

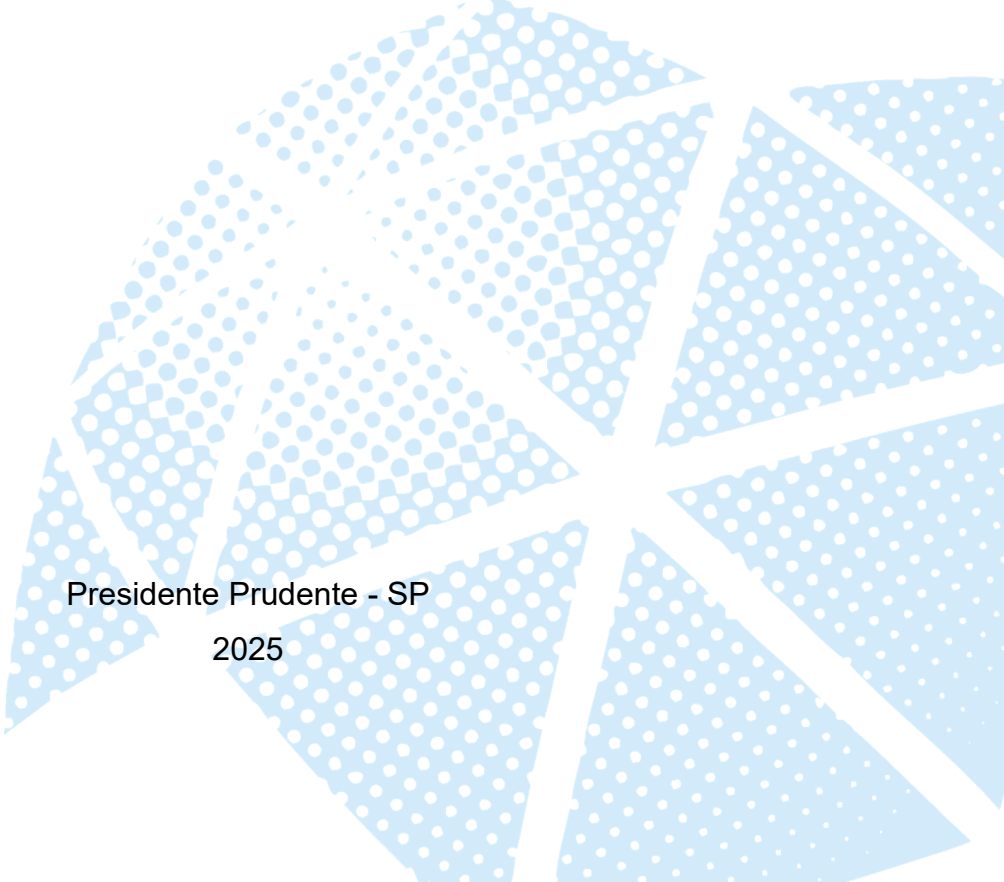
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia - Campus de Presidente Prudente

CAROLINA SOUZA BRIZOTTI

**INFORMAÇÕES SOBRE PADRÕES ESPACIAIS E TENDÊNCIAS TEMPORAIS
DO ARMAZENAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA DO
PARANAPANEMA COMO SUBSÍDIO HÍDRICO**

Presidente Prudente - SP

2025



CAROLINA SOUZA BRIZOTTI

**INFORMAÇÕES SOBRE PADRÕES ESPACIAIS E TENDÊNCIAS TEMPORAIS
DO ARMAZENAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA DO
PARANAPANEMA COMO SUBSÍDIO HÍDRICO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, para obtenção do título de Mestre(a) em Programa de Pós-Graduação em Geografia – Mestrado Profissional.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Orientador(a): Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione

Presidente Prudente - SP

2025

B862i

Brizotti, Carolina Souza

Informações sobre padrões espaciais e tendências temporais do armazenamento das águas subterrâneas na bacia do Paranapanema como subsídio hídrico / Carolina Souza Brizotti. -- Presidente Prudente, 2025

83 p. : tabs., mapas + aplicativo

Dissertação (Mestrado profissional - Geografia Profissional) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Rodrigo Lilla Manzione

1. Geoprocessamento. 2. Águas subterrâneas. 3. Monitoramento ambiental. 4. Análise espacial (Estatística). I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: INFORMAÇÕES SOBRE PADRÕES ESPACIAIS E TENDÊNCIAS
TEMPORAIS DO ARMAZENAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA
BACIA DO PARANAPANEMA COMO SUBSÍDIO HÍDRICO

AUTORA: CAROLINA SOUZA BRIZOTTI

ORIENTADOR: RODRIGO LILLA MANZIONE

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciências, área: Recursos
Hídricos e Meio Ambiente pela Comissão Examinadora:



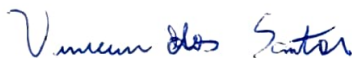
Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZIONE (Participação Presencial)

Departamento de Geografia e Planejamento / Faculdade de Ciências, Tecnologia e Educação - FCTE/Ourinhos



Prof. Dr. EDSON LUÍS PIROLI (Participação Presencial)

Departamento de Geografia e Planejamento / Faculdade de Ciências Tecnologia e Educação de Ourinhos -
FCTE/Unesp



Dr. VINICIUS DOS SANTOS (Participação Presencial)

Centro de Estudos Ambientais / Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro - IGCE/Rio Claro

Presidente Prudente, 13 de outubro de 2025

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia – Mestrado Profissional em Geografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Presidente Prudente onde iniciei este processo de grandes e prosperas transformações e a Faculdade de Ciências, Tecnologia e Educação – Campus Ourinhos, que tem sido minha casa pelos últimos 8 anos, ambos ambientes de grande aprendizado acadêmico e de vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione, pela disponibilidade, paciência, atenção, pelas experiências oportunizadas que me trouxeram grande aprendizado e principalmente por me incentivar e me fazer acreditar no trabalho.

Aos membros da banca de qualificação e de apresentação da dissertação Prof. Dra. Edineia Aparecida dos Santos Galvanin, Prof. Dr. Edson Luís Piroli e Prof. Dr. Vinicius dos Santos pelas valiosas contribuições.

A meus pais, amigos e amores de quatro patas por tornarem a vida mais leve, em especial ao meu irmão, Giovanni, pelas ligações intermináveis, noites de jogos e pelas dores e risos compartilhados.

À Dona Maria da Conceição (in memoriam) que me ensinou o que na vida realmente importa, porque cada esforço feito, cada novo dia iniciado, é para honrar a nossa história e as oportunidades que você me deu para chegar até aqui.

Às minhas meninas, Evelyn Kauane, Ana Beatriz e Maria Rita, para que vocês trilhem caminhos ainda mais prósperos.

Ao pessoal da Biblioteca Unesp Ourinhos por animarem minhas tardes e ao Laboratório de Climatologia da FCTE pelo uso do espaço e equipamentos que facilitaram o desenvolvimento da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. CAPES 206/2018

RESUMO

Com a crescente exploração das águas subterrâneas como recurso para abastecimento e suplementação hídrica, a importância de produzir informações úteis para o entendimento de seus padrões e tendências em termos de volume também aumenta. Essas informações auxiliam na gestão do recurso hídrico, considerando suas variações no espaço e no tempo em termos de demanda, sazonalidade climática e recarga. O presente estudo investigou o armazenamento das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema (BHRP) para entender suas variações espaciais e temporais na região entre 2003 e 2025. A BHRP, é uma área de relevante influência econômica, possuindo grande atividade agropecuária e significativa concentração populacional; e devida a decorrência de uma crise hídrica que afetou a bacia nos últimos anos, a utilização de águas subterrâneas como ferramenta de suplementação hídrica, tem se tornado prática comum na maioria de seus municípios. A análise utilizou dados de sensoriamento remoto do modelo armazenamento de água subterrânea do Sistema de Assimilação de Dados de Land Data Global (GLDAS). Foi empregada a Análise Exploratória de Dados Espaciais e Temporais (ESTDA) como abordagem estatística para investigação de padrões espaciais e tendências temporais, de modo a verificar a disposição dos dados, através de sua autocorrelação espacial, agrupamentos de pontos quentes e frios, homogeneidade e pontos de mudança nas séries temporais, como forma de identificar características significativas e anomalias na série considerada. A análise espacial resultou em variações acentuadas de volume de água disponível pela extensão do território com marcadas diferenças entre as unidades de planejamento hídrico, contemplando suas diferentes características hidrogeológicas de armazenamento e das variações de série temporal, podemos observar oscilações graduais ao longo dos anos com períodos recarga e atenuação dos níveis freáticos na escala de observação anual, e padrões de influência sazonal de variabilidade climática na escala de observação semestral com tendências de agrupamento decrescente em toda a região do médio Paranapanema. Estes fatores demandam contínuo acompanhamento através da observação de padrões climáticos e de gestão hídrica, considerando intensidade de consumo e tempo de recarga dos aquíferos para um eficaz planejamento hídrico.

Palavras-chave: GLDAS; GRACE; agrupamentos; armazenamento das águas subterrâneas; monitoramento.

ABSTRACT

With the increasing exploitation of groundwater as a resource for water supply and supplementation, the importance of producing useful information for understanding its patterns and trends in terms of volume also increases. This information assists in the management of water resources, considering their variations in space and time in terms of demand, climatic seasonality, and recharge. This study investigated groundwater storage in the Paranapanema River Basin (BHRP) to understand its spatial and temporal variations in the region between 2003 and 2025. The BHRP is an area of great economic influence, possessing significant agricultural activity and a substantial population concentration; and due to a water crisis that has affected the basin in recent years, the use of groundwater as a tool for water supplementation has become common practice in most of its municipalities. The analysis used remote sensing data from the groundwater storage model of the Global Land Data Assimilation System (GLDAS). Exploratory Spatial and Temporal Data Analysis (ESTDA) was employed as a statistical approach to investigate spatial patterns and temporal trends, in order to verify the distribution of data through spatial autocorrelation, clustering of hot and cold spots, homogeneity, and change points in time series, as a way to identify significant characteristics and anomalies in the considered series. The spatial analysis resulted in marked variations in the volume of water available across the territory, with marked differences between the water planning units, considering their different hydrogeological storage characteristics and variations in the time series. We can observe gradual oscillations over the years with periods of recharge and attenuation of groundwater levels on an annual observation scale, and patterns of seasonal influence of climate variability on a semi-annual observation scale with decreasing clustering trends throughout the middle Paranapanema region. These factors demand continuous monitoring through the observation of climatic patterns and water management, considering consumption intensity and aquifer recharge time for effective water planning.

Keywords: GLDAS; GRACE; clusters; groundwater storage; monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. O ciclo da água: reservatórios e fluxos	16
Figura 2. Hierarquia de Domínios.....	26
Figura 3. Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema	32
Figura 4. Mapa Hidrográfico da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema.	33
Figura 5. Mapa da Hidrogeológico da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema.....	35
Figura 6. Mapa da Altimétrico da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema.	36
Figura 7. Mapa da Climático da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema.....	37
Figura 8. Uso e cobertura da terra na BHRP no ano de 2003.....	39
Figura 9. Uso e cobertura da terra na BHRP no ano de 2024.....	39
Figura 10. Estrutura de representação de um cubo espaço-temporal.....	43
Figura 11. Cubo espaço-temporal por agregação de pontos.....	44
Figura 12. Fluxograma da metodologia proposta para análise de dados.	47
Figura 13. Padrões espaço-temporais - média anual (2003 a 2024).....	53
Figura 14. Cubo espaço-temporal da variação média anual (2003-2024).....	53
Figura 15. Padrões espaço-temporais - média semestral (2003 a 2025).....	56
Figura 16. Cubo espaço-temporal da variação média semestral (2003-2025).....	56
Figura 17. Tendência espaço-temporal dos locais quentes na BHRP, média semestral de 2003 a 2025.	61
Figura 18. Variação do armazenamento de águas subterrâneas nas UPH (2003-2024).	62
Figura 19. Variação do armazenamento de águas subterrâneas nas UPH (2003-2025).	63
Figura 20. Variação da precipitação nas UPH (2003-2025).	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Área total e porcentagem de usos.	38
Tabela 2. Estatísticas descritivas para média anual de armazenamento de água subterrânea pelo período de 2003 a 2024	49
Tabela 3. Estatísticas descritivas para média semestral de armazenamento de água subterrânea pelo período de 2003 a 2025.	50
Tabela 4. Gi* Z-score para armazenamento de água subterrânea por UPH em média anual de 2003 a 2024	54
Tabela 5. Gi* Z-score para armazenamento de água subterrânea por UPH em média semestral de 2003 a 2025.	59
Tabela 6. Variação entre períodos - relação de perda e recarga de águas subterrâneas com relação ao semestre anterior	66

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Águas Subterrâneas	14
2.2 Monitoramento de recursos hídricos subterrâneos	18
2.2.1 Monitoramento de recursos hídricos subterrâneos por sensoriamento remoto.....	20
2.3 Análise Exploratória de Dados Espaciais e Temporais.....	24
2.4 Gestão de águas subterrâneas.....	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1 Área de estudo.....	32
3.2 Coleta e processamento dos dados.....	40
3.3 Análise dos dados	42
3.4 Reprodutibilidade e Acesso a Materiais	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1 Estatística Descritiva.....	49
4.2 Variação Espacial	51
4.2.1 Resultados em escala anual.....	51
4.2.2 Resultados em escala semestral.....	55
4.3 Variação Temporal.....	61
4.4 Contribuição para a gestão.....	68
5. CONCLUSÃO.....	70
6. REFERÊNCIAS.....	72
APÊNDICES.....	79

1. INTRODUÇÃO

Pouco ainda se discute sobre padrões espaciais e temporais de comportamento de águas subterrâneas e como eles devem ser considerados nas ações de gestão. Dado o significativo aumento da demanda hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema (BHRP) devido à crise hídrica instalada na região nos últimos anos e o fato de diversas atividades e núcleos urbanos serem abastecidos por águas subterrâneas (ANA, 2014), existe a necessidade de uma análise mais aprofundada sobre seus padrões de reserva para uma gestão adequada do recurso.

De acordo com o diagnóstico produzido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) em seu atlas sobre segurança hídrica e abastecimento urbano (2021), as águas subterrâneas têm ocupado lugar de grande importância como fonte de abastecimento, onde aproximadamente 40% das sedes municipais brasileiras são abastecidas exclusivamente por mananciais subterrâneos.

Devido a esta crescente demanda, faz-se necessária a gestão adequada do recurso, e seus devidos controle e proteção, uma vez que a falta de planejamento hídrico relacionados ao potencial de exploração e de recarga de um aquífero pode gerar problemas relacionados a condições de oferta e demanda, gerando um cenário de superexploração das águas subterrâneas (MANZIONE, 2015).

A recarga é diretamente influenciada espacialmente pela variabilidade de distribuição da precipitação e temporalmente pela variabilidade climática (períodos de secas e cheias), fenômenos que se tornam cada vez mais extremos devido às mudanças climáticas, o aumento de CO₂ e da temperatura e as variações sazonais e multi-decais e causam alterações nos níveis de água superficial e a recarga de aquíferos (TAYLOR et al., 2013; GREEN et al., 2011).

O monitoramento desse recurso ganha importância, para a promoção de uma gestão integrada e consciente das possíveis mudanças de níveis e disponibilidade de águas subterrâneas, sendo o conhecimento dos dados o fator principal para tomadas de decisão conscientes. Uma ferramenta eficaz para monitoramento contínuo e atualizado, são os dados produzidos através de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), os quais podem ser facilmente modelados, para prever efeitos como mudanças climáticas, uso da terra e estratégias de gestão que competem às taxas de recarga de águas subterrâneas, por exemplo (HEALY e SCANLON, 2010).

Através de dados de satélite como o GRACE “Gravity Recovery and Climate Experiment”, por exemplo, é possível estimar as mudanças no armazenamento total de águas (TWS) e modelar o compartimento específico de águas subterrâneas, como o produzido no “Sistema de Assimilação de Dados de Land Data Global” (GLDAS).

Uma adequada análise deve conter métodos associados de manipulação de dados, como Análise Exploratória de Dados (AED) e Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE), que são abordagens estatísticas de análise e visualização de dados para a identificação de métricas e no caso da AEDE os padrões e estruturas dos conjuntos de dados geográficos (ANSELIN, 2002).

Para avaliação da variação dessas informações e de seu impacto pode ser utilizada a metodologia estatística Análise Exploratória de Dados Espaciais e Temporais (AEDET) a qual identifica padrões tais quais os supracitados, mas correlacionando-os com a variável temporal. Estes padrões e tendências a serem interpretados podem identificar variações de massa nos valores de águas subterrâneas, os quais podem possuir associações a contextos climáticos que causam interferência no ciclo hidrológico e consequentemente na recarga dos aquíferos, padrões que ao serem identificados, podem ser tratados com sua devida importância dentro da gestão hídrica.

Assim sendo, este trabalho se justifica na intenção de contribuir academicamente para a demonstração da viabilidade da contínua análise de mudanças nos níveis de águas subterrâneas através de monitoramento via satélite, com o intuito de promover ferramentas úteis ao planejamento hídrico e gestão adequada de recursos, considerando padrões, a fim de atender as necessidades dos Comitês de Bacias, associados ao Programa de Mestrado em considerar alternativas de consumo consciente frente a crise hídrica.

Alinhando-se as políticas públicas ambientais associadas aos objetivos de desenvolvimento sustentável, a pesquisa foca em avaliar a disponibilidade hídrica e constituir ferramenta que seja útil para a ação contra mudanças globais.

A escolha da área de estudo se dá tanto em sua relevância socioeconômica, tratando-se de uma região cuja dinâmica ambiental e hídrica exerce papel estratégico no desenvolvimento local, sustentando atividades produtivas, como agricultura, geração de energia e abastecimento público. Através da vivência territorial e de conhecimentos construídos a cerca da região a pesquisa busca promover

interpretação dos processos ambientais, permitindo uma leitura mais integrada das demandas locais.

1.1 Objetivos

Objetivo Geral

Analisar o comportamento da série histórica de dados GLDAS para monitoramento de águas subterrâneas, interpretando suas oscilações ao longo dos anos durante o período de 2003 a 2025, a fim de entender as possibilidades de uso alternativo frente às demandas hídricas da região da bacia do Paranapanema.

Objetivos Específicos

- Identificar agrupamentos espaciais dos maiores e menores valores de armazenamento das águas subterrâneas;
- Analisar padrões e tendências na distribuição dos dados no espaço e no tempo;
- Disponibilizar informações sobre os padrões e tendências do armazenamento das águas subterrâneas por meio do aplicativo interativo GSDAS - PPRB

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Águas Subterrâneas

Reforça-se neste contexto de estudo a importância de bacias hidrográficas como um sistema físico que determina os fluxos hídricos, dada a resposta do volume de água em relação aos tempos de precipitação, infiltração e escoamento, estes sendo diretamente influenciados pela área da bacia, pela rede de drenagem composta pela extensão de seus cursos d'água e por sua declividade, fatores que vão influenciar diretamente na vazão e no armazenamento dentro da bacia (NONNER, 2002).

Sendo um componente essencial do ciclo hidrológico, armazenadas em aquíferos que formam vastas reservas de água doce, as águas subterrâneas são responsáveis por cerca de 30% da água doce líquida do planeta. Deste volume total armazenado, é considerado reserva disponível o volume de água que se encontre disponível para extração sem que interfira no equilíbrio natural do armazenamento (MANZIONE, 2015).

De acordo com o Relatório de Mudanças Climáticas do IPCC (2021), em análise referente a América do Sul, mesmo com aumentos projetados de precipitação, o cenário não seria suficiente para garantir um aumento proporcional no armazenamento de águas subterrâneas, a menos que haja mudanças significativas de comportamento na tendência de consumo e exploração do meio como um todo. As mudanças de uso do solo com desmatamento em larga escala e processos de urbanização, somados a influência da agricultura e o uso de águas subterrâneas para irrigação, influenciaram as respostas do ciclo hidrológico, alterando padrões de evapotranspiração e escoamento, esta interferência causada vem promovendo um crescente esgotamento das águas subterrâneas desde o início do século XXI.

A problemática se agrava quando consideramos o fato de que a recarga de águas subterrâneas ainda é um tema pouco compreendido, sendo também o de maior importância considerando a possibilidade de sua extração, pois as taxas de recarga variam espacial e temporalmente e são propriedades difíceis de medir. A taxa, o momento e a localização da recarga são informações de grande importância tanto para o abastecimento, quanto para a possibilidade de contaminação do lençol freático (HEALY e SCANLON, 2010).

A dinâmica de águas subterrâneas é de extrema importância para o ciclo hidrológico, funcionando como parte integrante do sistema que compõe o fluxo hídrico,

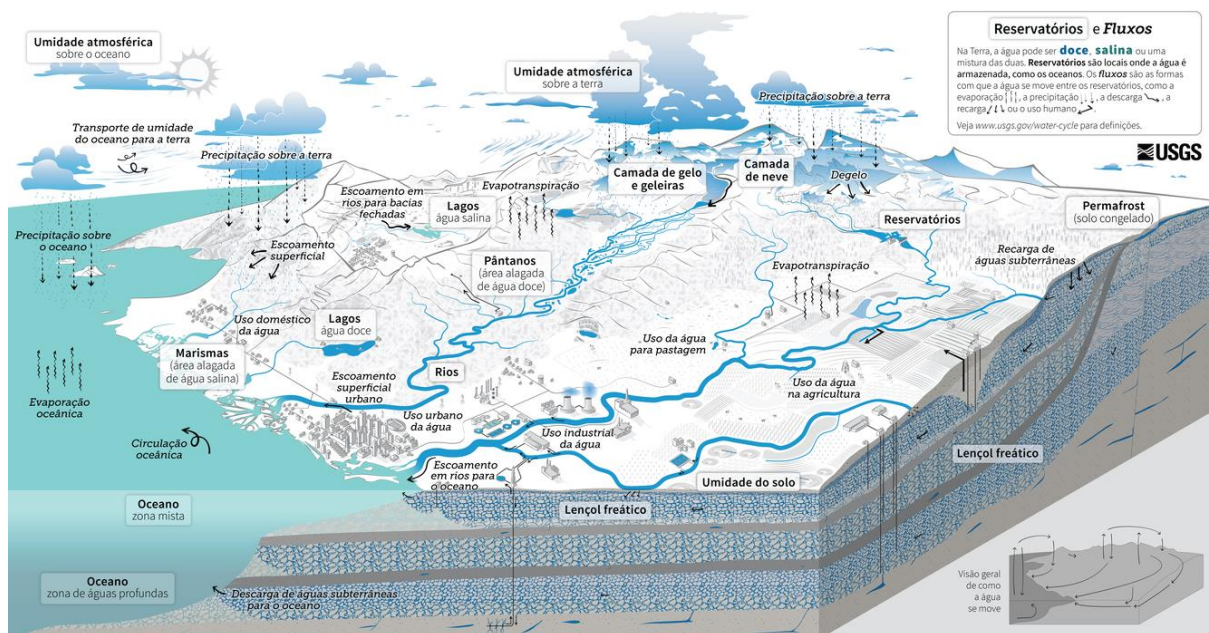
ela representa peça fundamental para o manutenção do equilíbrio dessa conexão hidráulica e da intervenção antrópica que modifica o ambiente natural, a qual pode causar impactos que precisam ser estudados considerando cada um dos componentes do ciclo hidrológico para que se compreenda a grandeza da implicação no sistema (TUCCI, 2007).

Por definição considera-se ciclo hidrológico o movimento contínuo da água acima, sobre e abaixo da superfície terrestre, ele é caracterizado pelas transferências de água entre continentes, oceanos e a atmosfera e possui grande variabilidade no espaço e no tempo, envolvendo processos de precipitação, evaporação, transpiração e escoamentos superficial e subterrâneo (WINTER et al., 1998).

Tucci (2007) vai definir como ponto de partida para a descrição deste fluxo hidrológico o vapor da água e seu agrupamento na atmosfera, que se torna precipitação, a presença umidade, neve, geadas ou chuva pode ser caracterizada como a principal fonte de recarga hídrica em bacias hidrográficas, a partir desta ocorrem os demais fenômenos de fluxo da água como evaporação, a interceptação do volume precipitado pela cobertura vegetal, a infiltração da água pelo solo com os escoamentos subsuperficial e subterrâneo, e o escoamento superficial da água após a saturação da superfície do solo.

Podemos observar esse movimento de fluxos e reservas através da paisagem conceitual produzida pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (Figura 1) que destaca não somente os processos naturais, mas as interferências antrópicas no sistema de circulação de água.

Figura 1. O ciclo da água: reservatórios e fluxos



Fonte: (USGS, 2022).

Neste esquema, o fluxo entre águas superficiais e subterrâneas depende diretamente de fatores como fisiografia e clima, tendo as regiões essas comuns características, espera-se que também apresentem semelhante interação entre os componentes verticais do movimento das águas, cabendo a essa interação a elevação, a pressão e a densidade ponderal, sendo este último a relação entre a massa e o volume do fluido, elementos que vão determinar os pontos de troca entre águas subterrâneas e superficiais (WINTER et al., 1998).

