSOLEN, V.; FURLAN, L. M.; MOREIRA, C. A. Wetlands: hydrological processes and impacts. In: DIXON, A.; MADDOCK, I. (org.). **Routledge handbook of wetlands**. London: Routledge, 2025. p. 26–37.

ROSS, J.L.S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, v.8, 1994. DOI: 10.7154/RDG.1994.0008.0006. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rdg/article/view/47327>.

ROSSI, Márcio. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.

Ruy, G.G. 2025. COMUNIDADE VEGETAL E RECONSTITUIÇÃO PALEOAMBIENTALDE ÁREAS ÚMIDAS GEOGRAFICAMENTE ISOLADAS DO CERRADO: ESTUDO DE CASO. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biociências – Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 46 p.

SALIMI, S.; ALMUKTAR, S. A. A. N.; SCHOLZ, M. Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands. **Journal of Environmental Management**, v. 286, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112160.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Coordenadoria de Recursos Hídricos. **Indicadores para Gestão dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo**. Coordenação de Nilceia Franchi e Bruno Franco de Souza. São Paulo: SSRH/CRHI, ago. 2013.

SANTORO, J. Erosão Continental. In: TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2015, 196 p. 53-71.

SAUNDERS, W.K.; MAIDMENT, D. A GIS assessment of nonpoint source pollution in the san Antonio-Nueces Coastal Basin. **Center of Research in Water Resources**, 1996.

SEDGWICK, P. Pearson's correlation coefficient. **BMJ**, Londres, v. 345, e4483, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1136/bmj.e4483. Acesso em: 5 jul. 2025.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, p. 1379–1389, 1968.
SILVA, Jéssica Bruna Alves da; ALMEIDA, Gledson Luiz Pontes de; SILVA, Marcos Vinícius da; OLIVEIRA-JÚNIOR, José Francisco de; PANDORFI, Héliton; GIONGO, Pedro Rogerio; MACÊDO, Gleidiana Amélia Pontes de Almeida; GUISELINI, Cristiane;

MARINHO, Gabriel Thales Barboza; BAKKE, Ivonete Alves; FERREIRA, Maria Beatriz. Modelagem espaço-temporal da vulnerabilidade de terras e pastagens em bacias leiteiras no Nordeste do Brasil. **AgriEngineering**, v. 6, n. 3, p. 2970–3000, 2024.

SILVA, Marcos Vinícius da; PANDORFI, Héliton; OLIVEIRA-JÚNIOR, José Francisco de; SILVA, Jhon Lennon Bezerra da; ALMEIDA, Gledson Luiz Pontes de; MONTENEGRO, Abelardo Antônio de Assunção; MESQUITA, Marcio; FERREIRA, Maria Beatriz; SANTANA, Taize Calvacante; MARINHO, Gabriel Thales Barboza; COSTA, Adriana Rodolfo da; GIONGO, Pedro Rogério**.** Remote sensing techniques via Google Earth Engine for land degradation assessment in the Brazilian semiarid region, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 120, p. 104061, 2022.

SILVA, Melissa; GRIEBELER, Nori P..; BORGES, Lino C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 108-114, 2007.

SILVA, J.R.M.; SILVA, L.L. The yield pattern considering the distance to flow accumulation lines. **European Journal of Agronomy,** v. 28, n. 4, p. 551-558, 2008. DOI: 10.1016/j.eja.2007.12.006

SMITH, C. R.; GOLLADAY, S. W.; ATKINSON, C. L.; CLAYTON, B. A**.** Litter breakdown among intermittently connected and unconnected geographically isolated wetlands: how nutrient inputs alter wetland function. **Wetlands**, v. 42, n. 6, p. 57, 2022.

SOUZA JR., Carlos M.; SHIMBO, Julia Z.; ROSA, Marcos R.; PARENTE, Leandro L.; ALENCAR, Ane A.; RUDORFF, Bernardo F. T.; HASENACK, Heinrich; MATSUMOTO, Marcelo; FERREIRA, Laerte G.; SOUZA-FILHO, Pedro W. M.; OLIVEIRA, Sergio W. de; ROCHA, Washington F.; FONSECA, Antônio V.; MARQUES, Camila B.; DINIZ, Cesar G.; COSTA, Diego; MONTEIRO, Dyeden; ROSA, Eduardo R.; VÉLEZ-MARTIN, Eduardo; WEBER, Eliseu J.; LENTI, Felipe E. B.; PATERNOST, Fernando F.; PAREYN, Frans G. C.; SIQUEIRA, João V.; VIERA, José L.; FERREIRA NETO, Luiz C.; SARAIVA, Marciano M.; SALES, Marcio H.; SALGADO, Moises P. G.; VASCONCELOS, Rodrigo; GALANO, Soltan; MESQUITA, Vinicius V.; AZEVEDO, Tasso. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020.