Um significativo fator de interferência do ciclo hidrológico são os fenômenos de variabilidade climática, fenômenos característicos do sistema climático que possuem alternâncias cíclicas ou quase cíclicas, e que alteram condições como temperatura, umidade do ar, intervalo e volume de precipitação, podendo estes serem marcados por variabilidade sazonal considerando padrões climáticos, ou fenômenos de variabilidade interanual como El Niño – Oscilação Sul (Enos) que influencia na distribuição pluviométrica sobre a América do Sul (REBOUÇAS, 2006).

O El Niño é um fenômeno oceânico-atmosférico que ocorre no Pacífico Equatorial em resposta a anomalias de temperatura da superfície do mar, gerando alterações nas flutuações de pressão atmosféricas, e provocando significativas

mudanças nos padrões de precipitação e circulação atmosférica, possuindo episódios de diferentes amplitudes (PHILANDER, 1990).

Interferências deste tipo, podem alterar padrões de recarga tanto de águas superficiais quanto subterrâneas e acarretar possíveis perdas, uma vez que, nos períodos secos, é o fluxo base subterrâneo que alimenta e regulariza a disponibilidade de águas superficiais (MANZIONE, 2015).

Estima-se que o volume de águas subterrâneas seja o equivalente a 53 milhões de km³, no entanto, as condições geotectônicas estabelecem diferentes profundidades para essas águas e em alguns contextos dificultando sua recarga, de modo que toda extração afete diretamente o potencial hídrico do sistema mesmo que os aquíferos pertençam à dinâmica do ciclo hidrológico de recarga (REBOUÇAS, 2006).

Tendo como definição o volume de água que ocorre abaixo de uma determinada área, foi entre as décadas de 60 e 70, em que o conceito de águas subterrâneas passou a integrá-la como um sistema, considerando entradas (recarga) e saídas (descarga), e padrões que se correlacionam obedecendo a leis físicas e matemáticas, e que suas características qualitativas se devem a processos de filtração tanto físicos, quanto químicos e microbiológicos, enquanto as quantitativas fundam-se nas características do meio e de sua permeabilidade (REBOUÇAS, 2006).

Sendo os aquíferos a delimitação física desses sistemas que apresentam características diversas em termos de extensão, profundidade e capacidade de armazenamento, seus aspectos dependem diretamente de fatores geológicos e hidrogeológicos do ambiente onde estão localizados.

Essas formações geológicas podem ser classificadas de acordo com sua capacidade de armazenamento e transmissividade de água, sendo que as características físicas das rochas (como porosidade e permeabilidade) determinam o potencial de armazenamento e a facilidade com que a água pode ser extraída. Aquíferos como o Guarani, por exemplo, apresentam grande capacidade de armazenamento devido à sua extensão e formação geológica porosa, o que permite tanto o uso para abastecimento quanto a recarga natural em condições apropriadas (MANZIONE, 2015).

Os aquíferos cumprem funções ecológicas e socioeconômicas fundamentais, além de atuarem como reguladores naturais do ciclo hidrológico, essas formações não apenas fornecem água para o consumo humano, agrícola e industrial, mas também

mantêm a umidade do solo e o fluxo de rios e lagos durante períodos de seca, funcionando como reservatórios estratégicos de água doce em tempos de escassez hídrica. Essa capacidade de manter fluxos hídricos sustentáveis faz com que os aquíferos desempenhem um papel essencial no equilíbrio ecológico e na mitigação dos efeitos de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas (REBOUÇAS, 2006).

A proteção desses recursos, portanto, requer uma abordagem integrada de gestão que leve em consideração tanto a sustentabilidade da exploração quanto a necessidade de conservar os ecossistemas associados aos aquíferos. Preservar esses sistemas hídricos subterrâneos é essencial para assegurar o desenvolvimento sustentável e a resiliência das populações frente aos desafios das mudanças climáticas e do aumento da demanda por água.

2.2 Monitoramento de recursos hídricos subterrâneos

De acordo com Nonner (2002), o monitoramento das águas subterrâneas pode ser definido como um registro de séries temporais que acompanha as variações acarretadas pela captação e consumo, e pode ser feito em diferentes intervalos de tempo desde que haja um registro contínuo que considere fatores como os níveis e a qualidade de águas subterrâneas.

O monitoramento das águas subterrâneas é essencial para entender a disponibilidade e a qualidade desse recurso, métodos tradicionais e tecnologias de sensoriamento remoto, como monitoramento por satélite, são ferramentas complementares na avaliação e gestão desses recursos, cada abordagem oferece vantagens e limitações que precisam ser cuidadosamente consideradas para fornecer uma visão completa dos aquíferos e sua dinâmica ao longo do tempo.

Os métodos tradicionais para monitoramento de águas subterrâneas, baseados em poços, possuem maior capacidade de fornecer dados detalhados e localizados sobre a profundidade e a qualidade da água em aquíferos específicos.

A instalação de poços de monitoramento requer uma análise cuidadosa do local para garantir que os dados obtidos representem as condições de um determinado aquífero. Estes poços são equipados com sensores que medem a profundidade do lençol freático, parâmetros físico-químicos, como pH e condutividade, e, em alguns casos, a composição química da água subterrânea (FOSTER et al., 2003).

Se mantidos com medições periódicas, estes dados de monitoramento podem ser organizados para séries temporais, permitindo o monitoramento das variações no nível do lençol freático e nas condições hidroquímicas ao longo do tempo possibilitando a identificação de tendências nos níveis, ou de mudanças na qualidade da água. Apesar de fornecerem informações detalhadas, estes métodos estão limitados na escala espacial, uma vez que os dados obtidos são pontuais e demandam grande trabalho na periodicidade das medições em campo.

O monitoramento pode ter a finalidade de avaliar por meio de medição a variação quantitativa, identificar contaminação e controlar a qualidade da água, estabelecer limites de vazão ou auxiliar na construção de modelagens de aquíferos; existem ainda métodos de estimativa de recarga que utilizam valores de demais variáveis do ciclo hidrológico para estimar recarga através da associação de informações de balanço hídrico, baseados em zona saturada, traçados químicos e de isótopos e também métodos de zona não saturada com a utilização de lisímetros e sensores de umidade (MANZIONE, 2015; FEITOSA, 2008).

Com as ferramentas disponíveis através de sistemas de informação geográfica (SIG) há a possibilidade da construção de mapas geológicos, geomorfológicos, entre outros, que possibilitem a integração de informações com dados de poços, permitindo um mapeamento mais robusto da condição das águas

Os primeiros avanços computacionais significativos se deram em 1988 com o desenvolvimento do código computacional do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), o MODFLOW (MCDONALD e HARBAUGH, 1988) que é um modelo modular de fluxo de diferença finita tridimensional capaz de representar o fluxo subterrâneo, a fim de avaliar aspectos como disponibilidade, contaminação, recarga e bombeamento e interações de águas subterrâneas com rios e lagos.

Considerando variáveis de interpretação das águas o monitoramento também pode se dar de forma integrada a informações geradas por sensoriamento remoto, que permitem definir elevação utilizando modelos digitais que auxiliam no mapeamento de direções de fluxo e áreas de recarga, imagens termais ainda podem acusar anomalias em rios e áreas de descarga subterrânea, além, da possibilidade de monitoramento de precipitação, evapotranspiração, umidade do solo e de índices de vegetação baseados em imagem (MEIJERINK et al., 2007).

Atualmente a integração de dados obtidos por métodos de campo e sensoriamento remoto representa uma estratégia eficaz para maximizar os pontos fortes de ambas as abordagens. Enquanto os dados coletados em poços fornecem informações detalhadas e precisas de um local específico, os dados de satélites, como os da missão GRACE, fornecem uma visão panorâmica sobre a variação dos recursos hídricos em escalas amplas. Essa combinação permite a análise multiescalar e a correção de possíveis discrepâncias entre os dados de campo e as estimativas de satélite (GÜNTER, 2008).

A integração desses métodos também facilita a validação de modelos de simulação hidrológica, que se beneficiam simultaneamente dos dados temporais detalhados de poços e da cobertura espacial dos satélites. Uma abordagem integrada, utilizando análises estatísticas e modelagem, permite compreender melhor as flutuações no armazenamento de águas subterrâneas e desenvolver planos de gestão mais robustos. Embora a integração entre dados de campo e de sensoriamento remoto seja uma tarefa complexa devido a diferenças de resolução espacial e temporal, ela tem se mostrado promissora na melhoria da precisão e na abrangência das análises hidrogeológicas (SCANLON et al., 2012).

2.2.1 Monitoramento de recursos hídricos subterrâneos por sensoriamento remoto

Com o avanço da tecnologia de sensoriamento remoto, métodos de monitoramento por satélite, como o uso da tecnologia GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), trouxeram novas possibilidades para a gestão das águas subterrâneas em larga escala. A missão GRACE, desenvolvida pela NASA, permite medir variações no campo gravitacional da Terra, que estão diretamente relacionadas a mudanças nas massas de água, incluindo águas subterrâneas. Esse tipo de monitoramento é capaz de detectar a variação na quantidade de água armazenada nos aquíferos com alta precisão, fornecendo uma visão ampla sobre a dinâmica hídrica em escalas regionais e globais (RODELL et al., 2009).

Os dados provenientes dos satélites GRACE e GRACE-FO, são produtos de uma parceria entre a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA) e o Centro Aeroespacial Alemão (DLR), tendo o objetivo de produzir medições das

mudanças do campo gravitacional terrestre, para investigar alterações nos reservatórios de água sobre a terra, os oceanos e o gelo.

Entre as principais vantagens do monitoramento por satélite estão a capacidade de capturar dados em áreas extensas e a possibilidade de realizar o monitoramento de regiões remotas e de difícil acesso, onde a instalação de poços é impraticável. Inicialmente a tecnologia GRACE apresentava significativas limitações, como a baixa resolução espacial e a incapacidade de distinguir entre diferentes fontes de água subterrânea e superficial dada a sua escala com o GRACE SH, o que dificulta a análise em áreas menores ou o monitoramento de aquíferos locais (TAPLEY et al., 2004).

Com os melhoramentos aplicados no conjunto de dados GRACE Tellus JPL RL06M versão 03 Mascon, este utiliza "mascons" (Mass Concentration blocks) como funções de base para estimar mudanças no campo gravitacional da Terra, diferente do método tradicional de harmônicos esféricos. O uso de mascons melhora a qualidade do sinal, reduzindo o ruído de forma mais eficaz por meio de restrições geofísicas durante o processamento, sem a necessidade de filtros empíricos posteriores, fazendo com que o modelo se torne mais robusto para análise espacial e temporal de dados de massa (WATKINS et al., 2015).

A correção Coastal Resolution Improvement (CRI), é uma solução desenvolvida pelo Jet Propulsion Laboratory (JPL) para analisar as variações da água terrestre, oceânica e glacial ao redor do mundo, esta é responsável por melhorar a precisão em áreas costeiras, onde a resolução das mudanças de massa era limitada devido ao efeito de vazamento de sinal (WIESE et al., 2016).

A metodologia aplicada em CRI, diferentemente do GRACE SH que utilizava interpolação gaussiana para os dados calculados em harmônicos esféricos, resultando em baixa resolução com significativo ruído, utiliza de grades fixas de interpolação para pequenas áreas, sendo quadrada para os cálculos próximos ao equador e hexagonal para interpolação de dados nos polos, com representações separadas para as áreas de grade que forem de transição entre as áreas de costa e oceânicas.

Os satélites GRACE e GRACE-FO fornecem dados de mudanças mensais na massa da superfície terrestre em seus componentes hidrológicos, criosféricos e oceanográficos, com suas devidas correções geofísicas aplicadas para as leituras dos

dados. Estes operam em pares, funcionando em uma órbita polar e medindo as variações de distâncias entre si, as quais são causadas diretamente por variações no campo gravitacional terrestre e refletem o deslocamento de grandes volumes de água (WIESE et al. 2018)

Os dados de saída são utilizados para estudar e monitorar as anomalias de armazenamento de água terrestre, incluindo a disponibilidade de águas subterrâneas, água do solo, neve, derretimento de calotas polares e o aumento do nível do mar. Seus dados de saída não possuem alta resolução espacial sendo representados em grades de longitude-latitude de 0,5° à 3° (WIESE et al., 2016), de acordo com os processamentos de cada variável analisada, no entanto, permitem análises com maior prazo uma vez que possuem um conjunto de dados de mais de 20 anos com as variações de massa de água.

Diversas são as maneiras na aplicação de análise de variação de águas subterrâneas, desde que com seu devido tratamento, para tal tanto os dados podem ser associados a outras bases para calcular o valor total de anomalia, quanto podem ser utilizados modelos prontos que estimem o valor desejado. Sendo uma estrutura de dados robusta, pode ser aplicada para análises como Scanlon et al. (2021) para estimar as mudanças no armazenamento de água em aquíferos, consideram efeitos de interferência do clima e de irrigação para criar ferramentas de gestão e tomada de decisão conforme as tendências de variação do volume de água.

Também pode ser aplicado a modelos de melhoramento de escala através de redes neurais artificiais, considerando relevo e demais aspectos hidrológicos a fim de melhorar sua precisão para estimar águas subterrâneas em alta resolução como em Ali, et al. (2021), ou para análises temporais de respostas de águas subterrâneas em períodos de seca ou cheia, considerando a comparação de mais de um modelo de dados provenientes do satélite GRACE para interpretar mudanças em tendências de longo prazo (SCANLON et al., 2021).

Um exemplo possível de modelo estruturado com base nos dados GRACE, é o GLDAS (Global Land Data Assimilation System) produzido pela NASA, integrando dados de observação, como os fornecidos pelos satélites GRACE, para simular processos hidrológicos terrestres. Os dados GRACE são usados para corrigir e calibrar o armazenamento total de água em escalas espaciais e temporais, melhorando a precisão na representação de mudanças de massa hídrica. O GLDAS

aplica essas informações junto com outros modelos atmosféricos para prever e avaliar diversas variáveis hidrológicas, em uma resolução espacial de 0.25° , possuindo modelos com estimativas, diárias, mensais e anuais em tempo quase real (NASA).

O modelo CLSM (Catchment Land Surface Model) referente ao conjunto de dados GLDAS, simula as mudanças no armazenamento de água subterrânea impulsionadas pelas interações terra-atmosfera, como precipitação e evapotranspiração, utilizando três variáveis principais para representar os excessos de umidade no solo tanto superficial, quanto da zona radicular e o déficit da bacia, que indica a quantidade de água necessária para saturar o perfil do solo. Embora o modelo CLSM simule variações sazonais de neve em três camadas, ele não modela diretamente as variações do lençol freático, portanto o armazenamento de água subterrânea é derivado com base no déficit da bacia e em outros parâmetros do modelo (LI et al., 2019).

Dentre as características positivas dos dados GLDAS é que se caracteriza por ser um sistema de modelagem terrestre global, offline (desacoplado à atmosfera) de alta resolução que incorpora observações terrestres e por satélite para produzir campos óticos de estados e fluxos da superfície terrestre em tempo quase real (RODELL, 2004). Sendo, deste modo, uma alternativa robusta e viável para análises de grandes áreas, considerando um satisfatório período de análise e tendo disponibilidade modelagem de dados desde 2003 até o presente momento.

Sua aplicação pode ser utilizada para análises de recarga de águas subterrâneas analisando tendências temporais de longo prazo em escala regional como em Wu et al. (2019), e para monitoramento de variação em aquíferos com aplicação de métodos de redução de escala para considerar tendências de armazenamento conforme as propriedades geológicas de armazenamento dos aquíferos, aplicado em Verma et al. (2020) de forma eficaz à contextualização de disponibilidade hídrica e consequentemente à tomada de decisão.

Em artigo recente Gentirana (2025) reforça a importância do cuidado na escolha dos dados para representação da variável de águas subterrâneas, com base em abordagens fisicamente consistentes, que integrem dados de assimilação GRACE com simulações de dinâmicas de águas e processos de fluxo de base, como a exemplo do conjunto GLDAS CLSM, pois o modelo residual de águas subterrâneas pode apresentar vieses que causem representação ruidosa das variações.

Uma opção possível é a associação de informações de poços com dados GRACE e GLDAS para validação das anomalias de recarga e comparação da variabilidade; trabalhos recentes que produziram esta associação, apesar de apresentarem diferenças na amplitude de variação dos dados considerando a baixa resolução espacial da fonte por sensoriamento remoto e a interferência comparando ambas as fontes, possuem correspondência na estimativa de variação ao longo do tempo representando igualmente a respostas no armazenamento (DÖLL et al., 2014; JOODAKI et al., 2014; HENRY et. al., 2011).

Devido a isto o conjunto de dados apesar de possuir erros associados ao modelo se apresenta como uma importante ferramenta para avaliação de impactos e disponibilidade, principalmente em áreas que não apresentem grande disponibilidade de dados de campo, pois servem como para aprofundar as informações disponíveis sobre águas subterrâneas e sua resposta ao sistema climático, quantificando o impacto de mudanças globais bem como sua severidade na frequência de secas e inundações. (TAPLEY et al. 2019; HENRY et al., 2011)

2.3 Análise Exploratória de Dados Espaciais e Temporais

Para analisar conjunto de dados tão abrangente espacial e temporalmente como os disponibilizados atualmente através de satélites a análise exploratória de dados (AED) é uma etapa essencial em estudos quantitativos, uma vez que esta metodologia implica na investigação, servindo como um passo inicial fundamental para a interpretação de dados, aplicando seu manuseio e observação com o auxílio de técnicas estatísticas para compreender as características gerais do conjunto de dados antes de aplicar métodos analíticos mais complexos (TUKEY, 1977).

De acordo com Longley et al. (2005), a AED desempenha a função de facilitar a descrição de dados através de sua exploração. Ao explorar dados espaciais, um processo denominado Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE), este destaca a importância de interação com a visualização dos dados para a detecção de relações espaciais e a avaliação de fenômenos de autocorrelação, ou seja, a influência que uma localidade exerce sobre suas vizinhas.

AAEDE faz uso de estatísticas descritivas e métodos gráficos para examinar a distribuição espacial dos dados e detectar estruturas como clusters e outliers espaciais. Essas técnicas incluem a visualização de histogramas espaciais, gráficos

de dispersão espacial e o cálculo do índice de Moran, uma medida estatística que quantifica a autocorrelação espacial, abordagens que possibilitam identificar se o padrão espacial é aleatório ou estruturado, permitindo a formulação de hipóteses sobre os processos que geram essas distribuições geográficas (ANSELIN, 2005).

Em proposta de aprofundar elementos de análise de dados podemos considerar a análise exploratória de dados espaciais e temporais (AEDET) a qual considera as dinâmicas temporais dos fenômenos espaciais em estudo, utilizando de métodos de visualização e modelagem que permitem examinar a evolução de padrões espaciais ao longo do tempo.

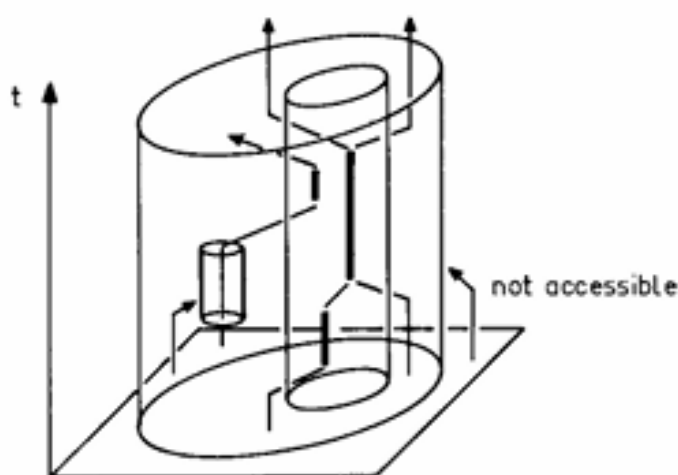
Para a AEDET são empregados métodos de AED e AEDE ampliados para contextos de análise espaço-temporais como o método Markov, ou cadeias de Markov, que considera autocorrelação espacial de um ponto através do tempo e que pode ser acrescido do componente espacial através da aplicação do conceito de cadeia espacial, ou também o método de dinâmica de classificação espacial, que utiliza de diferentes métodos de correlação bivariada para explorar os dados, onde é observada a concordância espacial de relação entre pares que são entre si vizinhos geográficos, e com base nessa concordância ou discordância de dependência espacial observa-se a concordância de classificação temporal (REY, 2021).

A utilização de técnicas de AEDET com métodos de detecção de clusters, correlação espacial e temporal, e o uso do cubo espaço-temporal permite uma análise aprofundada de fenômenos que variam no espaço e no tempo, fornecendo base para a construção de modelagens preditivas com estratégias de planejamento em diversas áreas de estudo, como saúde, planejamento urbano e principalmente como ferramenta do monitoramento ambiental e hidrológico, seja para análises de mudanças de uso do solo ou, considerando a influência de fenômenos atmosféricos e hidrometeorológicos na dinâmica das águas.

Quando empregada a metodologia atende a demandas sociais de interpretação de fenômenos variados como a utilizada em estudos recentes em contexto de avaliação da distribuição espacial e temporal da emissão de carbono, concentração de casos de incidência da dengue ou mesmo a análise ocorrência de crimes, podendo ser observados em diferentes escalas espaciais e temporais para auxílio da identificação de padrões (LIU et al., 2023; SINGH, 2023; CHENG e WILLIAMS, 2012)

Hagerstrand (1970) realizou um dos primeiros trabalhos utilizando representações tridimensionais quando construiu um diagrama espaço-temporal para análise de padrões de comportamento social, considerando espaço e tempo através de elementos gráficos para representação de ações de um indivíduo, simulação que possibilita identificar, entre essas ações onde existe um grupo de padrões, permitindo visualizar quais os domínios entre esses padrões e onde eles se localizam entre o recorte espaço-temporal analisados.

Figura 2. Hierarquia de Domínios



Fonte: (HAGERSTRAND, 1970)

A hierarquia entre estes domínios é estabelecida através de restrições (Figura 2), determinadas por meio de capacidade, acoplamento ou autoridade, as quais servem para agrupar características espaciais e temporais reduzindo a variedade de situações em um número tratável, estes domínios podem ser melhor estabelecidos utilizando ferramentas matemáticas que promovam mais densa análise desses padrões.

A detecção de tendências e padrões em dados espaciais e espaço-temporais é um aspecto importante da análise exploratória de dados, pois influencia diretamente na interpretação dos fenômenos; tendências representam variações sistemáticas nos dados, as quais podem ser capturadas por métodos estatísticos e visualizações, ajudando a compreender a direção e intensidade de mudanças em uma determinada variável ao longo do espaço e/ou tempo (LONGLEY et al., 2005).

A detecção de clusters, ou padrões de agrupamento, por sua vez, envolve a identificação de áreas onde valores semelhantes de uma variável estão espacialmente próximos. Esses clusters podem indicar, por exemplo, concentrações de determinada condição (ANSELIN, 1995).

A correlação espacial, expressa por meio de medidas como o índice de Moran e a Estatística de Geary, permite avaliar o grau de similaridade entre valores de uma variável em pontos geograficamente próximos (ANSELIN, 1994). Quando os dados apresentam uma forte autocorrelação espacial, isso indica que pontos próximos tendem a ter valores semelhantes, sugerindo que fatores locais podem estar influenciando o fenômeno em análise.

Em contrapartida, a correlação temporal estuda a dependência dos dados ao longo do tempo em um mesmo local, sendo relevante em análises espaço-temporais, pois ao investigar a correlação espaço-temporal, é possível captar interações complexas, como mudanças nas condições ambientais ou fluxos migratórios, ao longo do espaço e do tempo (ANSELIN, 2000).

Para uma representação de análise de dados espaço-temporal mais fácil pode-se criar um display de representação gráfica que mostre as movimentações de dados espaciais através do tempo, considerando duas dimensões geográficas e uma temporal simultaneamente, a técnica chamada de cubo de espaço-tempo, é considerada um avanço quando comparada a sobrecarga visual de dados que uma animação de camadas temporais pode oferecer (MACIEJEWSKI, 2021)

Técnicas de visualização associadas ao cubo espaço-temporal, como mapas de calor e séries temporais acumulativas, permitem o registro da progressão temporal de fenômenos espaciais e os padrões de agrupamento ao longo de períodos definidos, revelando tendências e correlações que seriam difíceis de detectar em análises puramente espaciais ou temporais.

Diversas são atualmente as ferramentas para modelagem de AEDET em servidores de informação geográfica desde o GeoDa (ANSELIN et al., 2002), ambientes como R, ou de desenvolvimento python contando com bibliotecas como PySAL com funções de análise e manuseio de dados que oferecem modelagem AEDE (ANSELIN, REY, 2014), e software SIG como os da ESRI e o QGIS, com opções de suporte em diversas plataformas tornando sua aplicação mais acessível (SEE, 2021)

2.4 Gestão de águas subterrâneas

A eficaz gestão de águas subterrâneas compete diretamente a administração dos recursos hídricos, especialmente em um contexto de crescente demanda por água potável e impacto das mudanças climáticas sobre os recursos superficiais.

O uso sustentável das águas subterrâneas envolve uma série de estratégias que visam garantir que esses recursos sejam utilizados de maneira equilibrada, permitindo a sua renovação e disponibilidade para as gerações futuras. A sustentabilidade no uso das águas subterrâneas depende de práticas de conservação que minimizem a extração excessiva e evitem a contaminação dos aquíferos, adotando práticas como a implementação de técnicas de recarga artificial e a proteção das áreas de recarga natural contra atividades poluidoras e uso inadequado do solo (CUSTODIO, 2002).

O Estado de São Paulo foi um dos primeiros a estabelecer legislações específicas para águas subterrâneas (FERNANDES et al., 2023); quando na Lei n.º 6.134/1988 estabeleceu a preservação e conservação das águas, regulamentando condições de consumo, poluição e perfuração de poços, a qual foi posteriormente regulamentada pelo Decreto n.º 32.955/1991, que estruturou condições de preservação, fiscalização e gerenciamento, e foi importante para garantir posteriores decretos direcionados aos cuidados deste recurso.

A legislação nacional desempenha um papel fundamental na regulação da exploração e preservação das águas subterrâneas. No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei n.º 9.433/97) estabelece diretrizes para o uso sustentável das águas, abrangendo tanto os recursos superficiais quanto subterrâneos. Esta lei reconhece a água como um bem público e visa garantir o uso múltiplo e racional dos recursos hídricos, introduzindo o conceito de instrumentos de gestão. Além disso, a Resolução CONAMA n.º 396/08 estabelece os padrões de qualidade para águas subterrâneas, promovendo a proteção contra contaminação por resíduos industriais, agroquímicos e efluentes urbanos, que representam ameaças graves à qualidade da água (ANA, 2019).

Como importantes ferramentas de gestão podemos citar, o Plano de Recursos Hídricos, que orienta as ações de gestão em uma bacia hidrográfica; o enquadramento dos corpos d'água em classes de uso preponderante; a outorga de direito de uso da água para controlar a extração e preservar os mananciais; a

cobrança pelo uso dos recursos hídricos; o sistema de informações sobre recursos hídricos; e a compensação a municípios. A aplicação integrada desses instrumentos permite a tomada de decisões baseada em dados técnicos e participativos, promovendo a governança e a gestão democrática da água (BRASIL. 1997)

O planejamento é um elemento estratégico na gestão das águas subterrâneas e abrange tanto a avaliação da capacidade de recarga dos aquíferos quanto o monitoramento da qualidade e quantidade de água extraída. Um planejamento eficiente inclui o estabelecimento de zonas de proteção, a delimitação de áreas de recarga e a elaboração de planos de manejo baseados em estudos hidrogeológicos e é aplicado através de um planejamento integrado, onde a gestão das águas subterrâneas e superficiais ocorre de forma conjunta, para evitar o esgotamento dos recursos e garantir o abastecimento contínuo para as populações e atividades econômicas (CONICELLI et al., 2017).

O consumo consciente das águas subterrâneas é outro pilar da gestão sustentável, práticas como o uso eficiente da água em atividades agrícolas e industriais, a redução de perdas na distribuição urbana e a conscientização da população sobre a importância das águas subterrâneas são ações fundamentais. A agricultura, por exemplo, representa uma das principais demandas por águas subterrâneas no Brasil, o que torna essencial a preocupação com a redução do desperdício e a diminuição da pressão sobre os aquíferos. Além disso, programas de educação ambiental desempenham um papel relevante na conscientização da sociedade para a necessidade de conservação do recurso.

A gestão sustentável das águas subterrâneas requer um equilíbrio entre o consumo e a capacidade de renovação dos aquíferos, integrando ações de conservação, planejamento estratégico e regulamentação rigorosa. Esse conjunto de medidas é indispensável para assegurar que as águas subterrâneas continuem a ser uma fonte segura e disponível para suprir as necessidades humanas e ecológicas, preservando o equilíbrio ambiental e promovendo a resiliência hídrica das comunidades.

Como parâmetro de gestão adequada, podemos utilizar os indicadores referentes aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), bons parâmetros para permear pesquisas e direcionar políticas de gestão conscientes. No caso das águas subterrâneas, deve-se considerar os Objetivos 6 - Água Potável e Saneamento,

que visa garantir disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos e 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima, a qual procura adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos (ONU BRASIL, 2022).

Ambos os indicadores ainda são desafios para a gestão e política climática brasileira, por isso a importância de dados regionalizados para planejamento adequados em escalas representativas para a produção de políticas estratégicas frente as mudanças climáticas, atualmente os ODS já foram incorporados as políticas públicas, mas sua implementação ainda depende de uma governança integrada, do estabelecimento de metas e do fortalecimento de mecanismos de controle ambiental (JUNIOR et al., 2025)

Para a gestão de aquíferos, a legislação nacional limita a autonomia os Estados na regulamentação de estratégias considerando as necessidades locais, contexto no qual se reforça a importância da instrumentalização da tecnologia e da ciência nos debates sobre administração pública ambiental frente a leis e políticas espacialmente segregadas pela gestão e a pressão capitalista pelo consumo de recursos, para que estes estudos foquem em evidências fragilidades e possam ser determinadas políticas hídricas considerando este controle social do recurso. (CARDOSO e MARTINS, 2025; VILLAR e HIRATA, 2022)

Para um adequado mapeamento do comportamento hídrico subterrâneo, de modo que este possa atender a um consumo seguro e planejado, é necessário que este seja acompanhado de uma análise que compreenda um monitoramento contínuo integrado a interpretação de interferências hidrometeorológicas sobre recarga, uma vez que o controle quantitativo de recursos hídricos permanece assegurado como parte dos instrumentos de gestão das águas para assegurar a disponibilidade hídrica e o direito de acesso à água.

Segundo o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2001), a gestão descentralizada e integrada demanda informações técnico-científicas robustas, sendo a avaliação de reservas subterrâneas essencial para garantir o uso sustentável, a segurança hídrica e a resiliência dos sistemas socioecológicos frente às variações climáticas.

A gestão de águas subterrâneas depende de uma abordagem que integre diferentes estudos, como precipitação e uso do solo, onde o sensoriamento remoto

pode servir como ferramenta de planejamento e monitoramento para uso sustentável, oferecendo dados que possibilitem o levantamento de informações essenciais sobre a região de análise (MEIJERINK et al., 2007)

Ao revelar tendências temporais e padrões espaciais de disponibilidade hídrica subterrânea, esse tipo de análise possibilita a identificação de áreas críticas de depleção e de recarga, favorecendo a tomada de decisão quanto à alocação de outorgas, à prevenção de conflitos pelo uso da água e à implementação de estratégias de conservação, além disso, o monitoramento sistemático contribui para integrar as águas subterrâneas ao planejamento de recursos hídricos de forma mais abrangente, considerando a interdependência entre os compartimentos superficiais e subterrâneos.

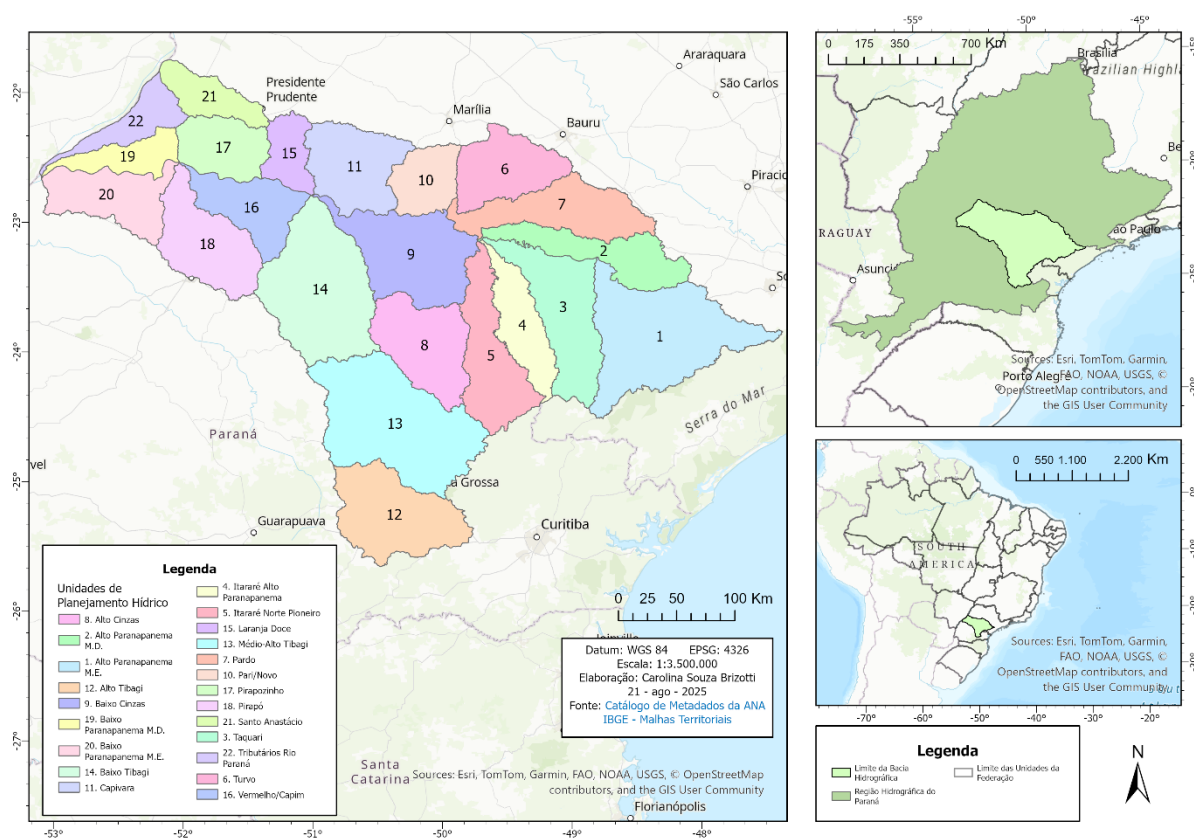
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

Localizada entre os Estados de São Paulo e Paraná, a bacia hidrográfica do Rio Paranapanema possui área de 106,5 mil km², o equivalente a 11,6% da região hidrográfica do Paraná, onde está situada. Esta bacia drena áreas de 247 municípios e concentra em seu território quase 2% do PIB nacional, sendo, deste modo, uma importante bacia para análise e tomada de decisão ambiental, tanto por sua extensão territorial, quanto por sua influência socioeconômica (PIRH Paranapanema, 2016).

Dada a sua vasta extensão territorial, a bacia (Figura 3) tem sua gestão dividida entre 6 Unidades de Gerenciamento Hídrico (UGH) estaduais e 22 Unidades de Planejamento Hídrico (UPH), e necessita de uma grande integração entre elas para produzir uma gestão adequada das águas devido às diferentes características físicas que apresenta.

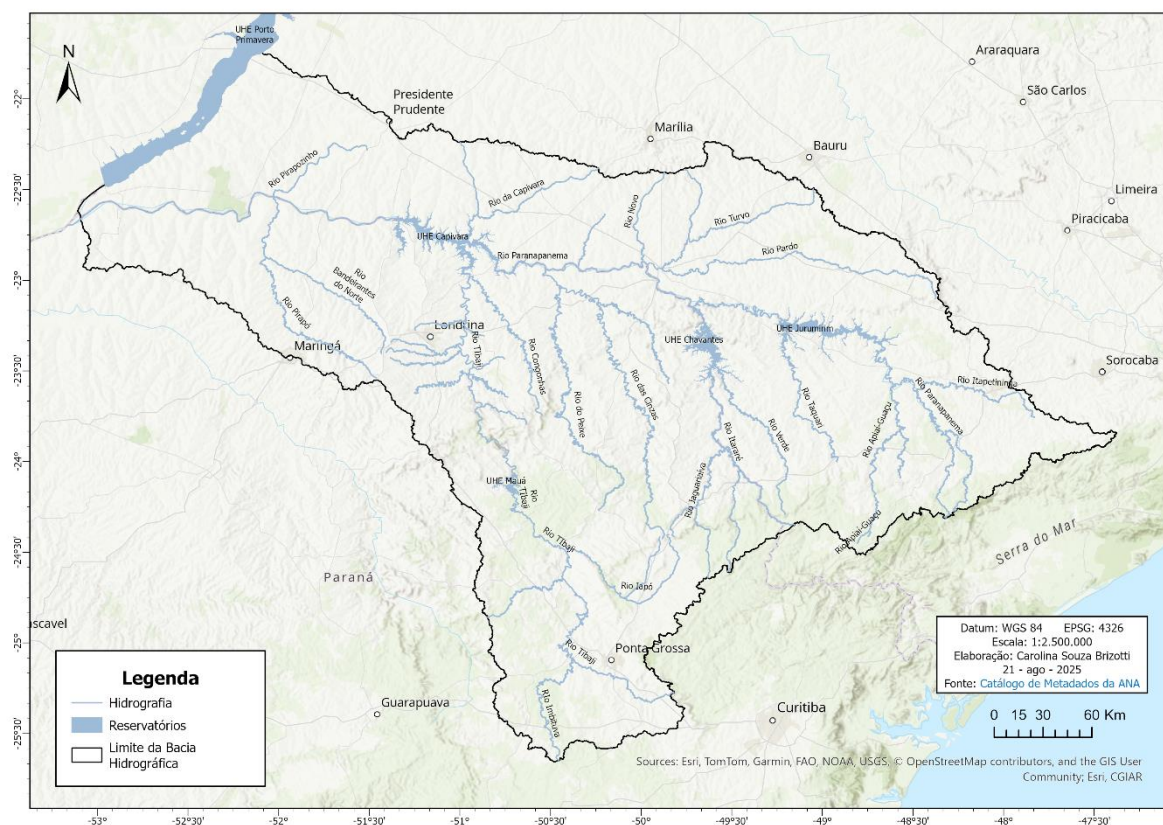
Figura 3. Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema



Sendo as UGH, o Alto Paranapanema, correspondente as UPHs: Alto Paranapanema M.D., Alto Paranapanema M.E., Itararé Alto Paranapanema e Taquari, Médio Paranapanema, compreendendo a região das unidades Capivara, Pardo, Pari/Novo e Turvo, o Pontal do Paranapanema com Baixo Paranapanema M.D., Laranja Doce, Pirapozinho, Santo Anastácio e Tributários Rio Paraná, a unidade Norte Pioneiro, compreendendo a região das unidades Alto Cinzas, Baixo Cinzas e Itararé Norte Pioneiro, o Tibagi, com as UPHs Alto Tibagi, Baixo Tibagi e Médio-Alto Tibagi e por fim, a unidade de gerenciamento Piraponeza com os Baixo Paranapanema M.E., Pirapó e Vermelho/Capim.

O rio Paranapanema percorre uma extensão de 930 km constituindo o eixo central da bacia (Figura 4) e representando a divisa entre os estados de São Paulo e Paraná, com sua nascente na Serra de Agudos Grandes no Planalto Atlântico e sua foz no Rio Paraná na divisa entre os estados São Paulo, Paraná e Mato Grosso do Sul.

Figura 4. Mapa Hidrográfico da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema.



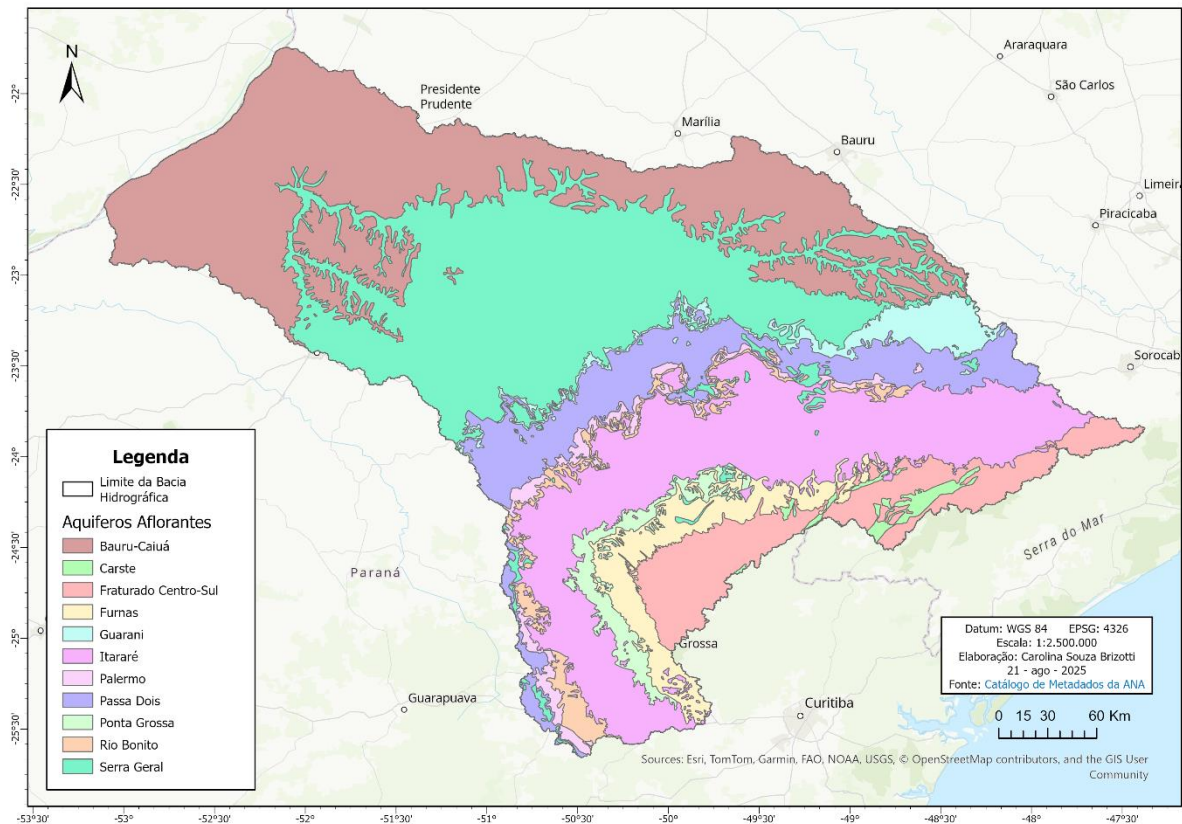
O corpo hídrico recebe contribuições de afluentes como Tibagi, Cinzas, Pirapó e Itararé, pela margem paranaense, e os rios Pardo, Turvo, pela margem paulista. A bacia possui cerca de 11 usinas hidrelétricas instaladas, distribuídas por sua área; dentre seus reservatórios podemos citar o Capivara, Chavantes e Jurumirim, fundamentais para geração de energia na bacia.

No que compete às suas características físicas, a BHRP está localizada no Cinturão Orogênico do Atlântico, na unidade morfoescultural do Planalto Atlântico e sendo parte da província geológica da Bacia Geológica do Paraná tem como principais sistemas aquíferos Guarani, Formação Serra Geral e o Grupo Bauru (REBOUÇAS, 2006).

Estas áreas de sedimentação são importantes fontes de águas subterrâneas, sendo o aquífero Serra Geral composta por derrames basálticos fraturados, o sistema aquífero Bauru, superior, composto pelas rochas sedimentares das formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília e aquífero Guarani, composto pelas formações Botucatu e Piramboia formado por arenito e estando predominantemente confinado (MANZIONE, BRIZOTTI, 2025).

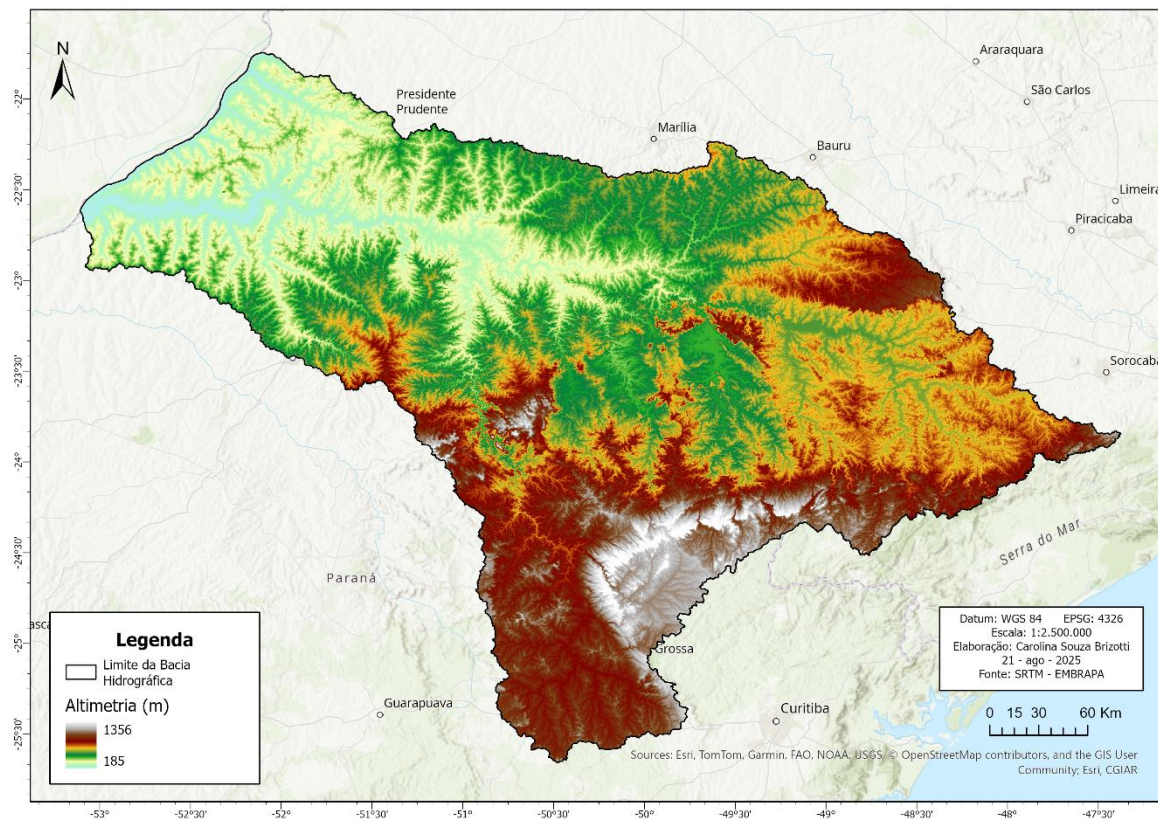
Suas formações hidrogeológicas (Figura 5) são os aquíferos Bauru-Caiuá, Guarani, Furnas, Itararé, Palermo, Passa Dois - com as formações Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto - Ponta Grossa e Rio Bonito no domínio poroso constituídos por rochas sedimentares, Fraturado Centro-Sul e Serra Geral do fraturado constituído por rochas vulcânicas e o Carste. Destes são considerados aquíferos livres Bauru-Caiuá, Guarani (nas áreas de afloramento), Furnas, Rio Bonito e Serra Geral, sendo os demais média a baixa permeabilidade.

Figura 5. Mapa da Hidrogeológico da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema.



A bacia apresenta variações de altitude entre 1.356 e 185 metros, sendo a porção com maiores altitudes a correspondente a região de sua nascente e de toda a porção leste da bacia, compreendendo o terreno cristalino da Província da Mantiqueira e as menores altitudes compreendendo desde a porção central da bacia e diminuindo gradualmente até sua foz (Figura 6). Sendo composta, predominantemente, por planaltos, a bacia não possui alto percentual de declividade, apresentado declividade de 0 a 10% para a maior parte de seu território, com percentuais mais altos próximos a 20% apenas nas unidades Tibagi, Norte Pioneiro e Alto Paranapanema (ANA, 2014).

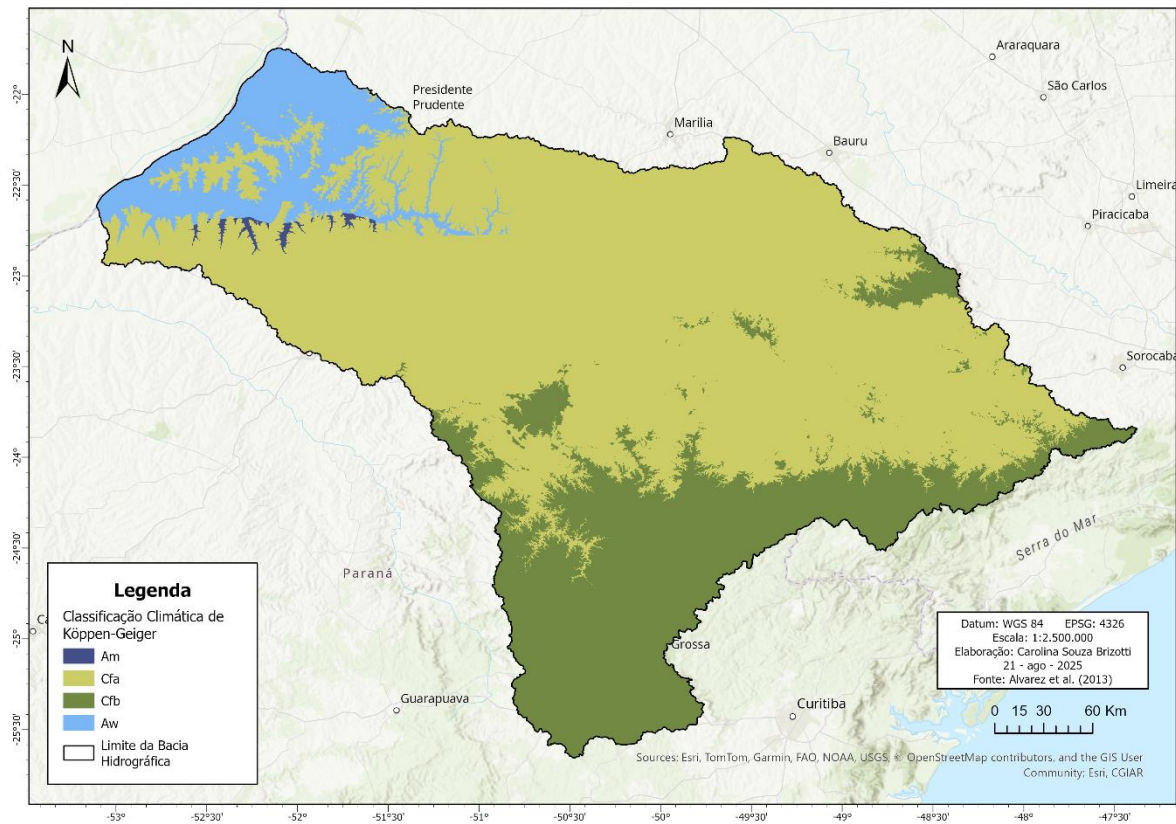
Figura 6. Mapa da Altimétrico da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema.