TIRIVAROMBO, S. O. D. E.; OSUPILE, D.; ELIASSON, P**.** Drought monitoring and analysis: standardised precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardised precipitation index (SPI). **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 106, p. 1–10, 2018.

THEIL, H**.** A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. **Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen**, v. 53, p. 386–392; 521–525; 1397–1412, 1950.

THAMAGA, K.H.; DUBE, T.; SHOKO, C. Advances in satellite remote sensing of the wetland ecosystems in Sub-Saharan Africa. **Geocarto International**, v. 37, n.20, p. 5891-5913, 2021. DOI: 10.1080/10106049.2021.1926552. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106049.2021.1926552>. Acesso em: 31 jul. 2024.

TINER, Ralph W. Geographically isolated wetlands of the United States. **Wetlands**, v. 23, n.3, p. 494 - 516, set. 2003. DOI:10.1672/0277 5212(2003)023[0494:GIWOTU]2.0.CO;2.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: SUPREN, 1977.

TORRES MALLMA, Sally; TORRES MALLMA, Anna. Assessment of urban wetlands loss and fragmentation using land use and land cover change and guidostoolbox: A study of Chorrillos district, Lima. **PloS one**, v. 19, n. 12, p. e0314163, 2024.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat satellite missions**. USGS, [2025]. Disponível em: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions. Acesso em: 4 ago. 2025.

VAN DER KAMP, G.; HAYASHI, M. Groundwater-wetland ecosystem interaction in the semiarid glaciated plains of North America. **Hidrogeology Journal**, v. 17, p. 203-214, 2009. DOI: 10.1007/s10040-008-0367-1. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Garth-Van-Der-Kamp/publication/226665613_Groundwater-Wetland_Ecosystem_Interaction_in_the_Semiarid_Glaciated_Plans_of_North_America/links/555b963f08ae6aea0816c7de/Groundwater-Wetland-Ecosystem-Interaction-in-the-Semiarid-Glaciated-Plans-of-North-America.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2024.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index – SPEI. **Journal of Climate**, v. 23, p. 1696–1718, 2010.

VITTE, A. C.; MELLO, J. P. de. Considerações sobre a erodibilidade dos solos e a erosividade das chuvas e suas conseqüências na morfogênese das vertentes: um balanço bibliográfico. **CLIMEP - Climatologia e Estudos da Paisagem**, *[S. l.]*, v. 2, n. 2, 2008. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/climatologia/article/view/775>. Acesso em: 30 out. 2024.

YANG, Xiao; LIU, Sen; JIA, Chao; LIU, Yang; YU, Cuicui. Vulnerability assessment and management planning for the ecological environment in urban wetlands. **Journal of Environmental Management**, v. 298, p. 113540, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113540.

XIANG, Hengxing; WANG, Zongming; MAO, Dehua; ZHANG, Jian; XI, Yanbiao; DU, Baojia; ZHANG, Bai. What did China's National Wetland Conservation Program Achieve? Observation of changes in land cover and ecosystem services in the Sanjiang Plain. **Journal of Environmental Management**, v. 267, ago. 2020. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110623.

XU, Hanqiu. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing,** v. 27, n. 14, p. 3025–3033, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1080/01431160600589179. Acesso em: 16 fev. 2026.

XU, Ting; WENG, Baisha; YAN, Denghua; WANG, Kun; LI, Xiangnan; BI, Wuxia; LI, Meng; CHENG, Xiangjun; LIU, Yinxue. Wetlands of internacional importance: status, threats, and future protection. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 10, 2019. DOI: 10.3390/ijerph16101818.