Sua temperatura média aproximada é inferior a 18 °C na região centro-sul e superior a 21 °C nas regiões norte e nordeste (PIRH Paranapanema, 2016) e precipitação média corresponde a 1.450 mm com variação espacial semelhante chegando até 1.800 mm no centro-sul e próximo a 1.300 mm nas regiões norte e nordeste (ANA, 2014).

De acordo com a classificação Köppen-Geiger (Figura 7) a região abrange 4 tipos climáticos distintos, sendo eles Am - clima de monção marcado por temperaturas elevadas ao longo do ano e períodos sazonais de chuva intensa, Cfa - clima temperado subtropical úmido com verões quentes e invernos amenos com chuvas distribuídas ao longo do ano, Cfb - clima temperado oceânico característico por apresentar temperaturas moderadas ao longo do ano e precipitação uniforme e Aw - clima tropical com marcadas estações de seca no inverno e chuvas no verão, apresentando temperatura elevada durante todo o ano, com a predominância do clima subtropical representando 91,42% da área total da BHPP e o tropical correspondendo a apenas 8,58% da bacia (MANZIONE, 2024; ALVAREZ et al., 2013).

Figura 7. Mapa da Climático da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema.



A bacia compreende em sua extensão os biomas Cerrado e Mata Atlântica, sendo 24% do primeiro e 76% do segundo. O cerrado possui predominância de espécies arbóreas com formações florestais que podem variar de forma descontínua de acordo com suas fisionomias, entre formações florestais, savânicas e campestres. Sua vegetação tem por característica fenologia sazonal, sofrendo interferência dos períodos de chuvas e secas. A mata atlântica, por sua vez, apresenta grande diversidade de fitofisionomias, sendo composta por florestas ombrófilas e estacionais, apesar de ser o bioma brasileiro com menor porcentagem de cobertura vegetal, este apresenta grande importância na regulação de mananciais hídricos (IBAMA/MMA, 2012).

Segundo dados do Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite - PMDBBS (IBAMA/MMA, 2012) a vegetação remanescente do bioma cerrado corresponde a 51,56% e de 22,25% para mata atlântica para o ano final do estudo em 2008 considerando toda a extensão territorial do bioma. Sendo correspondentes remanescentes da área total da BHPP apenas 9% do primeiro e 12% do segundo (ANA, 2014).

De acordo com dados anuais do MapBiomas - Coleção 10 (SOUZA et al., 2020), com resolução de 30 metros, para os anos de 2003 e 2024 (Figuras 8 e 9), podemos observar que o uso da terra na bacia durante todo o período é voltado à atividade agropecuária, sendo correspondente a aproximadamente 50% da área da bacia, sendo a maior alteração entre classes de uso (Tabela 1) a diminuição das áreas destinadas à pastagem em detrimento do aumento das áreas de cultivo com o aumento das classes de agricultura, mosaico de usos e plantações florestais.

Como podemos observar em Manzione (2024) o uso da região permanece estável desde 1990, com pequenas alterações ocorrendo em intervalos de 5 anos, sendo o desmatamento na região anterior ao período analisado entre 1990 e 2020, observa-se ainda a expansão do agronegócio na região através do crescimento de culturas temporárias por seu retorno rápido e menor risco às condições climáticas.

Tabela 1. Área total e porcentagem de usos.

Classes de Uso (Nível 2)	Área [km²]		DIF.		%
	2003	2024	2003	2024	
Formação Florestal	18686,36	19822,74	16,01	16,98	0,97
Formação Savânica	85,51	109,46	0,07	0,09	0,02
Silvicultura	7016,47	11147,85	6,01	9,55	3,54
Campo Alagado	1603,39	1480,32	1,37	1,27	-0,11
Formação Campestre	605,90	427,70	0,52	0,37	-0,15
Pastagem	39114,78	16570,91	33,51	14,20	-19,31
Agricultura	31111,06	42052,44	26,65	36,02	9,37
Mosaico de Usos	14737,86	20748,48	12,63	17,77	5,15
Área Urbanizada	1092,73	1654,94	0,94	1,42	0,48
Outras Áreas não Vegetadas	101,68	160,86	0,09	0,14	0,05
Afloramento Rochoso	39,14	38,99	0,03	0,03	0,00
Mineração	5,99	10,16	0,01	0,01	0,00
Aquicultura	0,30	1,07	0,00	0,00	0,00
Rio, Lago e Oceano	2530,22	2505,19	2,17	2,15	-0,02

Figura 8. Uso e cobertura da terra na BHRP no ano de 2003.

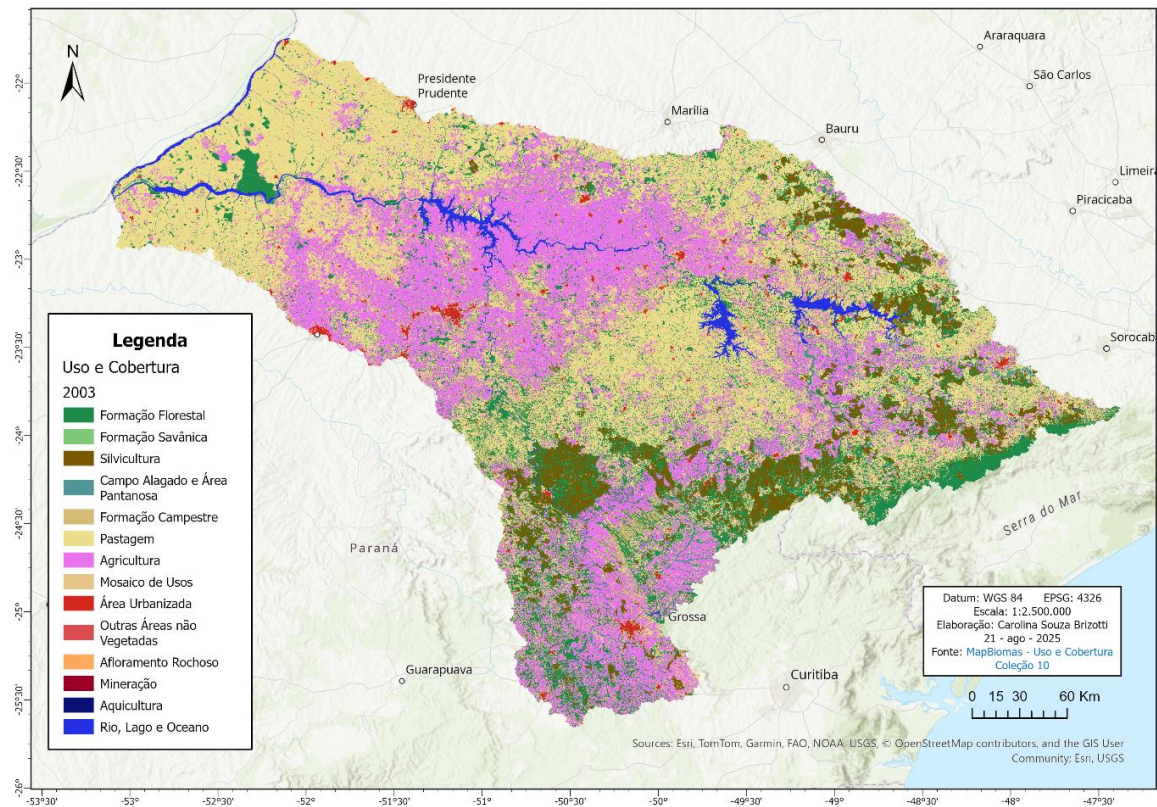
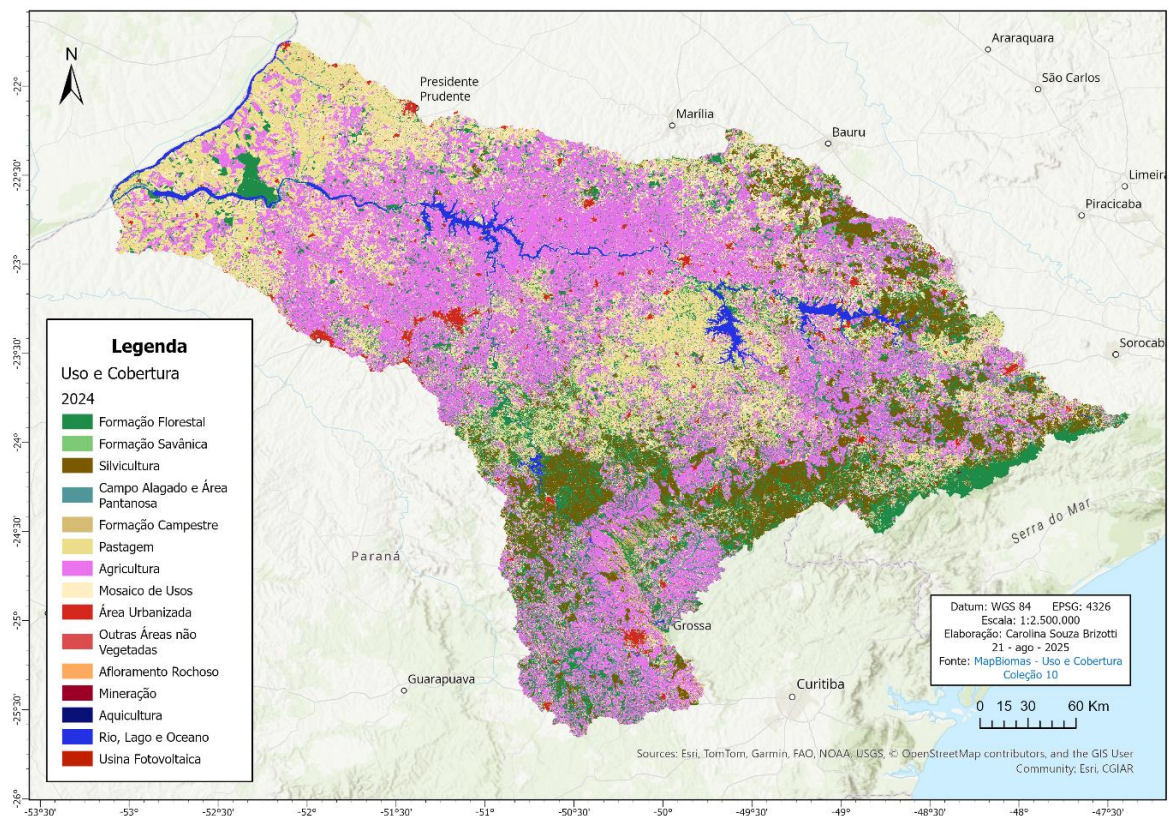


Figura 9. Uso e cobertura da terra na BHRP no ano de 2024.



No que compete às águas subterrâneas, seu consumo exclusivo se dá em 57,4% dos municípios na bacia, enquanto 21,1% utilizam fontes mistas de abastecimento e 21,4% apenas abastecimento superficial, atendendo principalmente ao abastecimento humano com aproximadamente 27 mil m³/h e tendo como consumos predominantes o abastecimento de indústrias com 13,4 mil m³/h e a irrigação com 6,5 mil m³/h, com a forte presença de culturas irrigadas nas UPH's localizadas no Estado de São Paulo (ANA, 2014).

Ainda segundo o diagnóstico da ANA (2014) para águas subterrâneas na unidade de gerenciamento, esta possui predominância de poços nas áreas que correspondem aos afloramentos dos aquíferos Serra Geral e Bauru-Caiuá, tendo predominância de poços no estado do Paraná, com aproximadamente 66% do total de poços enquanto São Paulo detém cerca de 34% dos poços na bacia.

3.2 Coleta e processamento dos dados

Para a análise desenvolvida neste trabalho, foram utilizados, de armazenamento de águas subterrâneas provenientes do GLDAS v2.2 com valores de média com dois diferentes intervalos, sendo o primeiro anual referente a série histórica de 2003 a 2024 com correspondência a períodos de 12 meses, considerando janeiro a dezembro e o segundo de média semestral para a série histórica de 2003 a 2025, considerando os períodos de referência para o primeiro semestre sendo de maio a outubro e para o segundo semestre de novembro a abril, afim de analisar possíveis alterações com relação a tendências sazonais e alterações climáticas referentes às estações extremas.

Os dados extraídos em formato raster contém a estimativa do valor de água subterrânea armazenada abaixo da camada do solo da zona radicular e acima do substrato rochoso, retornando este valor em milímetros, a partir dos valores de anomalia de águas subterrâneas, com valores de recarga no armazenamento hídrico, sendo este um valor residual do total de água terrestre associados a demais modelos hidrológicos e meteorológicos de mesma fonte, sendo obtidos decompondo os valores de Armazenamento Total de Água Terrestre (TWS) provenientes das missões GRACE e GRACE-FO através do cálculo da diferença entre as variáveis simuladas (Equação 1).

$$GWS = TWS - SM - SWE - CI \quad (1)$$

onde:

GWS - Armazenamento de Águas Subterrâneas;

TWS - Armazenamento Total de Água Terrestre;

SM - Umidade do Solo (zona radicular);

SWE - Equivalente de Água em Neve; e

CI - Interceptação pelo Dossel.

Para produzir a devida organização dos dados de modo que fosse possível o seu processamento dentro dos padrões do ambiente SIG utilizado, o pré-processamento dos dados se deu através de seu tratamento através do ambiente de notebook interativo Google Colaboratory (GOOGLE, 2025), sendo uma plataforma gratuita de computação em nuvem que hospeda o projeto de código aberto Jupyter para execução de código.

Nele foram inseridas as bibliotecas Pandas a qual permite limpar, agregar e processar dados, NumPy (HARRIS et al., 2020), para a realização de operações matemáticas em arrays multidimensionais, e Rasterio, responsável pela manipulação de conjuntos de dados raster em grade; também foram utilizadas as bibliotecas Geopandas (WASSERMAN et al., 2025), para manipulação de dados tabulares e geometrias e Shapely (GILLIES et al., 2007) para manipulação de objetos geométricos, estas últimas para aplicação de filtros em tabelas e visualização do conjunto de dados.

Com o auxílio destas bibliotecas os dados foram transformados de raster para ponto, considerando o centro de cada pixel como a referência de coordenadas (x,y), aplicando sobre os arquivos raster uma função de expressão regular (re) capaz de localizar uma sequência de caracteres alfanuméricos (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, [s.d.]), a fim de extrair dos títulos de cada raster a informação de data para que se estabeleça a autenticação de data e hora necessária e haja a leitura correta do campo que identifique a dimensão z da estrutura tridimensional; e por fim estabelecidos os parâmetros para que a saída do processamento fosse uma tabela em formato longo ("empilhado"), a qual cria colunas de correspondência para cada ponto em sequência de ordem temporal (Apêndice A).

Como os arquivos obtidos não foram os de seu formato bruto diário em formato netCDF, devido ao volume do conjunto de dados e sua dificuldade de processamento, mas sim do repositório [Giovanni](#) (NASA, 2025), aplicação web que facilita visualização e aplicação de filtros para extração dos dados, estes foram obtidos em formato TIFF já com os valores de média para os períodos selecionados, e por padrão perdem a informação individual de data e hora característica dos metadados de netCDF, sendo exportados com suas coordenadas e o valor de média calculados para o período selecionado.

Desse modo, é preciso reestabelecer uma assinatura de data e hora para a interpretação correta das informações temporais, considerando a data de início ou fim do período de média calculado e um horário fixo comum entre os pontos para que haja um intervalo equidistante entre as séries.

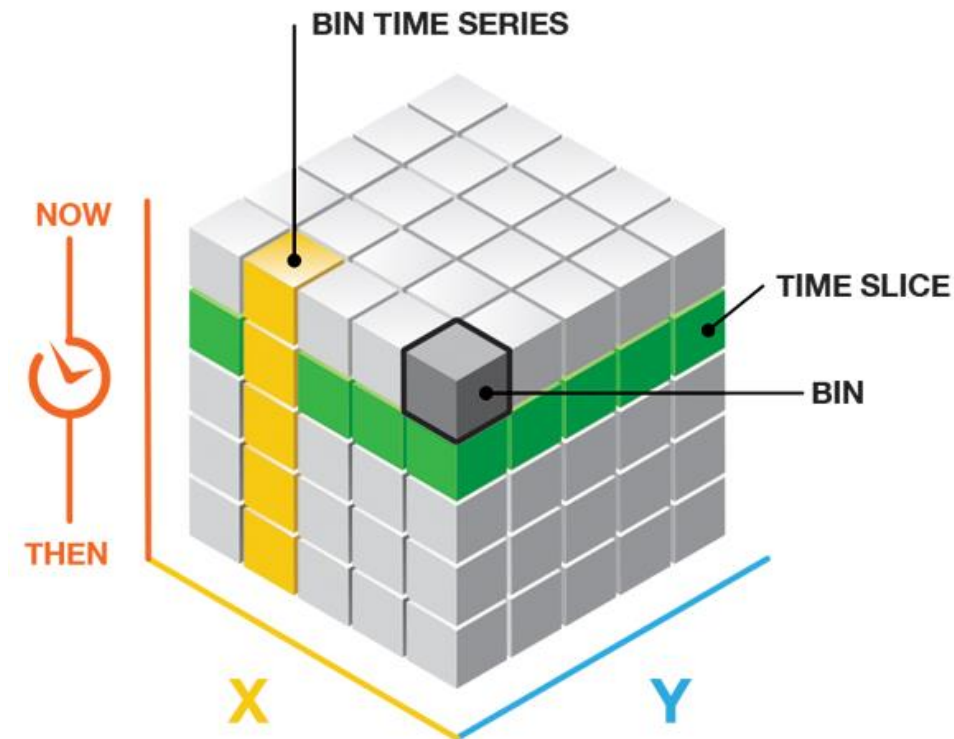
Para comparação e referência, também foram utilizados dados de precipitação obtidos através do algoritmo de estimativas de precipitação Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) da missão internacional de Medição Global de Precipitação (GPM) composta por uma constelação de satélites que estima valores de chuva e neve (Huffman et al., 2023).

3.3 Análise dos dados

Os dados GLDAS com valor de águas subterrâneas em mm, foram então processados através do modelo de cubo espaço-temporal, este trata de uma representação das propriedades do espaço e do tempo em 3 dimensões (Figura 10) nas quais os eixos x e y correspondem às variações geográficas no espaço (latitude e longitude), enquanto o eixo z é representado considerando o tempo como uma variável;

“A space-time cube operation takes a space-time object and produces another space-time object. A space-time object is a geometrical object within a space-time coordinate system (i.e. two spatial dimensions and one temporal dimension).” Bach, 2014.

Figura 10. Estrutura de representação de um cubo espaço-temporal



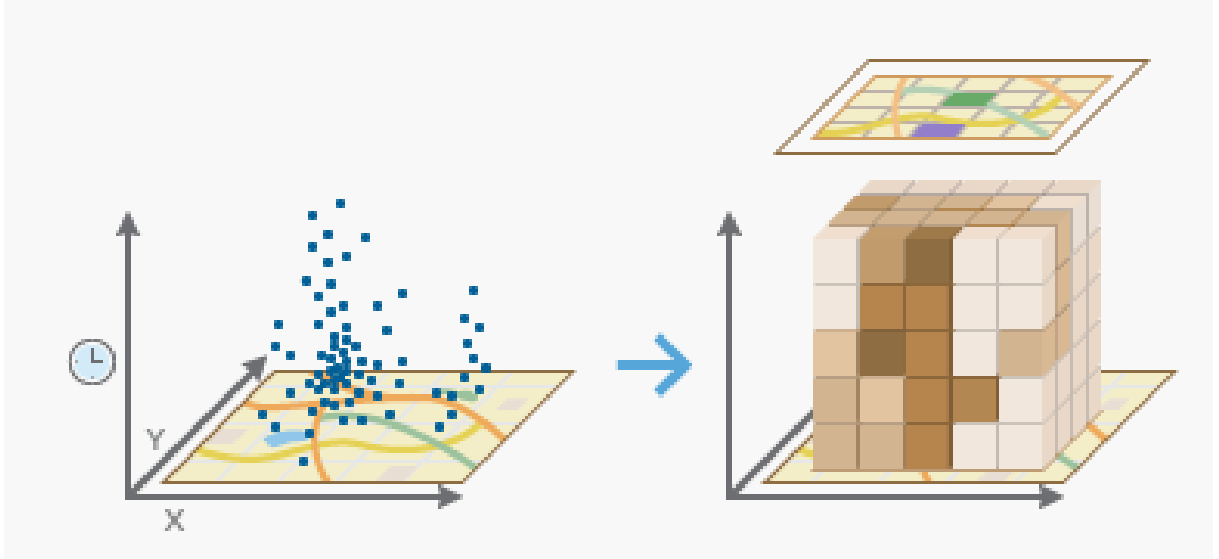
Fonte: (ESRI, 2025).

O cubo foi criado por agregação de pontos, neste contexto, os dados GLDAS de saída foram processados individualmente para cada conjunto de dados através do software ArcGIS Pro, cortados pela área de interesse e reprojetados para um sistema de coordenadas projetadas conforme solicitação metodológica do procedimento, e associados pela correlação espacial dos pontos.

Quando inseridos no ArcGIS Pro versão 3.5.3, a criação do cubo espaço-temporal se dá pela agregação dos pontos de próxima coordenada dentro de uma região geográfica que pode ser representada através de média e soma, entre demais variáveis estatísticas, para o que melhor representar o agrupamento de dados (Figura 11). Dada a amplitude dos dados e a distância média entre os pontos, foi estabelecida uma distância média de interpolação de 30 km.

A partir deste modelo tridimensional criado serão feitas as análises dos dados de saída através do conjunto de ferramentas de “Space Time Pattern Mining”, para detecção de tendências no contínuo da série histórica, verificação da presença de agrupamentos espaciais e tendências temporais para cada local utilizando as estatísticas espaciais locais de Getis-ord e o teste de tendência de Mann-Kendall.

Figura 11. Cubo espaço-temporal por agregação de pontos



Fonte: (ESRI, 2025).

O teste de tendência de Mann-Kendall é um método não-paramétrico amplamente utilizado para identificar tendências em séries temporais de dados, seu cálculo envolve a comparação de cada dois conjuntos de observações de dados e verifica se os valores subsequentes são maiores ou menores do que os anteriores (KENDALL, 1990), o teste pode ser usado para determinar se uma tendência é significativamente crescente ou decrescente ao longo do tempo se os valores de uma variável Y podem ser substituídos por uma sequência temporal simples (1, 2, ..., n) (MANN, 1945).

A estatística S pode ser definida como a soma das diferenças para cada par de dados:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

Onde:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1, & \text{se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

A variância de S é calculada para determinar a significância da tendência:

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (4)$$

Onde; t_p é o número de empates para o valor p .

E o padrão normal de variáveis Z é então calculado, a fim de fornecer uma prova assintótica da estatística S (HAMED, 1998):

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Por sua vez a estatística local de Getis-Ord G_i^* é usada para detectar clusters espaciais de valores altos ou baixos em um conjunto de dados geoespaciais, identificando pontos quentes e frios (hotspots e coldspots) ao medir a intensidade de uma variável em um local em comparação com seus vizinhos próximos (ORD, 1995).

A estatística G_i^* é dada por:

$$G_i^* = \frac{\sum_j w_{ij}x_j - \bar{X}\sum_j w_{ij}}{S \sqrt{\left[\frac{n \sum_j w_{ij}^2 - (\sum_j w_{ij})^2}{n-1} \right]}} \quad (6)$$

onde:

x_j é o valor da variável no local j ,
 w_{ij} é a matriz de ponderação espacial, que representa a relação entre o local i e j ,
 Se j for um vizinho de i (definido por contiguidade ou distância), w_{ij} terá um valor (normalmente 1). Se j não for um vizinho de i , w_{ij} será 0.

A média e o desvio padrão de G_i^* são usados para determinar a significância estatística dos clusters:

- Quando G_i^* é significativamente maior, o local i é considerado um hotspot;
- Quando G_i^* é significativamente menor, é considerado um coldspot.

Considerando a metodologia multidimensional de análise empregada, o processamento (ESRI, 2024) retorna como padrão de interpretação dos dados as seguintes categorias para a variação espaço-temporais definidos na análise de locais quentes e frios (hot/cold spots) as quais têm por definição que;

quando o último intervalo temporal é quente:

- Novo: o intervalo temporal mais recente é quente pela primeira vez;
- Consecutivo: uma sequência ininterrupta de intervalos temporais quentes, composta por menos de 90% de todos os intervalos;
- Crescente: ao menos 90% dos intervalos temporais são quentes, e estão se tornando mais quentes ao longo do tempo;
- Persistentes: ao menos 90% dos intervalos temporais são quentes, sem tendência para cima ou para baixo;
- Decrescente: ao menos 90% dos intervalos temporais são quentes, e se tornando menos quentes ao longo do tempo;
- Esporádicos: alguns dos intervalos temporais são quentes;
- Oscilantes: alguns dos intervalos temporais são quentes, alguns são frios;

quando o último intervalo temporal não é quente:

- Histórico: ao menos 90% dos intervalos temporais são quentes, mas o mais recente não;

quando o último intervalo temporal é frio:

- Novo: o intervalo temporal mais recente é frio pela primeira vez;
- Consecutivo: uma sequência ininterrupta de intervalos temporais frios, composta por menos de 90% de todos os intervalos;
- Crescente: ao menos 90% dos intervalos temporais são frios, e estão se tornando mais frios ao longo do tempo;
- Persistentes: ao menos 90% dos intervalos temporais são frios, sem tendência para cima ou para baixo;
- Decrescente: ao menos 90% dos intervalos temporais são frios, e se tornando menos frios ao longo do tempo;
- Esporádicos: alguns dos intervalos temporais são frios;
- Oscilantes: alguns dos intervalos temporais são frios, alguns são quentes;

quando o último intervalo temporal não é frio:

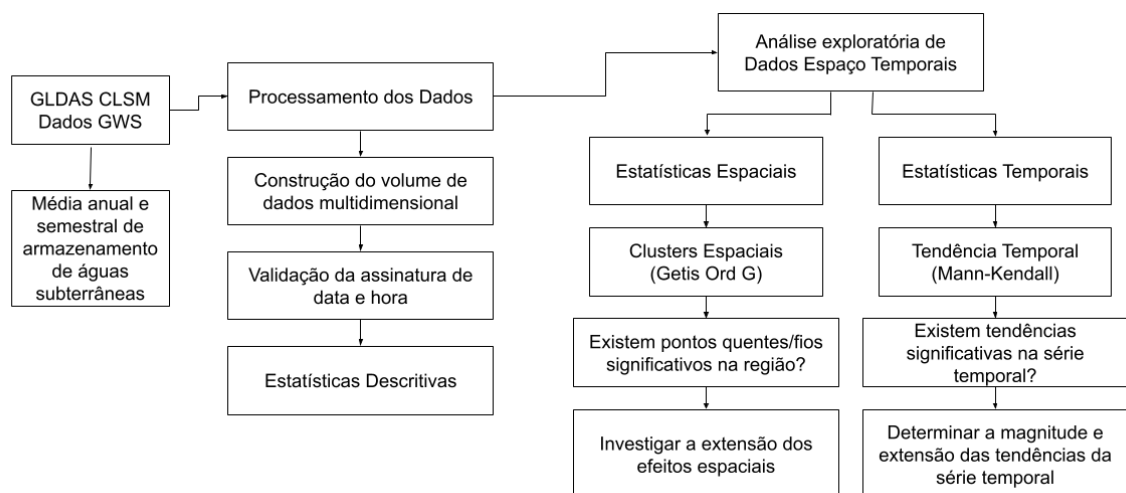
- Histórico: ao menos 90% dos intervalos temporais são frios, mas o mais recente não.

Categorizados de tal maneira, os dados podem ser interpretados conforme suas variações, retornando além da modelagem 3D, uma representação gráfica bidimensional sobre o padrão para a média do período analisado.

As informações de saída do cubo espaço temporal serão posteriormente comparadas para avaliar as condições de disponibilidade hídrica considerando tanto as variações de caráter temporal e geográfico quanto a amplitude da variação do volume de água disponível às condições de estresse hídrico possíveis sobre a bacia hidrográfica.

A metodologia proposta para análise dos dados está representada a seguir:

Figura 12. Fluxograma da metodologia proposta para análise de dados.



3.4 Reprodutibilidade e Acesso a Materiais

O produto desta dissertação é, portanto, um aplicativo em ambiente online utilizando o desenvolvedor de aplicações web Experience Builder hospedado na plataforma ArcGIS Online, o aplicativo “GSDAS – PPRB” (BRIZOTTI; MANZIONE, 2026) oferece interface interativa para a disponibilização e visualização de dados brutos e processados sobre águas subterrâneas.

Essa ferramenta permite que gestores, pesquisadores e o público em geral acessem informações relacionadas à análise exploratória de dados espaço-temporais de forma clara e dinâmica, disponibilizando as informações relacionadas às reservas

hídricas subterrâneas, uma vez que as funcionalidades completas relacionadas ao processamento estatístico de dados relacionados a análise exploratória ainda têm limitações para serem executados em versões online de pacotes SIG (SEE, 2021).

Além de promover o compartilhamento de dados, o aplicativo pretende servir como um recurso estratégico para a gestão hídrica, auxiliando na tomada de decisões relacionadas à concessão de outorgas, planejamento de uso sustentável dos recursos e monitoramento das condições ambientais da região estudada, se mantendo atualizado com informações de disponibilidade de águas subterrâneas.

Os dados disponibilizados para visualização são, além das camadas de orientação para a bacia hidrográfica, os de valor da média anual e semestral de águas subterrâneas (mm) e os que contém os cálculos de análise de pontos quentes emergente, nos formatos bi e tridimensionais, e as informações sobre tendência para a média semestral, com possibilidade de exportação das tabelas nos formatos .csv e GeoJSON por padrão da plataforma.

Ainda para garantir a reprodutibilidade da metodologia, considerando o volume de dados que demandam de uma série histórica e os impedimentos que podem advir da obtenção de dados sem a adequada assinatura de data e hora, foi produzido um notebook (.pyinb) a partir do script em linguagem python compatível com ambiente Google Colab (APÊNDICE A).

O script possui passos para a organização da tabela, onde os dados raster (.tiff) baixados no repositório Giovanni são transformados em pontos, e são atribuídos a eles as devidas assinatura de data e hora extraíndo a informação do título original do arquivo considerando a última data da média (ex: 31-12-aaaa), através de uma expressão regular que pode ser editada conforme as necessidades do conjunto de dados utilizados, mas que por padrão do repositório, funciona para qualquer variável de interesse desde que a mesma possua datas de início e fim no formato “yyyymmdd-yyyymmdd”, afim de ser identificado pela expressão regular.

Será solicitada associação com informações do Google Drive pessoal para identificação da pasta de origem das imagens raster, e ao final do processo o script de forma automática organiza e exporta a tabela diretamente em pasta associado, o modelo .csv de saída está apto para aplicação posterior no ArcGIS com as formatações multidimensionais necessárias, sendo etapas posteriores em ambiente SIG, o refinamento de área do conjunto de dados e sua reprojeção.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Estatística Descritiva

Análise geral dos dados, foi feita inicialmente através de testes por estatísticas descritivas, onde observou-se para o conjunto de dados de média anual (Tabela 2) valores médios variando entre 726 e 1598 mm para as UPH's Santo Anastácio e Alto Tibagi respectivamente, as medianas de todas as 22 unidades encontram-se próximas dos valores de média.

Tabela 2. Estatísticas descritivas para média anual de armazenamento de água subterrânea pelo período de 2003 a 2024

Id	Unidades de Planejamento Hídrico	Min	Max	Média	Mediana	SD	Variância	CV	Assimetria	Curtose
8	Alto Cinzas	1303,33	1490,30	1392,63	1390,51	50,00	2499,78	3,59	-0,09	-0,41
2	Alto Paranapanema	1082,51	1325,72	1208,29	1215,01	65,83	4333,01	5,45	-0,41	-0,31
1	M.D.	1293,38	1421,52	1360,77	1361,56	39,44	1555,27	2,90	-0,13	-0,85
12	Alto Paranapanema	1518,82	1661,68	1598,49	1594,67	35,39	1252,14	2,21	-0,47	0,11
9	Alto Tibagi	977,31	1211,58	1076,12	1075,11	55,64	3095,80	5,17	0,32	0,64
19	Baixo Cinzas	825,25	1248,84	980,12	976,77	100,93	10187,32	10,30	0,99	1,08
20	Baixo Paranapanema	966,97	1309,24	1102,94	1095,51	94,53	8936,60	8,57	0,60	-0,48
14	M.E.	934,42	1149,20	1018,41	1007,75	49,30	2430,01	4,84	0,65	1,12
11	Baixo Tibagi	645,97	934,39	776,70	779,23	66,00	4355,42	8,50	0,18	0,73
4	Capivara	1179,37	1393,73	1267,78	1264,57	54,42	2961,16	4,29	0,38	0,06
5	Itararé Alto	1368,43	1546,41	1449,01	1444,65	46,52	2164,15	3,21	0,16	-0,30
15	Itararé Norte Pioneiro	642,78	900,05	744,57	736,61	60,06	3606,75	8,07	0,65	0,96
13	Laranja Doce	1350,46	1493,50	1426,30	1430,86	39,17	1534,15	2,75	-0,24	-0,77
7	Médio-Alto Tibagi	1166,58	1460,16	1320,38	1331,29	73,55	5410,29	5,57	-0,40	0,05
10	Pardo	713,64	983,11	833,21	837,13	62,68	3929,29	7,52	0,19	0,73
17	Pari/Novo	660,49	977,63	783,92	774,78	75,74	5736,35	9,66	0,77	0,79
18	Pirapozinho	708,92	956,54	796,71	779,92	61,11	3734,27	7,67	0,90	0,82
21	Pirapó	570,88	952,09	726,96	717,80	87,97	7737,94	12,10	0,62	0,90
3	Santo Anastácio	1249,46	1429,22	1324,99	1323,59	48,59	2360,84	3,67	0,25	-0,25
22	Taquari	1012,36	1398,92	1167,73	1169,85	95,14	9050,70	8,15	0,67	0,27
6	Tributários Rio	1003,98	1337,93	1184,15	1207,14	83,75	7013,83	7,07	-0,57	0,17
16	Paraná	724,26	959,31	808,34	793,51	56,77	3223,38	7,02	0,91	1,02
	Turvo									
	Vermelho/Capim									

O desvio padrão se manteve entre 35 e 100 mm, sendo os menores valores correspondentes as UPH's Alto Tibagi, Médio-Alto Tibagi e Alto Paranapanema M.E. e as maiores para Baixo Paranapanema M.D., Baixo Paranapanema M.E. e

Tributários do Rio Paraná; os coeficientes de variação foram considerados pequenos para todas as UPHs, com valores inferiores a 12% indicando que as distribuições são estreitas em relação às respectivas médias e denotando relativa estabilidade na flutuação dos níveis ao longo do período.

Tabela 3. Estatísticas descritivas para média semestral de armazenamento de água subterrânea pelo período de 2003 a 2025.

Id	Unidades de Planejamento Hídrico	Min	Max	Média	Mediana	SD	Variância	CV	Assimetria	Curtose
8	Alto Cinzas	1261,37	1502,50	1391,58	1388,70	57,79	3340,25	4,15	-0,22	0,02
2	Alto Paranapanema	1048,38	1349,94	1205,90	1212,96	69,43	4819,94	5,76	-0,21	-0,14
1	M.D.	1273,88	1450,25	1360,19	1363,44	42,76	1828,18	3,14	0,00	-0,58
12	Alto Paranapanema	1485,11	1669,86	1597,96	1600,76	38,48	1481,07	2,41	-0,58	0,58
9	Alto Tibagi	938,71	1212,36	1074,62	1067,24	61,11	3734,57	5,69	0,24	0,30
19	Baixo Cinzas	785,01	1261,13	976,62	960,72	108,13	11691,06	11,07	0,82	0,48
20	Baixo Paranapanema	934,12	1319,52	1099,19	1094,45	102,49	10504,53	9,32	0,45	-0,59
14	M.D.	901,87	1152,06	1017,18	1010,47	54,73	2995,88	5,38	0,43	0,49
11	Baixo Tibagi	603,35	938,18	774,20	773,84	71,26	5077,95	9,20	0,18	0,37
4	Capivara	1158,96	1398,62	1266,27	1262,83	61,00	3720,86	4,82	0,34	-0,07
5	Itararé Alto	1338,60	1562,87	1448,10	1445,13	53,10	2820,02	3,67	0,15	-0,08
15	Paranapanema	607,73	906,04	742,28	734,76	65,90	4342,24	8,88	0,58	0,44
13	Itararé Norte Pioneiro	1315,05	1505,90	1425,79	1430,31	45,30	2052,41	3,18	-0,49	0,03
7	Médio-Alto Tibagi	1121,46	1474,13	1317,61	1324,02	77,54	6012,48	5,88	-0,25	0,11
10	Pardo	673,76	985,87	831,24	829,98	67,16	4510,90	8,08	0,18	0,38
17	Pari/Novo	622,17	982,01	780,81	772,74	82,14	6747,66	10,52	0,67	0,34
18	Pirapozinho	681,59	962,67	794,45	788,28	66,66	4443,75	8,39	0,75	0,40
21	Pirapó	524,82	959,31	723,46	712,42	95,41	9103,43	13,19	0,57	0,41
3	Santo Anastácio	1227,14	1448,89	1322,95	1321,64	52,75	2782,48	3,99	0,43	0,00
22	Taquari	971,05	1408,60	1163,91	1154,64	102,49	10504,75	8,81	0,56	-0,07
6	Tributários Rio Paraná	949,28	1346,60	1181,09	1190,15	88,94	7909,65	7,53	-0,43	0,15
16	Turvo	696,02	962,88	806,14	800,42	61,76	3813,96	7,66	0,75	0,45
	Vermelho/Capim									

No que diz respeito a série de dados semestral (Tabela 3) os valores mês permanecem próximos com reação ao primeiro, com valores de média variando entre 0 e 4 mm a menos que o da série anual, com valores de mínimo e máximo correspondentes para as mesmas UPH's do primeiro conjunto, apresentando também estabilidade nos valores de mediana.

O desvio padrão para a série semestral aumenta ligeiramente, variando entre 38 e 108 mm, também com correspondência para os valores mínimos e máximos das

unidades de planejamento, enquanto os coeficientes de variação, apesar de serem pouco maiores, ainda se mantêm em valores inferiores a 15%.

A assimetria para ambos os conjuntos de dados concentra-se próxima de zero indicando distribuições simétricas e a curtose também próxima de zero aponta distribuições próximas a normal.

A principal diferença entre o primeiro e o segundo conjunto de dados está na variabilidade dos dados do segundo conjunto, com valores de desvio padrão e variâncias ligeiramente mais elevados que o primeiro (média anual), sugerindo maior dispersão entre os dados, com coeficientes de variação mais significativas nas unidades de planejamento como Baixo Paranapanema M.D., Santo Anastácio, Capivara e Tributários do Rio Paraná.

4.2 Variação Espacial

4.2.1 Resultados em escala anual

A análise de Getis-Ord G_i^* (Tabelas 4 e 5) foi testada com níveis de confiança de 90, 95 e 99%, em relação a 1, 2 e 3 desvios-padrão acima da média (pontos quentes) ou 1, 2 e 3 desvios-padrão abaixo da média (pontos frios).

Nesse contexto, Alto Tibagi apresentou ponto quente com 99% de significância, enquanto Itararé Norte Pioneiro e Médio Alto Tibagi foram considerados pontos quentes com 95% de significância, e Alto Paranapanema M. E., Taquari, Pardo, Itararé Alto Paranapanema e Alto Cinzas significância de 90%.

Os pontos frios com significância de 99% foram observados em Capivara, Laranja Doce, Vermelho/Capim, Pirapozinho, Pirapó e Santo Anastácio, enquanto Pari/Novo teve pontos frios com significância de 95%, Baixo Cinzas, Baixo Tibagi, Baixo Paranapanema M. D., Baixo Paranapanema M. E. e Tributários do Rio Paraná apresentaram pontos frios com 95% de significância.

Turvo e Alto Paranapanema M. D foram consideradas unidades não significativas em termos de agrupamento.

O resultado da análise de locais quente/frios para os dados média anual (Figuras 13 e 14) apresenta 150 pontos com tendência espaço-temporal de pontos frios/quentes do total de 220 pontos analisados na bacia, sendo destes 58 pontos

quentes persistentes, 5 crescentes e 1 ponto esporádico, e para pontos frios 47 pontos persistentes, 25 oscilantes 13 crescentes e 1 esporádico.

Com relação ao padrão metodológico utilizado, observa-se que as unidades de planejamento Alto Paranapanema M.E., Taquari, Itararé Alto Paranapanema, Itararé Norte Pioneiro, Alto Cinzas, Médio-Alto Tibagi e Alto Tibagi apresentam predominância de padrão persistente com valores altos em ao menos 90% dos intervalos de tempo analisados para os respectivos pontos, correspondentes a área da unidade, tendo valor médio superior a 1300mm de armazenamento.

Para os pontos frios, por outro lado, as UPH's Vermelho/Capim, Santo Anastácio, Pirapózinho, Pirapó, Laranja Doce e Baixo Tibagi, apresentaram padrão persistente de valores baixos em ao menos 90% dos intervalos de tempo analisados, tendo valor médio próximo a 700 mm, as unidades Tributários do Rio Paraná, Baixo Paranapanema M.D., Baixo Paranapanema M.E., Baixo Tibagi, Baixo Cinzas e Turvo, em mais de 50% da correspondência de seu território têm padrão de variação esporádico, onde a variação dos dados ocorre entre frios e quentes ao longo da série histórica, com predominância de intervalos frios, os valores médios dessas unidades varia próximo a 1000 mm de armazenamento.

E por fim as unidades Capivara, Pari/Novo e Laranja Doce, apresentam padrão de ponto frio crescente onde menos de 90% dos intervalos são frios, mas os valores vêm decrescendo ao longo dos anos, nessas UPH's o valor médio de armazenamento é 750 e 850 mm e seu coeficiente de variação está entre 7 e 9%.

Figura 13. Padrões espaço-temporais - média anual (2003 a 2024).

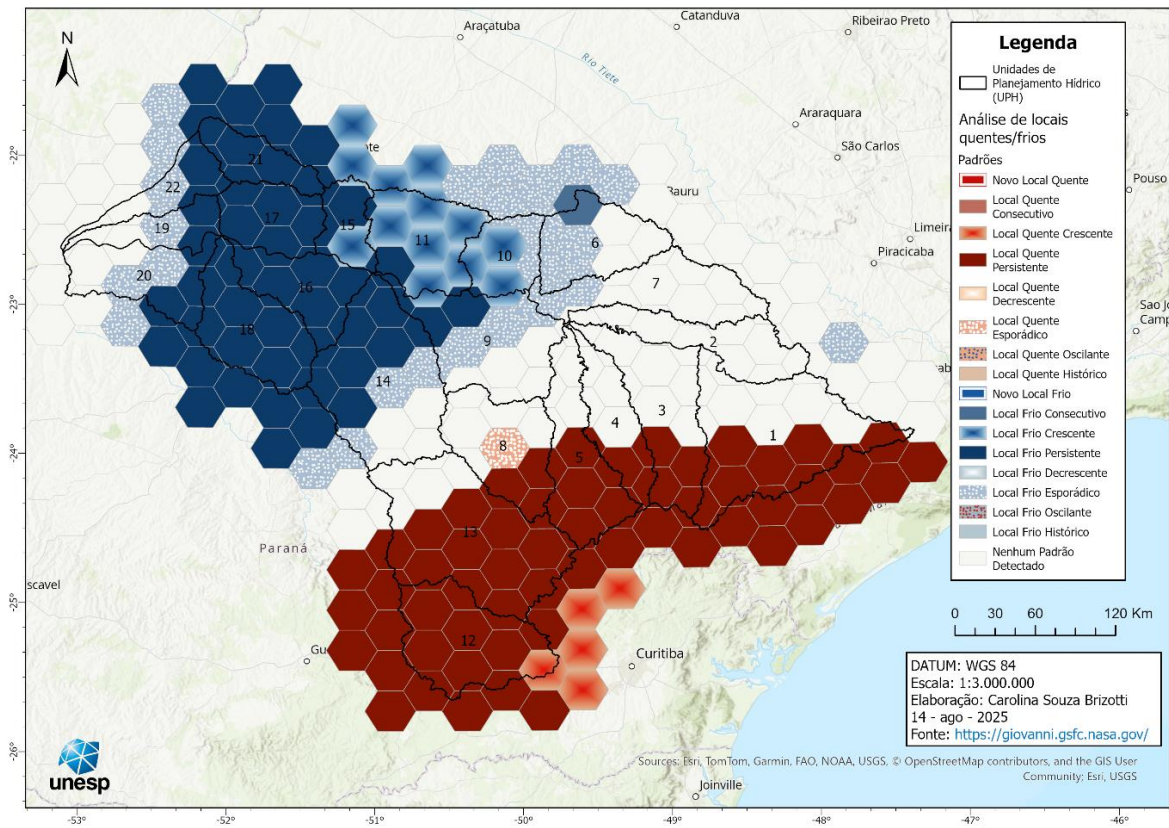


Figura 14. Cubo espaço-temporal da variação média anual (2003-2024).

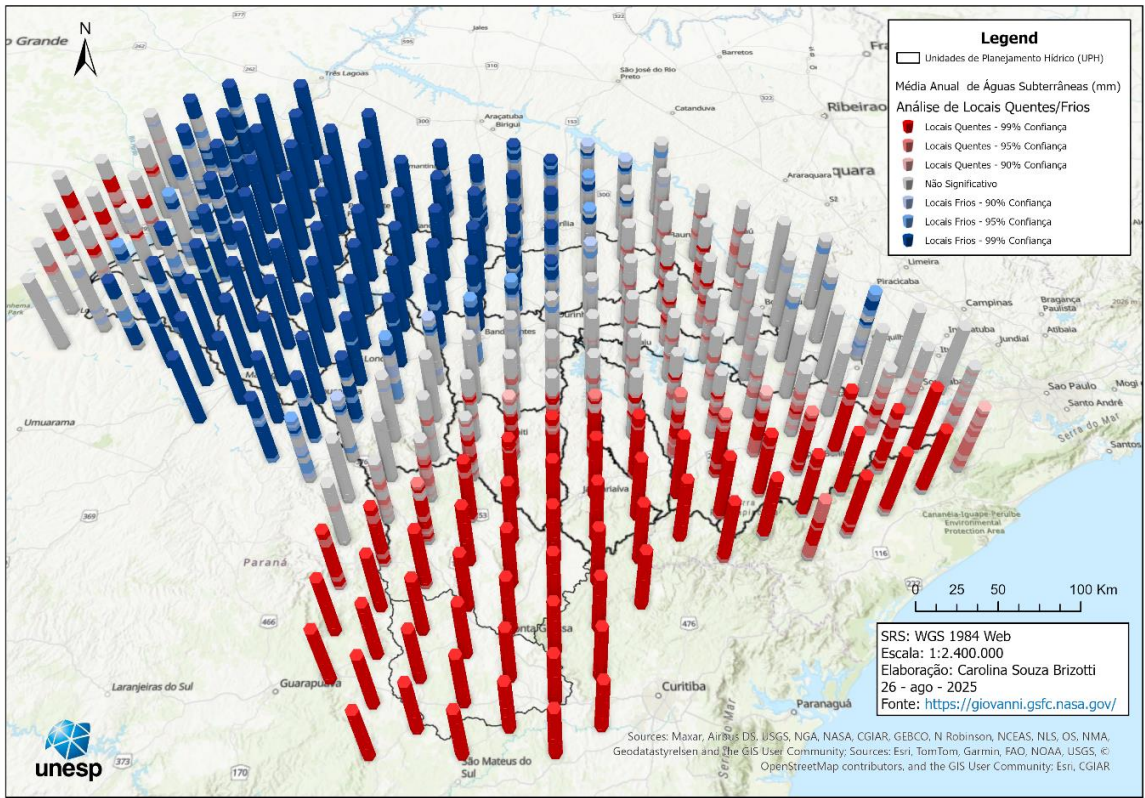


Tabela 4. Gi* Z-score para armazenamento de água subterrânea por UPH em média anual de 2003 a 2024