WEILL, M. A. M.; PIRES NETO, A. G. Erosão e Assoreamento. In: SANTOS, R. F. (Org.). **Vulnerabilidade Ambiental**. Brasília: MMA, 2007. p. 39-58.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981. DOI: 10.1080/02723646.1981.10642213.

WILLMOTT, Cort J.; MATSUURA, Kenji. *On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators*. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 1, p. 89–102, 2006.

ZUQUETTE, L.; FAILACHE, M.; BARBASSA, A. Assessment of Depressional Wetland Degradation Spatial Distribution, and Geological Aspects in Southern Brazil. **Geosciences**, v. 10, n.8, 2020. DOI: 10.3390/geosciences10080296.

ANEXO A – DADOS DE PRECIPITAÇÃO ACUMULADA E TEMPERATURA MÉDIA ESTIMADOS E OBSERVADOS UTILIZADOS

	Temperatura Média (ºC)		Precipitação Acumulada (mm)	
Mês/ano	**CEPAGRI**	**ERA-5 Land**	**CEPAGRI**	**CHIRPS**
jan/10	25,8	23,87	318	315
fev/10	26,8	24,86	59	130
mar/10	25,4	23,38	182	143
abr/10	23,4	21,26	57	77
mai/10	20,3	19,26	34	21
jun/10	18,9	17,59	24	21
jul/10	20,5	19,13	57	20
ago/10	20,3	19,47	0	7
set/10	22,9	22,49	74	68
out/10	22,9	20,82	75	73
nov/10	24,6	22,59	193	97
dez/10	26,2	23,71	215	237
jan/11	26,55	23,88	404	388
fev/11	26,9	24,35	142	193
mar/11	24,65	21,89	214	211
abr/11	23,9	21,45	100	115
mai/11	20,15	17,72	25	14
jun/11	17,8	15,99	45	46
jul/11	20,15	18,79	6	9
ago/11	21,6	20,04	28	26
set/11	22,9	21,47	13	24
out/11	24,1	22,25	153	192
nov/11	23,65	21,32	209	136
dez/11	25,2	22,86	227	176
jan/12	24,35	22,08	330	336
fev/12	26,85	24,31	113	181
mar/12	25,4	23,19	20	94
abr/12	24,05	22,23	163	129
mai/12	20,1	17,99	64	70
jun/12	19,35	18,17	135	151
jul/12	18,35	17,21	42	29
ago/12	20,7	19,3	0	4
set/12	22,8	22,2	35	65
out/12	25,55	24,26	89	177
nov/12	24,7	22,82	65	134
dez/12	27	24,94	152	258
jan/13	24,4	22,78	216	219
fev/13	25,55	23,63	120	270
mar/13	24,35	22,56	241	221
abr/13	22,15	20,18	96	77
mai/13	20,25	19,44	66	68
jun/13	19,45	18,25	54	74

jul/13	19,5	16,91	74	28
ago/13	19,5	18,83	5	10
set/13	21,6	21,13	38	98
out/13	22,45	21,44	96	137
nov/13	23,75	22,79	78	114
dez/13	25,55	24,12	98	147
jan/14	26,6	26,02	152	158
fev/14	27,25	26,73	61	89
mar/14	24,85	24,09	80	186
abr/14	22,95	22,75	61	67
mai/14	20,25	20,27	26	41
jun/14	20,2	19,78	6	36
jul/14	18,85	18,37	25	42
ago/14	20,75	20,24	12	10
set/14	23	22,98	67	102
out/14	24,65	24,17	35	71
nov/14	24,45	23,09	120	181
dez/14	24,95	23,64	270	222
jan/15	26,65	26,11	136	209
fev/15	24,7	23,86	208	211
mar/15	23,45	22,71	243	210
abr/15	22,8	21,89	24	45
mai/15	19,8	19,49	82	90
jun/15	19,3	18,82	22	19
jul/15	19,05	18,74	33	51
ago/15	21,05	20,79	26	12
set/15	23	22,68	148	84
out/15	24,9	24,82	78	131
nov/15	24,3	23,78	171	256
dez/15	25,1	23,91	321	233
jan/16	24,75	23,49	236	296
fev/16	25,95	24,58	288	219
mar/16	24,55	23,2	205	196
abr/16	24,7	23,65	13	22
mai/16	19,55	19,08	84	87
jun/16	17,35	16,04	180	67
jul/16	19,15	18,14	2	5
ago/16	20,4	20,03	37	28
set/16	21,4	21,52	30	41
out/16	23,35	22,49	114	151
nov/16	23,35	22,4	121	150
dez/16	24,85	24,28	127	224
jan/17	24,85	24,18	356	267
fev/17	25,7	24,8	102	136
mar/17	24	23,15	240	206
abr/17	22,7	21,91	88	94