Id	Unidades de Planejamento Hídrico	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
8	Alto Cinzas	1,85	2,64	2,72	2,33	2,16	2,61	2,91	3,50	3,78	3,04	3,05	2,97	2,86	3,94	4,00	3,27	2,77	1,95	1,47	1,87	2,81	2,39
2	Alto Paranapanema M.D.	0,75	0,80	0,78	0,71	0,48	0,64	0,91	1,51	1,81	1,30	1,24	0,56	0,00	1,40	1,89	0,69	0,12	-0,29	-1,14	-1,11	0,02	-0,26
1	Alto Paranapanema M.E.	1,39	2,08	2,39	2,27	1,89	2,13	2,65	3,08	3,19	2,76	2,77	2,31	1,92	2,84	3,01	2,32	2,08	1,66	1,21	1,45	2,06	1,83
12	Alto Tibagi	4,50	6,46	6,43	5,82	5,63	6,26	6,66	6,91	7,08	6,60	6,51	6,66	6,79	7,26	7,09	6,80	6,70	6,08	5,92	6,31	6,70	6,61
9	Baixo Cinzas	-1,07	-1,62	-1,63	-1,85	-1,86	-1,63	-1,59	-0,87	-0,40	-1,03	-1,07	-1,31	-1,61	-0,26	0,11	-0,95	-1,61	-2,28	-2,93	-2,74	-1,72	-2,13
19	Baixo Paranapanema M.D.	-1,07	-2,25	-3,03	-3,07	-2,44	-2,33	-2,75	-1,55	-0,31	-1,07	-1,44	-1,63	-1,84	0,22	1,30	0,30	-0,95	-2,47	-3,36	-3,55	-2,68	-2,98
20	Baixo Paranapanema M.E.	-1,82	-3,19	-3,88	-4,08	-3,60	-3,47	-3,81	-2,68	-1,60	-2,30	-2,50	-2,52	-2,70	-1,01	-0,14	-0,90	-2,02	-3,47	-4,22	-4,30	-3,49	-3,76
14	Baixo Tibagi	-2,07	-2,88	-2,92	-3,29	-3,25	-2,95	-2,89	-2,28	-1,94	-2,60	-2,56	-2,54	-2,67	-1,44	-1,16	-2,04	-2,69	-3,45	-3,93	-3,64	-2,84	-3,25
11	Capivara	-3,90	-5,77	-5,93	-5,98	-5,72	-5,53	-5,71	-5,02	-4,39	-5,07	-5,28	-5,68	-6,12	-4,38	-3,81	-5,24	-6,02	-6,51	-7,26	-7,36	-6,34	-6,78
4	Itararé Alto Paranapanema	1,73	2,12	1,96	1,77	1,60	1,92	2,23	2,96	3,26	2,53	2,53	2,24	1,93	3,24	3,53	2,46	1,92	1,32	0,79	1,10	2,00	1,71
5	Itararé Norte Pioneiro	2,47	3,42	3,45	3,18	2,99	3,42	3,81	4,37	4,56	3,85	3,85	3,65	3,47	4,58	4,70	3,85	3,42	2,81	2,40	2,79	3,57	3,23
15	Laranja Doce	-4,99	-7,39	-7,69	-7,72	-7,32	-7,15	-7,42	-6,68	-5,98	-6,68	-6,94	-7,28	-7,60	-5,79	-5,14	-6,54	-7,42	-8,01	-8,70	-8,80	-7,92	-8,30
13	Médio-Alto Tibagi	2,52	3,83	3,98	3,38	3,19	3,82	4,23	4,53	4,66	3,97	3,93	4,07	4,17	4,86	4,65	4,26	4,05	3,27	2,99	3,44	4,11	3,81
7	Pardo	0,67	0,72	0,69	0,62	0,49	0,66	0,83	1,44	1,82	1,28	1,13	0,38	-0,23	1,34	1,93	0,55	-0,12	-0,51	-1,53	-1,64	-0,31	-0,72
10	Pari/Novo	-1,83	-2,86	-2,95	-3,00	-2,87	-2,65	-2,72	-2,03	-1,43	-2,10	-2,33	-2,98	-3,58	-1,75	-1,08	-2,62	-3,42	-3,89	-4,97	-5,21	-3,84	-4,36
17	Pirapozinho	-4,68	-7,14	-7,68	-7,71	-7,16	-7,00	-7,35	-6,44	-5,53	-6,29	-6,65	-6,98	-7,26	-5,22	-4,30	-5,66	-6,78	-7,69	-8,45	-8,61	-7,75	-8,07
18	Pirapó	-4,19	-6,17	-6,56	-6,90	-6,65	-6,48	-6,61	-5,81	-5,24	-5,87	-5,85	-5,83	-6,05	-4,60	-3,95	-4,92	-5,85	-6,73	-7,20	-7,06	-6,39	-6,67
21	Santo Anastácio	-4,40	-6,83	-7,42	-7,28	-6,59	-6,44	-6,90	-6,00	-4,97	-5,72	-6,27	-6,73	-7,01	-4,83	-3,88	-5,38	-6,45	-7,31	-8,21	-8,53	-7,63	-7,97
3	Taquari	1,60	1,98	1,88	1,74	1,54	1,80	2,15	2,82	3,11	2,46	2,44	2,06	1,68	2,91	3,22	2,20	1,72	1,21	0,65	0,87	1,71	1,43
22	Tributários Rio Paraná	-0,40	-1,31	-2,07	-2,03	-1,36	-1,26	-1,73	-0,55	0,72	0,02	-0,43	-0,66	-0,83	1,24	2,31	1,31	0,12	-1,38	-2,31	-2,55	-1,71	-2,00
6	Turvo	0,21	-0,01	-0,11	-0,14	-0,15	0,08	0,14	0,77	1,29	0,68	0,44	-0,42	-1,10	0,76	1,46	-0,18	-0,97	-1,37	-2,58	-2,89	-1,36	-1,89
16	Vermelho/Capim	-4,49	-6,65	-7,03	-7,24	-6,93	-6,76	-6,95	-6,18	-5,54	-6,18	-6,29	-6,42	-6,66	-5,09	-4,42	-5,49	-6,42	-7,22	-7,75	-7,69	-6,97	-7,27

4.2.2 Resultados em escala semestral

Para média semestral (Figuras 15 e 16) observa-se a presença de 49 pontos persistente e 11 crescentes, enquanto isso para pontos frios, concentrando as maiores alterações apresentam 34 pontos persistentes, 32 esporádicos, 26 crescentes, 11 oscilantes e 2 novos pontos frios, para o total de 220 pontos cobrindo a área de análise com tendência em 165 deles.

As áreas onde concentram-se os mais altos valores de água subterrânea, são as unidades Alto Tibagi, Itararé Norte Pioneiro e Médio Alto Tibagi, são encontradas nas cabeceiras sudeste da bacia. Esta região apresenta sedimentos mais espessos do que na saída, uma vez que a BHRP se afina em direção ao Rio Paraná na direção oeste, a região também é marcada pela maior ocorrência de chuvas.

Para os padrões de valores quentes, mantém padrões muito próximos dos valores de média anual, com ligeira diferença nas unidades Alto Tibagi e Médio-Alto Tibagi, que apresentam padrão de valores quentes crescente em 5 pontos para o primeiro e 1 ponto para o segundo, reforçando variações positivas intersemestrais, com valores mais altos, inclusive de média com 1500 mm.

Figura 15. Padrões espaço-temporais - média semestral (2003 a 2025).

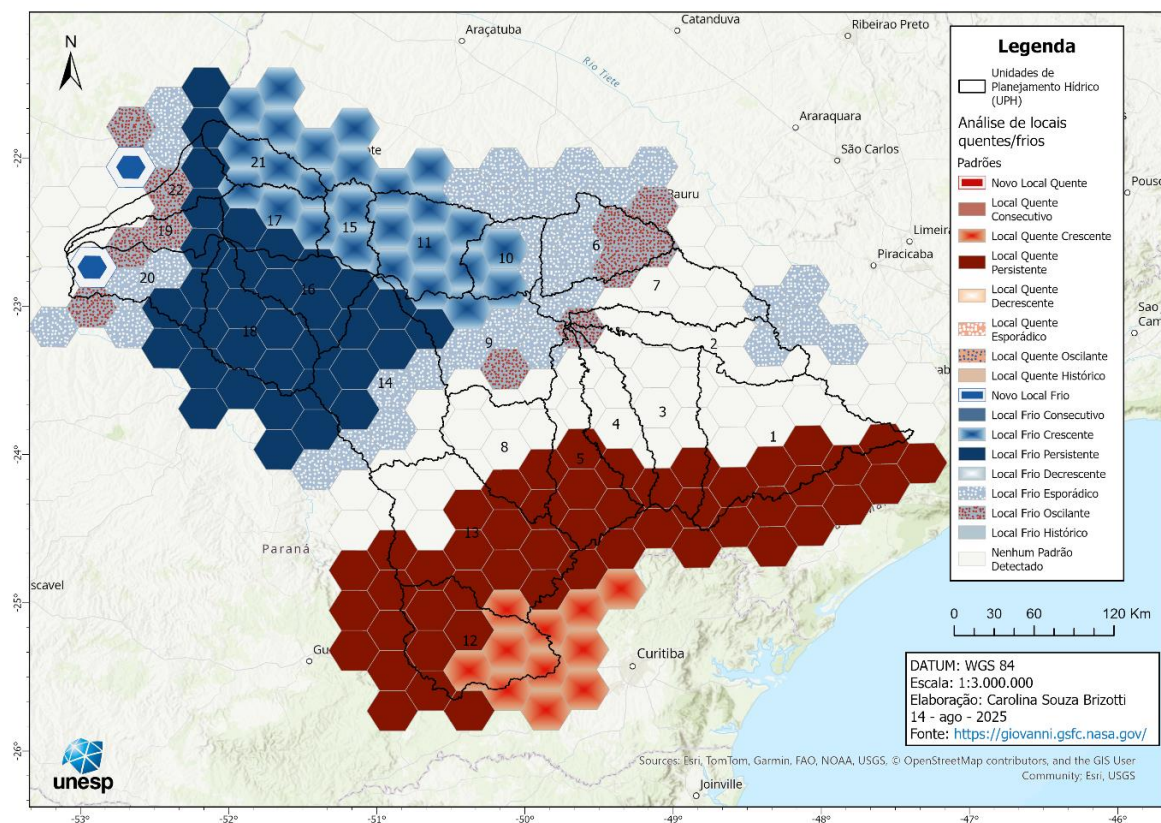
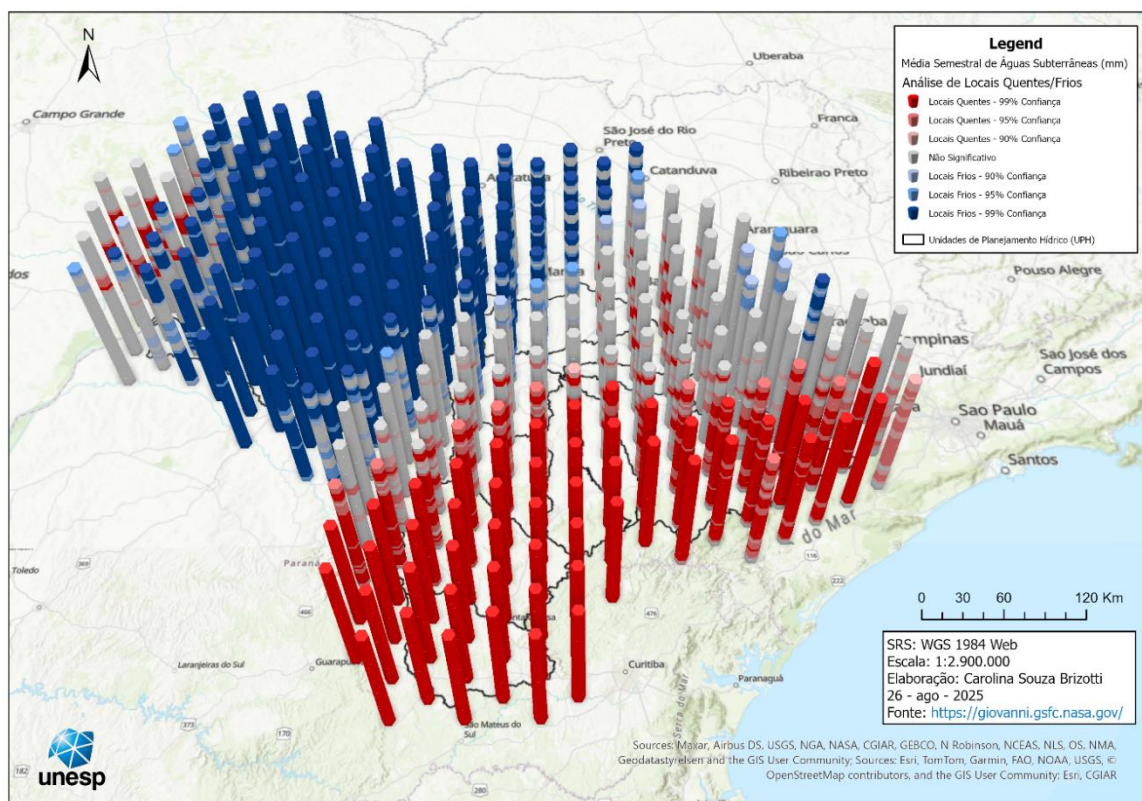


Figura 16. Cubo espaço-temporal da variação média semestral (2003-2025).



Quanto aos pontos frios, estes apresentam maior diferenciação do primeiro conjunto, com pontos persistentes concentrados Pirapó, Vermelho/Capim, e parcialmente nas unidades Pirapozinho e Baixo Tibagi com valores médios variando próximos a 800mm, com a exceção desta última que possui média de 1000mm devido a sua extensão territorial e a área que abrange.

A área de pontos com valores frios crescente se expandiu além das unidades Capivara, Pari/Novo e Laranja Doce, também para Pirapozinho e Santo Anastácio, representando os valores mais baixos que as unidades vêm apresentando com a influência de variabilidade climática, sendo estes dois últimos os maiores valores de coeficiente de variação com 10 e 12% respectivamente, representando os picos de perda que as unidades vêm sofrendo.

Há ainda uma crescente de pontos oscilante e esporádicos, sendo os esporádicos de mesma grandeza que os oscilantes, com a diferença de que nestes o último intervalo de tempo obteve recarga e apresenta valor mais alto, e 1 novo ponto frio na unidade Baixo Paranapanema M.E. que apresentou no início de 2025 o valor mais baixo da série histórica para o ponto.

Conforme constatado por Manzione (2023), essas regiões também apresentam aglomerados de valores de precipitação mais elevados ao longo de 21 anos (2000-2020). Esses padrões podem ser explicados pela proximidade das cabeceiras da Bacia Hidrográfica do Atlântico Sul (BHPR) com o Oceano Atlântico e pela influência de frentes frias, resultando em um regime de precipitação diferente para a região em comparação com as partes central e ocidental da bacia.

Observou-se que os pontos com valores mais altos de armazenamento em toda a bacia concentram-se nas áreas onde há a presença de pontos correspondentes ao aquífero aflorante do Fraturado Centro-Sul, concentrando um armazenamento que varia entre 1800 e 1600 mm ao longo da série histórica, acima dos demais que variam até 1600 mm, e concentrando os valores mais baixos nos aquíferos Serra Geral e Bauru com variações entre 1100 e 600 mm; para os demais aquíferos, no entanto, a resolução espacial dos dados de $0,25 \times 0,25^\circ$ capta muita interferência entre áreas de transição de aquíferos para que identifique-se um padrão detalhado entre os valores de cada afloramento.

Considerando a disponibilidade hídrica estimada através do coeficiente de infiltração e precipitação como dados de entrada e ganho e suas vazões por fluxo

base, recarga profunda, extração por poços e circulação lateral como saída e perda, define-se que as áreas com maior potencial de recarga na bacia considerando as características de seus aquíferos, são as regiões das formações aquíferas Bauru-Caiuá, Serra Geral, Guarani e a formação cárstica, com recarga potencial específica variando entre 6 e 11 l/s/km³ (ANA 2014).

As formações Bauru-Caiuá, Serra Geral e Guarani são correspondentes as áreas das unidades as quais apresentam maior resposta as variações hidroclimatológicas, onde podemos concluir que concentram as unidades de planejamento que mais sofrem com interferências de variabilidade climática, com ênfase para as unidades Baixo Paranapanema M.D., Laranja Doce, Pirapozinho, Santo Anastácio e Tributários do Rio Paraná.

Tabela 5. Gi* Z-score para armazenamento de água subterrânea por UPH em média semestral de 2003 a 2025.

(continua)

Id	Unidades de Planejamento Hídrico	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013	
		1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.
8	Alto Cinzas	1,74	2,27	2,40	2,88	2,70	2,89	2,26	2,00	2,43	2,13	2,53	2,71	2,76	3,70	4,15	3,88	3,69	2,96	2,70	2,76	3,35	3,26
2	Alto Paranapanema M.D.	0,44	0,50	0,41	0,89	0,97	1,09	0,68	0,47	0,54	0,28	0,64	0,72	0,80	1,80	2,16	1,86	1,75	1,16	1,09	1,03	1,39	1,12
1	Alto Paranapanema M.E.	1,06	1,75	2,04	2,41	2,50	2,59	2,19	1,95	1,89	1,70	2,22	2,54	2,70	3,24	3,43	3,30	3,15	2,64	2,59	2,57	2,89	2,68
12	Alto Tibagi	4,52	6,14	6,27	6,57	6,28	6,20	5,51	5,43	5,92	5,85	6,35	6,61	6,64	7,00	7,13	7,06	7,05	6,60	6,26	6,32	6,71	6,65
9	Baixo Cinzas	-1,20	-1,94	-1,87	-1,36	-1,54	-1,40	-1,83	-1,97	-1,58	-1,94	-1,80	-1,74	-1,72	-0,62	-0,05	-0,35	-0,45	-1,11	-1,34	-1,34	-0,80	-0,78
19	Baixo Paranapanema M.D.	-1,29	-2,50	-2,95	-2,59	-3,05	-2,76	-2,83	-2,43	-1,81	-2,70	-2,91	-2,98	-3,03	-1,21	-0,18	-0,51	-0,21	-1,11	-1,64	-1,77	-1,20	-1,10
20	Baixo Paranapanema M.E.	-2,02	-3,47	-3,78	-3,41	-3,93	-3,74	-3,92	-3,66	-3,00	-3,79	-3,99	-4,04	-4,02	-2,37	-1,42	-1,73	-1,53	-2,31	-2,77	-2,85	-2,18	-2,05
14	Baixo Tibagi	-2,18	-3,22	-2,97	-2,58	-2,96	-2,85	-3,28	-3,40	-2,90	-3,25	-3,09	-3,00	-2,97	-2,02	-1,57	-1,87	-1,99	-2,64	-2,90	-2,79	-2,18	-2,17
11	Capivara	-4,06	-6,00	-6,04	-5,55	-5,80	-5,62	-5,82	-5,69	-5,31	-5,86	-5,80	-5,79	-5,85	-4,69	-4,10	-4,43	-4,36	-5,09	-5,47	-5,49	-4,98	-5,03
4	Itararé Alto Paranapanema	1,52	1,77	1,58	2,06	2,06	2,24	1,73	1,53	1,79	1,49	1,83	2,05	2,13	3,19	3,72	3,37	3,11	2,38	2,21	2,21	2,77	2,71
5	Itararé Norte Pioneiro	2,31	3,07	3,10	3,54	3,47	3,65	3,09	2,91	3,20	2,92	3,38	3,63	3,72	4,57	4,96	4,68	4,43	3,73	3,55	3,56	4,09	3,98
15	Laranja Doce	-5,16	-7,60	-7,70	-7,28	-7,60	-7,38	-7,51	-7,25	-6,84	-7,48	-7,46	-7,50	-7,57	-6,32	-5,69	-6,04	-5,92	-6,71	-7,12	-7,13	-6,64	-6,67
13	Médio-Alto Tibagi	2,50	3,46	3,79	4,16	3,83	3,91	3,20	2,98	3,51	3,33	3,87	4,12	4,15	4,71	4,89	4,72	4,62	3,95	3,61	3,74	4,25	4,10
7	Pardo	0,40	0,43	0,36	0,85	0,86	1,01	0,63	0,47	0,61	0,29	0,61	0,62	0,66	1,76	2,15	1,80	1,78	1,16	1,01	0,94	1,27	0,98
10	Pari/Novo	-2,00	-3,12	-3,21	-2,64	-2,79	-2,61	-2,89	-2,88	-2,55	-3,03	-2,88	-2,85	-2,89	-1,69	-1,12	-1,51	-1,44	-2,13	-2,49	-2,57	-2,10	-2,26
17	Pirapozinho	-4,87	-7,34	-7,60	-7,24	-7,63	-7,38	-7,46	-7,09	-6,58	-7,34	-7,40	-7,46	-7,54	-6,06	-5,28	-5,65	-5,43	-6,30	-6,80	-6,86	-6,36	-6,39
18	Pirapó	-4,36	-6,48	-6,44	-6,11	-6,60	-6,54	-6,83	-6,73	-6,17	-6,68	-6,76	-6,72	-6,66	-5,52	-4,91	-5,23	-5,25	-5,87	-6,19	-6,12	-5,44	-5,37
21	Santo Anastácio	-4,58	-6,96	-7,34	-7,02	-7,35	-7,01	-6,95	-6,45	-5,98	-6,80	-6,87	-7,02	-7,20	-5,58	-4,78	-5,14	-4,81	-5,75	-6,31	-6,40	-6,07	-6,16
3	Taquari	1,34	1,65	1,54	1,98	1,99	2,13	1,69	1,50	1,67	1,40	1,75	1,99	2,10	3,04	3,49	3,20	2,99	2,31	2,17	2,16	2,64	2,53
22	Tributários Rio Paraná	-0,62	-1,54	-2,02	-1,67	-2,08	-1,76	-1,76	-1,31	-0,74	-1,63	-1,84	-1,96	-2,04	-0,23	0,79	0,50	0,85	-0,05	-0,56	-0,72	-0,26	-0,17
6	Turvo	-0,02	-0,28	-0,43	0,10	0,05	0,26	-0,08	-0,16	0,07	-0,34	-0,05	-0,06	-0,07	1,12	1,59	1,20	1,28	0,62	0,33	0,22	0,57	0,28
16	Vermelho/Capim	-4,67	-6,91	-6,95	-6,60	-7,02	-6,88	-7,12	-6,95	-6,45	-7,00	-7,05	-7,05	-7,04	-5,86	-5,24	-5,56	-5,50	-6,19	-6,54	-6,51	-5,93	-5,90

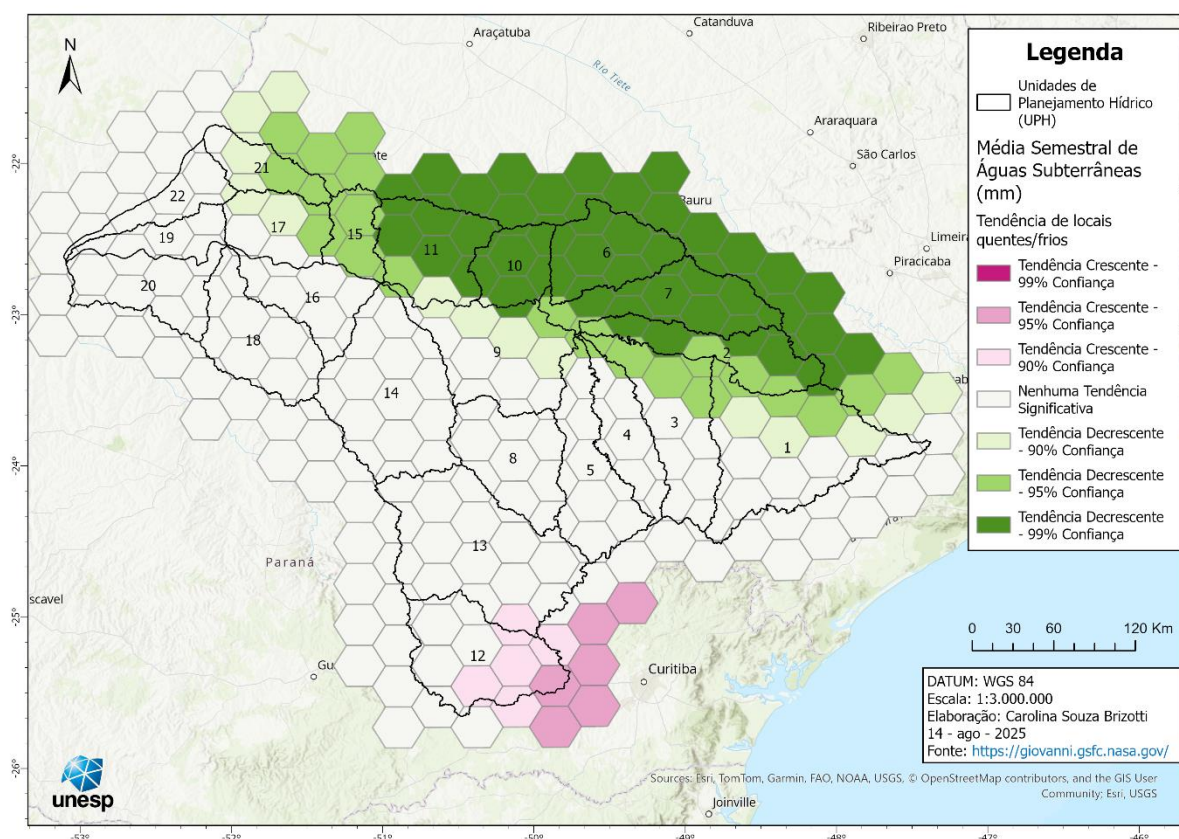
(conclusão)

Id	Unidades de Planejamento Hídrico	2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024	
		1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º	1º	2º
		sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.	sem.
8	Alto Cinzas	2,56	2,61	2,95	3,97	4,56	4,25	3,77	3,35	2,87	2,85	2,94	2,15	1,48	1,64	1,51	1,02	1,78	3,20	3,42	2,78	1,59	1,53
2	Alto Paranapanema																						
2	M.D.	-0,07	-0,28	0,15	1,32	2,27	2,10	1,68	0,86	-0,07	0,13	0,58	0,00	-0,71	-0,97	-1,35	-1,52	-1,06	0,04	0,79	0,14	-1,13	-1,10
1	Alto Paranapanema																						
1	M.E.	1,82	1,70	2,04	2,86	3,35	3,20	2,94	2,30	1,81	2,07	2,39	1,95	1,24	1,18	1,27	1,21	1,43	2,13	2,51	2,01	1,28	1,42
12	Alto Tibagi	6,46	6,68	6,87	7,28	7,44	7,28	6,96	6,75	6,65	6,66	6,75	6,21	5,66	5,87	6,15	5,79	6,09	6,94	7,01	6,69	6,26	6,32
9	Baixo Cinzas	-1,69	-1,89	-1,56	-0,28	0,73	0,29	-0,30	-0,70	-1,40	-1,51	-1,42	-2,06	-2,60	-2,70	-3,09	-3,30	-2,62	-1,49	-1,09	-1,70	-2,93	-3,06
19	Baixo Paranapanema																						
19	M.D.	-2,04	-2,21	-1,86	0,20	1,94	1,30	0,84	0,72	-0,21	-0,68	-1,09	-2,19	-3,01	-3,19	-3,52	-3,99	-3,72	-2,49	-1,71	-2,30	-3,76	-4,49
20	Baixo Paranapanema																						
20	M.E.	-2,86	-3,01	-2,74	-0,97	0,41	-0,11	-0,46	-0,55	-1,28	-1,75	-2,16	-3,20	-3,98	-4,06	-4,31	-4,76	-4,45	-3,26	-2,62	-3,15	-4,42	-5,11
14	Baixo Tibagi	-2,83	-2,88	-2,61	-1,41	-0,53	-0,97	-1,50	-1,79	-2,38	-2,58	-2,60	-3,26	-3,76	-3,72	-3,96	-4,21	-3,55	-2,55	-2,34	-2,81	-3,84	-4,11
11	Capivara	-6,15	-6,43	-6,00	-4,41	-3,02	-3,64	-4,34	-4,90	-5,89	-5,85	-5,70	-6,25	-6,70	-7,05	-7,56	-7,70	-7,19	-6,21	-5,59	-6,22	-7,67	-7,91
4	Itararé Alto																						
4	Paranapanema	1,76	1,67	2,01	3,19	4,10	3,78	3,22	2,58	1,88	1,91	2,19	1,56	0,88	0,92	0,81	0,51	1,08	2,27	2,60	1,95	0,98	1,08
5	Itararé Norte Pioneiro	3,21	3,23	3,55	4,57	5,26	4,95	4,45	3,91	3,35	3,42	3,65	3,03	2,37	2,49	2,48	2,17	2,72	3,87	4,10	3,46	2,52	2,63
15	Laranja Doce	-7,70	-7,90	-7,48	-5,76	-4,31	-5,07	-5,67	-6,09	-7,18	-7,27	-7,18	-7,73	-8,20	-8,48	-8,91	-9,11	-8,67	-7,77	-7,20	-7,74	-9,05	-9,35
13	Médio-Alto Tibagi	3,77	4,04	4,31	4,93	5,15	4,95	4,52	4,19	4,03	4,10	4,15	3,44	2,82	3,05	3,17	2,66	3,23	4,48	4,59	4,11	3,23	3,14
7	Pardo	-0,28	-0,56	-0,10	1,22	2,36	2,15	1,65	0,73	-0,32	-0,06	0,39	-0,21	-0,89	-1,32	-1,90	-2,09	-1,57	-0,32	0,57	-0,17	-1,78	-1,85
10	Pari/Novo	-3,59	-3,95	-3,47	-1,88	-0,43	-0,83	-1,54	-2,36	-3,46	-3,25	-2,96	-3,58	-4,17	-4,75	-5,44	-5,63	-5,07	-3,80	-2,88	-3,67	-5,55	-5,77
17	Pirapozinho	-7,40	-7,58	-7,16	-5,21	-3,51	-4,28	-4,80	-5,12	-6,33	-6,60	-6,67	-7,40	-7,98	-8,23	-8,63	-8,95	-8,59	-7,58	-6,92	-7,45	-8,80	-9,27
18	Pirapó	-6,12	-6,25	-6,02	-4,57	-3,38	-3,84	-4,23	-4,51	-5,38	-5,72	-5,85	-6,50	-7,00	-7,01	-7,21	-7,41	-6,96	-6,14	-5,85	-6,24	-7,11	-7,49
21	Santo Anastácio	-7,20	-7,35	-6,86	-4,86	-3,05	-3,83	-4,45	-4,86	-6,14	-6,28	-6,26	-6,99	-7,60	-8,00	-8,49	-8,84	-8,56	-7,52	-6,71	-7,27	-8,81	-9,31
3	Taquari	1,57	1,44	1,77	2,86	3,70	3,45	2,98	2,28	1,59	1,71	2,03	1,46	0,78	0,75	0,63	0,42	0,86	1,89	2,28	1,68	0,73	0,80
22	Tributários Rio Paraná	-1,06	-1,19	-0,83	1,18	2,93	2,33	1,85	1,69	0,79	0,38	-0,01	-1,10	-1,93	-2,16	-2,50	-2,96	-2,75	-1,56	-0,75	-1,33	-2,80	-3,51
6	Turvo	-1,16	-1,49	-0,96	0,57	1,99	1,73	1,08	0,02	-1,20	-0,82	-0,39	-1,03	-1,71	-2,38	-3,13	-3,36	-2,80	-1,39	-0,32	-1,17	-3,21	-3,39
16	Vermelho/Capim	-6,75	-6,91	-6,60	-5,05	-3,77	-4,35	-4,79	-5,06	-5,98	-6,26	-6,35	-6,98	-7,46	-7,55	-7,83	-8,01	-7,58	-6,76	-6,38	-6,82	-7,81	-8,13

4.3 Variação Temporal

No que compete a tendência, o teste de Mann-Kendall não detectou nenhuma tendência temporal significativa no conjunto de dados de armazenamento de água subterrânea para ambos os períodos de 2003 a 2024 (anual) 2003 a 2025 (semestral), no entanto, para a tendência aplicada a análise de pontos emergentes do período com interferência sazonal (Figura 17), a análise apresentou resultado considerando tendência para os agrupamentos, com apenas 5 pontos dos 220 analisados apresentando tendência crescente com 90% de confiança na área correspondente a unidade do Alto Tibagi.

Figura 17. Tendência espaço-temporal dos locais quentes na BHRP, média semestral de 2003 a 2025.



No total 40 pontos apresentaram tendência decrescente com 99% de confiança, correspondendo as áreas da UPHs Turvo, Pardo, Pari/Novo e Capivara, e Alto Paranapanema M.D. Outros 20 pontos apresentaram tendência decrescente com 95% de confiança, correspondendo a unidade Laranja Doce e as transições entre e

Alto Paranapanema M.D. e as unidades Alto Paranapanema M.E. e Taquari, e 14 pontos apresentaram tendência com 90% de confiança nas unidades Alto Paranapanema M.E., Baixo Cinzas, Pirapozinho e Santo Anastácio, sendo a área correspondente ao agrupamento de pontos frios esporádicos e oscilantes, onde alguns dos intervalos são frios ao longo da série, é um indicador de que as oscilações ao longo do período tem sido negativamente mais significativas.

Podemos observar que apesar de em ambos os conjuntos de dados a variação de águas subterrâneas se manter estável ao longo da série histórica, porém ao analisarmos os dados de diferente escala temporal, no conjunto com intervalo semestral tornam-se mais evidentes as perturbações hidrológicas nos processos de perda e recarga considerando variabilidade climática e sazonalidade (Figuras 18 e 19).

Figura 18. Variação do armazenamento de águas subterrâneas nas UPH (2003-2024).

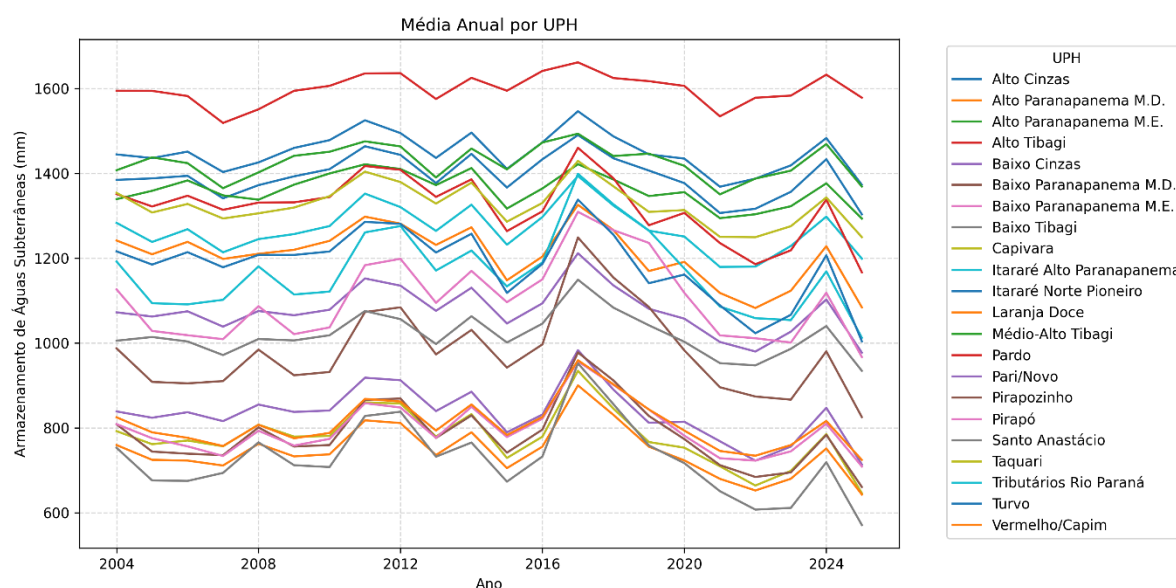
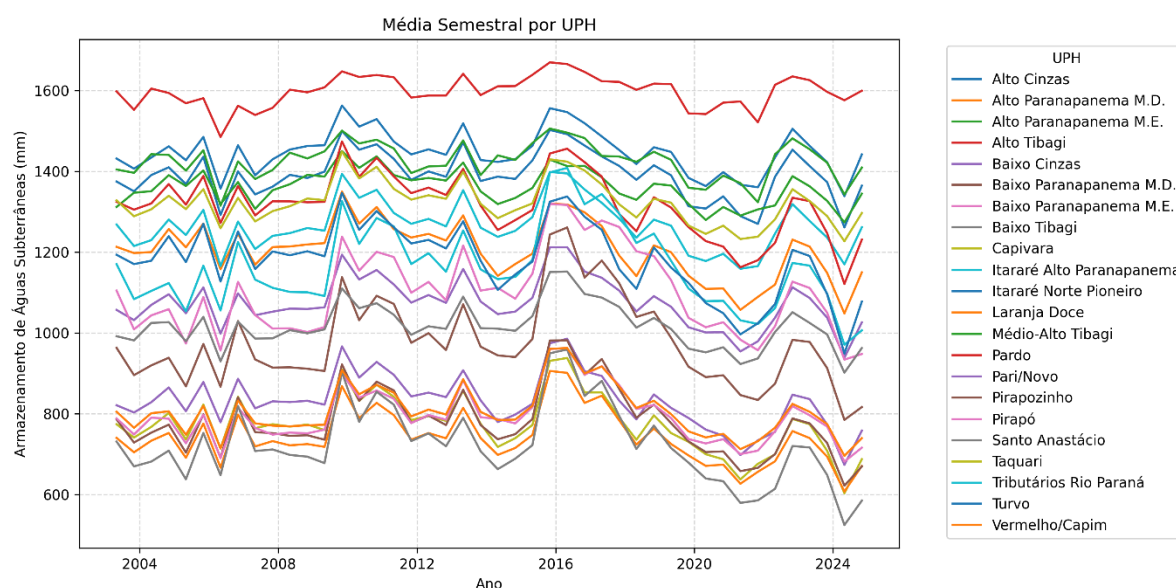


Figura 19. Variação do armazenamento de águas subterrâneas nas UPH (2003-2025).

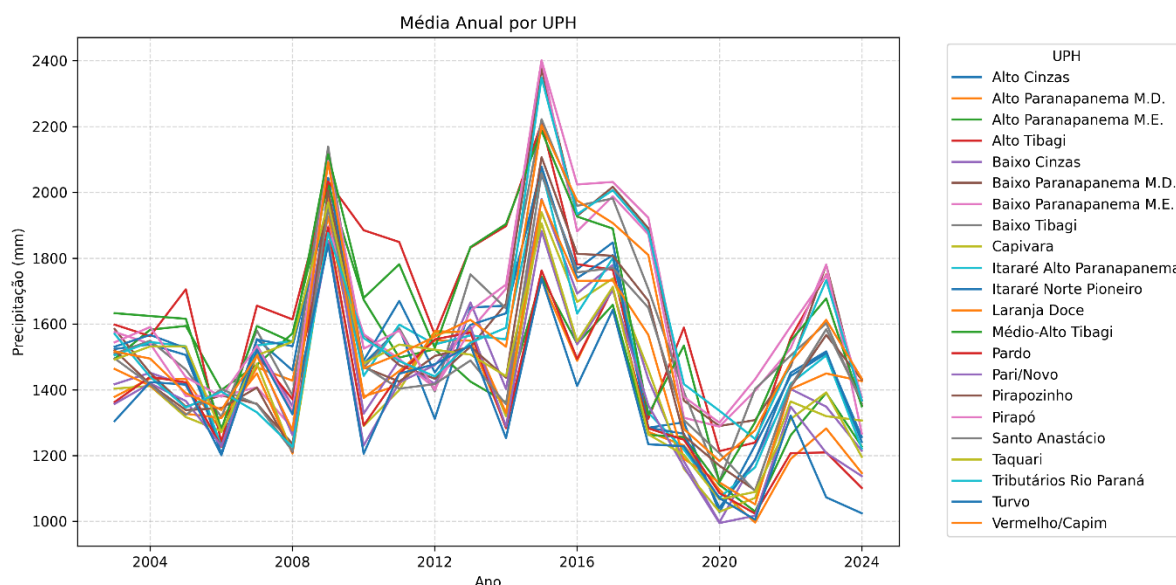


Os valores de variação em anos com menor interferência variam entre 5 e 70 mm tanto para anos de perda como de recarga (Tabela 6), para anos marcados com a presença mais determinante de fenômenos de variabilidade climática observam-se variações negativas mais significativas próximas a um intervalo de 100 mm e para recarga mais significativas de variando entre 100 e 170 mm, podendo variar entre 200 e 250 mm em UPHs como o Baixo Paranapanema M.D, Santo Anastácio e Tributários do Rio Paraná.

Pegando como referência anos como 2009, 2015 e 2023 com períodos correspondentes ao fenômeno de La Niña, para os dois primeiros as variações foram predominantemente superiores a 100mm, variando entre 100 e 234 mm em 2009 e 109 e 258 mm em 2013, para 2023 as recargas foram menos significativas, variando entre 70 e 134 mm.

Podemos observar igual comportamento nos padrões de precipitação (Figura 20), apresentando acumulado de chuva superior ao demais valores da série, variando entre 1600 e 2000 mm para os anos de 2009 e 2013, e uma crescente precipitada em 2023 comparada aos últimos anos, desde 2019, porém de menor amplitude variando entre 1200 e 1800 mm, correspondendo ao menor padrão de recarga subterrânea.

Figura 20. Variação da precipitação nas UPH (2003-2025).



Para períodos correspondentes ao fenômeno El Niño, o conjunto de dados não apresentou variações significativas concomitantes aos períodos de referência, tendo sua amplitude de variação negativa aumentada em anos de maior seca, variando diretamente relacionado ao volume precipitado, porém apresentando maior resiliência a períodos de seca.

Nestes anos de variações mais significativas, observou-se maior estabilidade nos valores das unidades de planejamento Alto Paranapanema M.E., Alto Cinzas, Itararé Norte Pioneiro, Alto Tibagi e Médio-Alto Tibagi com variações menos significativas, com relação as demais unidades mesmo em anos com interferência de variabilidade climática. Para as unidades Alto Paranapanema M.E. e Itararé Norte Pioneiro e Alto Cinzas, Manzione (2023) verificou tendências negativas de precipitação variando entre 20 e 11 mm, no entanto, essas tendências não influenciaram o comportamento das reservas de água subterrânea.

Fator relevante para tomadas de decisão e gestão hídrica quando se considera que a área que corresponde a unidade de gerenciamento do Médio Paranapanema é a que mais possui demandas subterrâneas outorgadas, com um total de 3,45 m³/s, sendo seu maior uso voltado para o abastecimento de irrigação representando 1,26 m³/s, seguido pelo uso de abastecimento humano com 1,07 m³/s

Trabalhos como Frappart (2018), também avaliaram a disponibilidade de águas subterrâneas através de modelos provenientes do conjunto de dados GRACE e reforçam a contribuição destes para interpretações de variações hidrológicas, com

ressalva para a significativa escala temporal, que apresenta disponibilidade de dados com resolução que permite interpretação de mudanças, apesar de sua escala espacial não favorecer detalhamentos com maior precisão para a gestão de água subterrâneas e dinâmicas de aquífero.

Considerando as respostas lentas de muitos sistemas de águas subterrâneas a impactos negativos como mudanças de uso, processos de urbanização, mudanças no regime de águas superficiais e ciclos climáticos de longo prazo, e como variações interferem nas estimativas de recarga de águas subterrâneas, (FOSTER, CHILTON, 2003) o estabelecimento de tendências temporais frequentemente requer monitoramento por décadas afim de diminuir a incerteza na quantificação dos componentes hidrológicos através do acompanhamento das respostas lentas que os aquíferos podem sofrer mediante a essas mudanças (CHILTON, FOSTER, 2024).

Em De Brito (2020) observa-se associação entre a relação na recarga de águas subterrâneas e no volume precipitado, em estudo aplicado na Amazonia, com maior amplitude de variação e interferência devido aos padrões climáticos e geológicos da região, com observados impactos de eventos interanuais.

Considerando a influência da precipitação na recarga dos aquíferos, devem ser observadas as repostas de interação entre os fenômenos considerando que a bacia vem apresentando significativos pontos de mudança no regime de precipitação e na sua distribuição sobre o território desde o ano de 2012, considerando o período de análise de 2000 a 2021 em Manzione (2023).

Tabela 6. Variação entre períodos - relação de perda e recarga de águas subterrâneas com relação ao semestre anterior

(continua)

Unidades de Planejamento Hídrico	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013	
	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	
Alto Paranapanema M.D.	-15,4	2,5	56,9	-45,1	58,9	-113,2	87,9	-76,4	43,4	1,5	5,0	3,3	127,5	-79,2	41,0	-54,7	-20,8	9,0	-16,4	62,1	-94,7	
Alto Paranapanema M.E.	35,3	3,7	39,7	-26,7	38,3	-83,1	54,3	-66,2	46,1	14,9	23,2	-4,1	63,0	-41,5	28,4	-46,1	-13,2	5,9	-6,5	44,6	-71,3	
Itararé Alto Paranapanema	-53,2	14,5	50,9	-38,1	62,0	-139,0	110,1	-67,8	32,5	6,9	12,6	-6,6	140,5	-59,2	19,9	-57,3	-26,9	12,2	-18,5	89,6	-92,8	
Taquari	-39,4	17,2	33,4	-32,9	49,4	-96,9	75,3	-58,3	25,5	12,1	19,0	-4,3	120,4	-66,3	28,8	-54,6	-26,6	10,7	-8,7	66,7	-79,1	
Capivara	-33,0	26,4	34,3	-65,5	86,4	-108,2	127,3	-77,8	10,1	-5,9	5,1	-13,7	150,2	-78,2	40,2	-29,6	-57,6	10,0	-12,1	74,2	-81,5	
Pardo	-19,4	15,3	48,0	-50,9	70,9	-116,3	91,5	-72,7	35,0	-0,3	-2,1	0,7	149,8	-87,5	46,9	-46,0	-41,3	13,6	-18,3	64,5	-90,6	
Pari/Novo	-17,9	25,4	36,5	-58,7	72,2	-99,7	107,6	-73,0	17,3	-1,9	3,2	-9,6	144,1	-77,2	38,9	-31,9	-53,5	9,3	-11,0	66,5	-74,4	
Turvo	-23,1	8,3	60,7	-64,0	94,6	-142,8	123,8	-92,8	43,6	-9,5	10,0	-12,5	156,8	-91,3	46,6	-40,3	-40,0	8,9	-21,1	67,0	-97,3	
Baixo Paranapanema M.D.	-67,7	24,1	18,9	-70,8	104,9	-105,9	162,7	-95,2	-20,1	0,8	-3,6	-5,7	232,4	-106,5	60,4	-20,2	-96,2	23,8	-41,5	113,0	-104,8	
Laranja Doce	-35,8	28,6	19,2	-61,5	84,9	-109,3	131,5	-78,8	13,1	-10,5	3,2	-6,9	150,0	-78,9	37,7	-30,4	-60,6	16,2	-12,9	75,4	-74,7	
Pirapozinho	-57,4	24,5	19,8	-69,1	94,6	-107,8	150,1	-86,1	-2,7	-6,6	1,5	-11,0	186,2	-89,8	47,2	-21,5	-80,3	18,0	-23,5	87,4	-87,3	
Santo Anastácio	-61,6	12,0	27,0	-70,7	114,5	-104,5	171,5	-111,7	3,9	-13,6	-4,2	-16,0	224,8	-122,7	74,5	-31,9	-90,1	19,0	-31,8	70,2	-82,6	
Tributários Rio Paraná	-86,7	20,3	19,5	-69,7	112,7	-110,8	169,4	-93,1	-20,2	-10,2	-0,8	-9,3	234,9	-106,0	64,2	-20,9	-93,1	26,9	-45,9	102,2	-96,2	
Alto Cinzas	-24,1	40,2	19,2	-41,5	67,5	-144,2	107,9	-56,7	19,2	29,1	-7,8	15,9	100,0	-45,9	13,4	-36,1	-52,0	20,8	-13,2	85,5	-96,0	
Baixo Cinzas	-25,3	37,6	26,4	-47,0	64,0	-114,6	99,8	-54,0	8,8	7,5	-0,9	4,2	130,2	-61,4	23,6	-35,8	-45,0	18,8	-19,3	83,9	-80,6	
Itararé Norte Pioneiro	-25,0	27,5	27,8	-34,4	57,7	-128,1	107,3	-74,1	39,6	24,2	8,7	2,0	98,1	-52,0	18,5	-55,5	-31,8	12,5	-13,6	77,9	-90,8	
Alto Tibagi	-45,6	52,5	-10,9	-25,4	12,4	-96,0	77,3	-22,8	17,7	44,9	-6,5	12,2	39,6	-13,8	4,9	-5,6	-50,2	5,0	0,0	53,7	-52,6	
Baixo Tibagi	-10,3	43,1	2,2	-47,3	60,2	-109,9	98,2	-42,0	0,6	20,3	-7,8	9,7	101,2	-48,8	12,3	-28,5	-49,7	21,1	-6,4	79,6	-77,9	
Médio-Alto Tibagi	-8,3	46,0	-1,8	-38,8	50,5	-137,3	109,7	-43,6	22,6	42,6	-14,2	17,6	51,2	-31,7	9,4	-21,7	-60,8	16,3	1,7	62,6	-85,8	
Baixo Paranapanema M.E.	-96,1	34,6	15,3	-85,0	115,3	-132,7	170,0	-82,0	-33,6	0,8	-9,3	12,4	223,8	-84,2	46,5	-12,8	-88,4	26,8	-45,5	135,6	-111,6	
Pirapó	-39,7	41,5	-2,6	-60,8	70,6	-107,5	125,0	-50,2	-16,5	5,0	-1,9	9,2	139,1	-60,0	17,7	-20,3	-60,3	20,2	-11,8	98,0	-91,7	
Vermelho/Capim	-39,9	36,1	4,7	-58,0	71,4	-105,6	118,7	-56,2	-5,8	-1,5	2,4	1,4	134,8	-59,4	23,4	-19,6	-58,5	16,8	-12,2	87,3	-80,7	

(conclusão)