mai/17	20,4	20,01	114	80
jun/17	19	18,14	27	37
jul/17	18,15	17,44	0	0
ago/17	19,7	19,56	34	31
set/17	23,75	23,64	13	35
out/17	23,5	23,64	103	158
nov/17	23,1	22,83	234	156
dez/17	24,65	24,17	173	174
jan/18	24,5	23,59	205	257
fev/18	24,2	23,31	89	143
mar/18	25,95	25,19	81	228
abr/18	23,3	22,52	45	24
mai/18	20,9	20,46	9	9
jun/18	20,7	19,87	10	26
jul/18	20,5	19,88	10	4
ago/18	19,1	18,31	76	55
set/18	22	21,54	51	48
out/18	23,15	22,49	143	157
nov/18	23,65	22,94	300	114
dez/18	25,4	25,18	70	133
jan/19	26,7	26,32	196	210
fev/19	24,85	24,67	74	269
mar/19	24,7	23,37	60	217
abr/19	23,9	22,84	110	73
mai/19	21,55	20,91	43	57
jun/19	20,05	19,13	10	8
jul/19	18,5	17,86	49	7
ago/19	19,9	19,39	5	6
set/19	23,2	23,25	50	38
out/19	25,2	25,02	56	90
nov/19	24,35	24,02	160	150
dez/19	24,6	23,86	147	182
jan/20	25,1	23,98	251	212
fev/20	24,05	22,9	198	222
mar/20	23,85	22,38	165	81
abr/20	22,25	21,03	68	26
mai/20	19	18,01	62	41
jun/20	20,4	19,3	45	40
jul/20	19,8	19,24	37	2
ago/20	19,95	19,4	25	15
set/20	24,8	24,39	23	15
out/20	25	24,76	44	57
nov/20	23,85	23,53	107	119
dez/20	24,9	23,85	189	261
jan/21	25,8	24,3	178	220
fev/21	24,5	23,39	259	156

mar/21	24,8	23,94	81	115
abr/21	21,8	21,41	12	14
mai/21	20,2	19,93	23	23
jun/21	19,2	18,18	27	22
jul/21	17,9	16,47	0	8
ago/21	21,3	20,48	16	10
set/21	24,8	24,42	7	18
out/21	22,4	21,57	121	133
nov/21	23,6	22,66	84	119
dez/21	24,1	23,05	188	120
jan/22	24,4	23,49	313	207
fev/22	25	23,62	168	130
mar/22	25,7	24,32	131	106
abr/22	23,4	22,14	40	31
mai/22	19,1	18,33	39	35
jun/22	19,1	17,85	16	21
jul/22	20,8	19,78	9	1
ago/22	19,6	19,07	28	14
set/22	20	20,04	90	73
out/22	23,2	22,53	120	116
nov/22	22,1	21,95	143	99
dez/22	23,6	22,85	324	281
jan/23	24	22,57	381	279
fev/23	24,5	23,26	159	240
mar/23	24,9	23,42	131	185
abr/23	22,1	20,76	82	121
mai/23	20,2	18,63	25	43
jun/23	18,7	16,25	37	75
jul/23	19,4	17,62	6	7
ago/23	21,7	20,71	25	16
set/23	24,5	24,35	80	41
out/23	24,4	23,91	224	212
nov/23	25,3	25,09	253	181
dez/23	26,4	25,8	107	123
jan/24	25,4	24,77	234	146
fev/24	25,7	25,04	69	126
mar/24	25,6	24,41	102	174
abr/24	24,9	23,72	13	27
mai/24	23	22,05	88	18
jun/24	21,3	19,77	0	6
jul/24	20	18,87	41	10
ago/24	21	20,37	50	18
set/24	25,2	25,51	35	8
out/24	24,7	24,36	120	112
nov/24	23,8	22,95	188	236
dez/24	24,7	23,48	270	255