Unidades de Planejamento Hídrico	2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024	
	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.	1º sem.	2º sem.
Alto Paranapanema M.D.	-54,9	29,2	25,7	123,5	-1,8	-19,5	-34,2	-72,9	-50,9	76,2	-16,9	-58,0	-32,8	1,1	-52,9	32,0	30,5	111,3	-17,4	-65,0	-100,4	101,9
Alto Paranapanema M.E.	-31,5	15,1	24,7	70,1	-15,9	0,4	-28,2	-40,1	-15,6	39,8	-4,5	-45,3	-39,9	32,1	-21,3	15,3	9,8	72,5	-25,2	-36,0	-53,2	71,1
Itararé Alto Paranapanema	-22,7	14,9	34,0	111,8	-3,7	-39,7	-33,0	-39,2	-47,0	44,7	-14,9	-74,4	-13,1	17,9	-37,1	6,6	80,5	72,9	-41,7	-41,2	-66,2	91,8
Taquari	-35,5	19,7	16,7	109,1	-5,7	-22,0	-34,7	-48,9	-32,6	46,2	-9,5	-56,6	-20,7	20,3	-33,1	5,9	42,9	74,6	-29,3	-37,2	-62,2	69,9
Capivara	-57,2	21,6	32,7	158,8	7,0	-85,3	0,2	-62,2	-55,0	60,4	-43,8	-21,7	-30,7	-12,4	-49,8	38,5	23,4	87,7	-13,1	-65,7	-105,2	84,5
Pardo	-60,5	24,5	25,1	139,8	11,9	-33,4	-35,8	-92,6	-42,6	84,1	-25,6	-48,3	-34,7	-13,7	-51,2	17,5	42,8	111,8	-8,4	-79,2	-125,7	109,8
Pari/Novo	-53,7	18,3	26,8	149,7	11,3	-80,5	-11,7	-61,0	-46,3	61,7	-33,4	-24,9	-28,8	-15,2	-47,8	36,4	20,9	92,0	-10,9	-63,0	-99,7	84,7
Turvo	-72,3	38,1	31,8	148,3	12,8	-50,3	-32,1	-97,7	-48,4	102,3	-49,7	-37,8	-50,1	-25,0	-52,3	27,4	47,6	134,2	-15,4	-94,7	-146,5	128,6
Baixo Paranapanema M.D.	-21,6	-4,2	44,7	258,6	17,4	-123,7	41,8	-56,2	-83,3	13,4	-64,8	-71,7	-25,8	4,6	-49,0	-12,3	40,5	108,5	-5,4	-64,6	-128,2	31,7
Laranja Doce	-41,8	17,1	32,2	158,4	-4,7	-74,4	17,9	-61,3	-59,7	39,5	-38,0	-28,3	-25,9	3,1	-47,2	29,4	26,0	74,9	-17,5	-45,8	-86,3	63,4
Pirapozinho	-35,3	12,7	37,5	194,2	0,7	-85,7	39,3	-74,1	-71,3	32,7	-46,0	-45,2	-26,5	1,9	-48,9	8,1	34,1	88,3	-12,3	-48,5	-105,6	47,7
Santo Anastácio	-44,3	25,9	33,5	227,4	9,5	-115,1	37,2	-86,5	-81,8	57,8	-55,6	-36,0	-39,3	-6,7	-53,7	6,1	28,7	105,9	-3,6	-68,0	-123,9	60,4
Tributários Rio Paraná	-24,4	5,6	42,1	216,3	11,4	-89,9	25,1	-48,2	-73,0	23,3	-67,2	-68,7	-31,4	1,0	-48,3	-9,2	39,3	111,8	-6,7	-69,0	-126,7	35,6
Alto Cinzas	10,9	-5,7	46,0	75,2	-10,4	-28,1	-27,0	-23,5	-34,3	35,9	-24,7	-76,8	-5,6	30,2	-48,8	-19,3	116,7	66,8	-40,5	-39,7	-112,0	103,3
Baixo Cinzas	-31,2	6,2	34,2	125,1	0,1	-60,2	-15,5	-31,9	-51,5	37,9	-26,3	-50,8	-12,8	0,6	-47,6	25,1	58,4	75,2	-26,4	-48,7	-99,3	87,7
Itararé Norte Pioneiro	-4,6	6,8	33,0	93,1	-9,7	-27,5	-32,6	-33,7	-34,6	41,5	-11,6	-64,2	-20,3	34,5	-31,0	-6,4	73,8	70,9	-42,2	-40,4	-84,1	103,5
Alto Tibagi	21,7	0,6	27,8	30,9	-4,3	-19,5	-23,0	-1,7	-19,6	15,3	-1,0	-72,6	-1,7	28,2	3,0	-51,5	92,7	20,7	-9,3	-28,9	-20,8	23,6
Baixo Tibagi	-1,4	-5,2	36,5	109,0	1,1	-55,4	-8,9	-23,1	-51,3	24,1	-27,4	-48,7	-9,1	12,6	-41,6	13,9	65,6	48,8	-26,6	-28,4	-94,6	61,0
Médio-Alto Tibagi	48,9	-11,3	41,9	35,6	-10,1	-13,4	-44,2	-1,5	-12,9	24,8	-20,0	-69,1	-4,8	34,8	-18,6	-47,3	118,8	39,2	-27,0	-33,1	-78,8	66,6
Baixo Paranapanema M.E.	6,7	-26,8	61,8	172,8	-2,9	-61,7	23,4	-16,0	-59,9	-11,9	-59,3	-93,5	-23,4	12,5	-43,3	-26,0	59,5	110,2	-15,8	-60,9	-116,3	14,0
Pirapó	-4,6	-10,8	40,0	143,9	2,5	-65,8	21,1	-47,2	-58,9	10,3	-32,6	-52,0	-10,8	10,5	-37,0	8,7	48,0	62,1	-22,6	-27,8	-86,9	34,7
Vermelho/Capim	-20,5	1,3	34,3	140,8	2,1	-62,7	17,0	-50,0	-52,7	17,8	-33,0	-42,7	-15,1	9,0	-38,0	19,8	33,4	58,9	-19,7	-30,3	-78,6	43,7

4.4 Contribuição para a gestão

Syed (2008), reforça ainda que com mais expressiva série histórica do monitoramento tanto os dados GRACE quanto GLDAS, se tornarão ferramentas ainda mais poderosas no monitoramento de armazenamento de águas subterrâneas, uma vez que trarão cada vez melhor compreensão às respostas de mudanças e variabilidade climática.

O conhecimento sobre a variação e a dinâmica das águas subterrâneas apoia gestores e tomadores de decisão na adoção de estratégias sustentáveis de gestão hídrica, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Em especial, contribui para as metas do ODS 6, que buscam ampliar a eficiência no uso da água (6.4), implementar a gestão integrada dos recursos hídricos (6.5) e proteger ecossistemas associados à água (6.6). Além disso, a integração desse conhecimento às políticas climáticas fortalece o ODS 13, ao favorecer a resiliência frente a desastres naturais (13.1) e a incorporação das águas subterrâneas no planejamento nacional (13.2).

Para que estes dados possam ser consultados quanto a variação no armazenamento e os padrões e tendências apresentados em águas subterrâneas nos últimos 21 anos, o aplicativo GSDAS – PPRB está disponível através do link: <https://experience.arcgis.com/experience/a6a7ceadd0284f85b860010d9eb2a04b/> ; um tutorial para melhor utilização das funções disponíveis dentro do ambiente virtual pode ser consultado no APÊNDICE B e todos os dados e documentação do aplicativo se encontram disponibilizados através de repositório <https://doi.org/10.5281/zenodo.19432461>.

Todas as camadas possuem orientação dentro das caixas de informação do aplicativo, com seu devido detalhamento em texto considerando a função de representar o conteúdo nele presente, as camadas possuem diversas formas de interação de modo a acessibilizar de forma dinâmica as informações construídas.

O aplicativo se propõe a servir como ferramenta para uma gestão integrada, na qual, os usuários possam acessar informações específicas sobre pontos de disponibilidade hídrica em áreas de interesse

O monitoramento dos aquíferos permite orientar concessões de outorgas, definir áreas prioritárias de exploração sustentável e ajustar instrumentos de gestão, como a cobrança pelo uso da água, de acordo com a distribuição espacial da disponibilidade e as tendências observadas ao longo do tempo considerando variabilidade climática, e ferramentas de sensoriamento remoto podem contribuir para uma abrangente interpretação de variáveis ambientais.

5. CONCLUSÃO

Conclui-se que o armazenamento de água subterrânea na Bacia Hidrográfica do Paranapanema apresentou reservas estáveis de 2003 ao primeiro semestre de 2025, observa-se a partir da análise que quando menor a escala temporal de análise maior o detalhamento que pode ser observado referente quanto ao comportamento do volume de armazenamento de águas subterrâneas e suas interações com os demais elementos do ciclo hidrológico.

Considerando as limitações dos dados de sensoriamento remoto podemos ressaltar a limitação em escala espacial que impede maior detalhamento das áreas, reforça-se ainda a importância de associação da fonte de dados GLDAS com demais variáveis do ciclo hidrológico e de informações de poços quando disponíveis como material suplementar a avaliação de recarga considerando as incertezas do modelo para melhor interpretação dos padrões apresentados e da amplitude de variação no armazenamento.

Os pontos críticos com altos valores, próximos a 1500 mm de armazenamento estão na porção sudeste da região (cabeceiras), enquanto os pontos frios com baixos valores próximos a 700 mm de armazenamento estão na porção oeste da bacia (saída), formando agrupamentos de disponibilidade que dialogam com características físicas da bacia.

Foi detectada a presença de tendências temporais a partir da análise do agrupamento de pontos emergentes, com maior significância decrescente predominantemente na região correspondente a unidades de planejamento do Turvo, Pardo, Pari/Novo e Capivara, e Alto Paranapanema M.D., com redução de baixa amplitude entre os anos de 2016 à 2022 para toda a bacia.

As evidências sobre o comportamento do armazenamento na bacia do Paranapanema confirmaram a resiliência das reservas de águas subterrâneas mediante a eventos climatológicos que impactam corpos d'água superficiais, apesar de apresentar respostas diretas as variações do ciclo hidrológicos, estes são de baixa magnitude, com mais significativas alterações de recarga do que de perda no armazenamento.

A metodologia empregada também se mostra de grande utilidade para avaliação da disponibilidade hídrica aplicadas a águas, considerando padrões e

variações espaço-temporais, podendo também ser aplicada em outras variáveis ambientais para a análise de transformações do meio, reforçando a importância da utilização de análises estatísticas como ferramentas de planejamento e gestão.

E sendo, por fim, a principal limitação da metodologia o acesso e visualização dos dados dispostos, a produção do aplicativo se dá na tentativa de disponibilização de informação de forma democrática à gestão, sendo uma ferramenta com potencial de contribuição para avaliação da disponibilidade hídrica da bacia, oferecendo para a governança de recursos hídricos produções técnico científicas mais acessíveis a interpretação da comunidade.

6. REFERÊNCIAS

- ALI, Shoaib et al. Improving the resolution of GRACE data for spatio-temporal groundwater storage assessment. **Remote Sensing**, v. 13, n. 17, p. 3513, 2021.
- ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. UGRHI Paranapanema: diagnóstico, caracterização físico-biótica, dinâmica socioeconômica, uso do solo e eventos críticos. Brasília, DF, 2014.
- ANSELIN, Luc. Exploratory spatial data analysis and geographic information systems. **New tools for spatial analysis**, v. 17, p. 45-54, 1994.
- ANSELIN, Luc. Local indicators of spatial association—LISA. **Geographical analysis**, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995.
- ANSELIN, L. **Spatial Econometrics: Methods and Models**. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- ANSELIN, Luc; SYABRI, Ibnu; KHO, Youngihn. GeoDa: an introduction to spatial data analysis. In: **Handbook of applied spatial analysis: Software tools, methods and applications**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. p. 73-89.
- ANSELIN, Luc; REY, Sergio J. Modern spatial econometrics in practice: A guide to GeoDa, GeoDaSpace and PySAL. 2014.
- ARCGIS. Create Space Time Cube From Multidimensional Raster Layer. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.0/tool-reference/space-time-pattern-mining/createcubefrommdrasterlayer.htm>. Acesso em: 22 jun. 2024.
- BACH, Benjamin et al. A review of temporal data visualizations based on space-time cube operations. In: **Eurographics Conference on Visualization**, 2014.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos.
- BRIZOTTI, C. S.; MANZIONE, R. L. **Groundwater Storage Data Analysis at a Spatio-temporal scale - Paranapanema River Basin Web Application**. [S. l.]: Zenodo, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19432461>. Acesso em: 7 abr. 2026.

CARDOSO, Jéssica Pires; MARTINS, Rodrigo Constante. DISPUTAS CIENTÍFICAS E POLÍTICAS NA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: perspectivas globais e locais. **Caderno CRH**, v. 38, p. e025002, 2025.

CHILTON, John; FOSTER, Stephen. Long datasets for improved understanding, management and protection of groundwater. **Hydrogeology Journal**, v. 32, n. 2, p. 347-352, 2024.

CHENG, T.; WILLIAMS, Dawn. Space-time analysis of crime patterns in central London. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 39, p. 47-52, 2012.

CUSTODIO, E. Aquifer overexploitation: What does it mean? **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 2, p. 254-277, 2002.

DE BRITO, A. P. et al. Relação entre precipitação e recarga de águas subterrâneas na Amazônia Central. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 1, p. 39-49, 2020.

DÖLL, Petra et al. Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. **Water Resources Research**, v. 50, n. 7, p. 5698-5720, 2014.

ESRI. How Create Space Time Cube works. ArcGIS Pro | Documentation. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/space-time-pattern-mining/learnmorecreatecube.htm>. Acesso em: 18 set. 2024.

FRAPPART, Frédéric; RAMILLIEN, Guillaume. Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 829, 2018.

FEITOSA, Fernando A. Carneiro et al. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. CPRM, 2008.

FERNANDES, Luciana Cordeiro de Souza; OLIVEIRA, Everton de (org.). Coletânea da Legislação de Águas Subterrâneas do Brasil: Volume 1 – Região Sudeste. São Paulo: Instituto Água Sustentável, 2018. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/items/8f8e1679-f816-4dd2-b15d-b4aa1b2b0fe1/full>. Acesso em: 22 jan. 2025.

FOSTER, S. S. D.; CHILTON, P. J. Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 358, n. 1440, p. 1957-1972, 2003.

GETIRANA, Augusto; KUMAR, Sujay; RODELL, Matthew. Inconsistencies in GRACE-based groundwater storage estimation—A call for a proper use of land surface models. **Geophysical Research Letters**, v. 52, n. 19, p. e2025GL119197, 2025.

GILLIES, Sean; PERKINS, Howard; WIECZOREK, Rene et al. Shapely: manipulation and analysis of geometric objects. **toblerity.org** 2007. Disponível em: <https://shapely.readthedocs.io>. Acesso em: 20 ago. 2025.

GREEN, Timothy R. et al. Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. **Journal of Hydrology**, v. 405, n. 3-4, p. 532-560, 2011.

GÜNTNER, A. Improvement of global hydrological models using GRACE data. **Surveys in Geophysics**, v. 29, n. 4-5, p. 375-397, 2008.

HARRIS, Charles R. et al. Array programming with NumPy. **Nature**, v. 585, p. 357-362, 2020. Disponível em: <https://numpy.org>.

HAMED, K. H.; RAO, A. R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. **Journal of Hydrology**, v. 204, n. 1-4, p. 182-196, 1998.

HENRY, Chris M.; ALLEN, Diana M.; HUANG, Jianliang. Groundwater storage variability and annual recharge using well-hydrograph and GRACE satellite data. **Hydrogeology Journal**, v. 19, n. 4, p. 741-755, 2011.

HUFFMAN, G. J. et al. (2023). GPM IMERG Final Precipitation L3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree V07. Greenbelt, MD: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Disponível em: <https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-MONTH/07>. Acesso em: 19 abr. 2025.

HEALY, R.; SCANLON, B. **Estimating Groundwater Recharge**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. doi:10.1017/CBO9780511780745.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:[10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896).

JOODAKI, Gholamreza; WAHR, John; SWENSON, Sean. Estimating the human contribution to groundwater depletion in the Middle East, from GRACE data, land surface models, and well observations. **Water Resources Research**, v. 50, n. 3, p. 2679-2692, 2014.

JUNIOR, Ailton Leonel Balduino et al. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a preservação ambiental no Brasil. **Revista DCS**, v. 22, n. 81, p. e3136-e3136, 2025.

KENDALL, Maurice G. Rank Correlation Methods. 5. ed. London: Charles Griffin, 1990.

LI, B.; BEAUDOING, H.; RODELL, M.; NASA/GSFC/HSL. GLDAS Catchment Land Surface Model L4 daily 0.25 x 0.25 degree GRACE-DA1 V2.2. Greenbelt, Maryland, USA: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/TXBMLX370XX8>. Acesso em: 22 mar. 2024.

LI, B. et al. Global GRACE data assimilation for groundwater and drought monitoring: advances and challenges. **Water Resources Research**, v. 55, n. 9, p. 7564-7586, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018WR024618>.

LIU, Xiaojie et al. Quantifying the spatiotemporal dynamics and impact factors of China's county-level carbon emissions using ESTDA and spatial econometric models. **Journal of Cleaner Production**, v. 410, p. 137203, 2023.

LONGLEY, Paul A. et al. New developments in geographical information systems; principles, techniques, management and applications. **Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications**, p. 404, 2005.

MMA; IBAMA. Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite: monitoramento do bioma Mata Atlântica 2002 a 2008. Acordo de Cooperação Técnica MMA/IBAMA, 2010.

MMA; IBAMA. Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite: monitoramento do bioma Cerrado 2008-2009. Acordo de Cooperação Técnica MMA/IBAMA, 2011a.

MACIEJEWSKI, Ross. Geovisualization. In: **Handbook of Regional Science**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. p. 1651-1670.

MANZIONE, Rodrigo Lilla. **Águas Subterrâneas: conceitos e aplicações sob uma visão multidisciplinar**. Jundiaí: Paco Editorial, 2015.

MANZIONE, R. L. Detection of spatial and temporal precipitation patterns using remotely sensed data in the Paranapanema River Basin, Brazil from 2000 to 2021. **Discover Water**, v. 3, p. 11, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43832-023-00035-z>.

MANZIONE, R. L. Interpretation of land use and land cover changes at different classification levels: the Paranapanema River Basin - Brazil case. In: FUZZO, D. F. S. et al. (org.). **Earth Observation for Monitoring and Modeling Land Use**. Amsterdam: Elsevier, 2024. eBook ISBN: 9780323951944.

MANZIONE, R. L.; BRIZOTTI, C. S. Spatial clusters and temporal trends of groundwater storage in the Paranapanema River Basin, Brazil. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 30, p. 101453, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101453>.

MANN, Henry B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica: Journal of the econometric society**, p. 245-259, 1945.

MEIJERINK, Allard MJ et al. **Remote sensing applications to groundwater**. Paris: Unesco, 2007.

ONU BRASIL. Indicadores brasileiros para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2022. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/>.

ORD, J. K.; GETIS, A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 4, p. 286-306, 1995.

PLANO INTEGRADO DE RECURSOS HÍDRICOS (PIRH). Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema (PIRH Paranapanema). Brasília, 335 p., 2016.

CONICELLI, Bruno; HIRATA, Ricardo. Novos paradigmas na gestão das águas subterrâneas. **Águas subterrâneas:(São Paulo)**, p. 1-18, 2017.

PHILANDER, S. George. **El Niño, La Niña, and the southern oscillation**. San Diego: Academic Press, 1990. International Geophysics, v. 46.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. re — Regular expression operations. [S. l.]: Python, [s.d.]. Disponível em: <https://docs.python.org/3/library/re.html>. Acesso em: 19 mar. 2025.

RASTERIO: access to geospatial raster data. Versão 1.4.4. Mapbox, 2025.

Disponível em: <https://rasterio.readthedocs.io/>.

REBOUÇAS, Aldo da C. et al. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3. ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006.

REY, Sergio J. Spatial dynamics and space-time data analysis. In: **Handbook of Regional Science**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. p. 2017-2034.

RODELL, M. et al. The Global Land Data Assimilation System. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 85, n. 3, p. 381-394, 2004. DOI: 10.1175/BAMS-85-3-381.

RODELL, M.; VELICOGNA, I.; FAMIGLIETTI, J. S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. **Nature**, v. 460, n. 7258, p. 999-1002, 2009.

SCANLON, Bridget R. et al. Hydrologic implications of GRACE satellite data in the Colorado River Basin. **Water Resources Research**, v. 51, n. 12, p. 9891-9903, 2015.

SCANLON, Bridget R. et al. Effects of climate and irrigation on GRACE-based estimates of water storage changes in major US aquifers. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 9, p. 094009, 2021.

SCANLON, B. R.; LONGUEVERGNE, L.; LONG, D. Ground referencing GRACE satellite estimates of groundwater storage changes in the California Central Valley, USA. **Water Resources Research**, v. 48, W04520, 2012. doi:10.1029/2011WR011312.

SEE, Linda. Web-based tools for exploratory spatial data analysis. In: **Handbook of Regional Science**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. p. 1671-1689.

SINGH, Gurpreet; SOMAN, Biju; GROVER, Gagandeep Singh. Exploratory Spatio-Temporal Data Analysis (ESTDA) of Dengue and its association with climatic, environmental, and sociodemographic factors in Punjab, India. **Ecological Informatics**, v. 75, p. 102020, 2023.

SOUZA, C. M. et al. 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.

TAPLEY, B. D. et al. The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 9, L09607, 2004.

TAPLEY, Byron D. et al. Contributions of GRACE to understanding climate change. **Nature climate change**, v. 9, n. 5, p. 358-369, 2019.

TAYLOR, Richard G. et al. Ground water and climate change. **Nature climate change**, v. 3, n. 4, p. 322-329, 2013.

THE PANDAS DEVELOPMENT TEAM. pandas documentation. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/>.

TUCCI, Carlos E. et al. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2007.

TUKEY, J. W. Exploratory Data Analysis. **Reading/Addison-Wesley**, 1977.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. The Water Cycle. Reston, VA: USGS, 2022. Disponível em: <https://www.usgs.gov/>. Acesso em: 13 set. 2025.

VILLAR, Pilar Carolina; HIRATA, Ricardo. Groundwater Governance and the Construction of Legal Indicators for Brazilian States. **Ambiente & Sociedade**, v. 25, p. e00371, 2022.

VERMA, Kaushlendra; KATPATAL, Yashwant B. Groundwater monitoring using GRACE and GLDAS data after downscaling within basaltic aquifer system. **Groundwater**, v. 58, n. 1, p. 143-151, 2020.

WASSERMAN, Jordannah; GARDNER, Kelly; KOHLER, Jonas et al. GeoPandas: Python tools for geographic data. 2021. Disponível em: <https://geopandas.org>. Acesso em: 20 ago. 2025.

WATKINS, M. M. et al. Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 120, n. 4, p. 2648-2671, 2015. <https://doi.org/10.1002/2014JB011547>.

WIESE, D. N. et al. JPL GRACE Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height Release 06 Coastal Resolution Improvement (CRI) Filtered Version 1.0. Ver. 1.0. PO.DAAC, CA, USA, 2018.

WIESE, D. N.; LANDERER, F. W.; WATKINS, M. M. Quantifying and reducing leakage errors in the JPL RL05M GRACE mascon solution. **Water Resources Research**, v. 52, p. 7490–7502, 2016. doi:10.1002/2016WR019344.

WINTER, Thomas C.; HARVEY, Judson W.; FRANKE, O. Lehn; ALLEY, William M. **Ground Water and Surface Water: A Single Resource**. Denver: U.S. Geological Survey, 1998. (Circular, 1139).

WU, Qifan et al. Determining regional-scale groundwater recharge with GRACE and GLDAS. **Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 154, 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Roteiro (script) para pré-processamento dos dados

Libraries

```
!pip install rasterio pandas numpy
```

Imports

```
import rasterio
```

```
import pandas as pd
```

```
import numpy as np
```

```
import os
```

```
import glob
```

```
import re
```

```
from google.colab import drive
```

Google Drive

```
drive.mount('/content/drive')
```

Path to folder

```
folder_rasters = "/content/drive/MyDrive/lmerg_GEE"
```

Path to output file

```
folder_out = "/content/drive/MyDrive/lmergOut"
```

Output file name

```
name_out = "saida_lmerg2024.csv"
```

Regex - extract the year

```
regex_time = re.compile(r"(\d{8})-(\d{8})")
```

List files

```
files_tif = sorted(glob.glob(os.path.join(folder_rasters, "*.tif")))
```

List to store data

```
all_data = []
```

```
id_global = 1
```

for path in files_tif:

```
    nome = os.path.basename(path)
```

```
    match = regex_time.search(nome)
```

if not match:

```
        print(f"[AVISO] Data não encontrada em: {nome}")
```

```
        continue
```

```
    date_str = match.group(1)
```

```
    date_time = f"{date_str[:4]}-{date_str[4:6]}-{date_str[6:]} 12:00:00"
```

with rasterio.open(path) as src:

```
        band = src.read(1).astype(float)
```

```
        transform = src.transform
```

```
        nodata = src.nodata
```

```
        for row in range(band.shape[0]):
```

```

for col in range(band.shape[1]):
    valor = band[row, col]
    if nodata is not None:
        is_valid = valor != nodata and not np.isnan(valor)
    else:
        is_valid = not np.isnan(valor)

    if is_valid:
        x, y = rasterio.transform.xy(transform, row, col, offset='center')
        all_data.append([id_global, x, y, valor, date_time])
        id_global += 1

# Create DataFrame
df = pd.DataFrame(all_data, columns=["id", "x", "y", "valor", "data_hora"])

# Check output folder
os.makedirs(folder_out, exist_ok=True)

# Save CSV
caminho_saida = os.path.join(folder_out, name_out)
df.to_csv(caminho_saida, index=False, sep=';')

print(f"\nCSV exported to: {caminho_saida}")

```

APÊNDICE B – Tutorial – Visualização dos dados em aplicativo (Experience Builder) no ArcGIS Online

O aplicativo foi desenvolvido para fornecer aos usuários informações espaço-temporais sobre a disponibilidade de água subterrânea na bacia do rio Paranapanema. Ele apresenta informações sobre os valores totais de armazenamento de água subterrânea em milímetros (mm) para o período de 2003 a 2025, juntamente com estatísticas associadas à análise de pontos quentes e frios emergentes e tendências espaço-temporais na bacia.

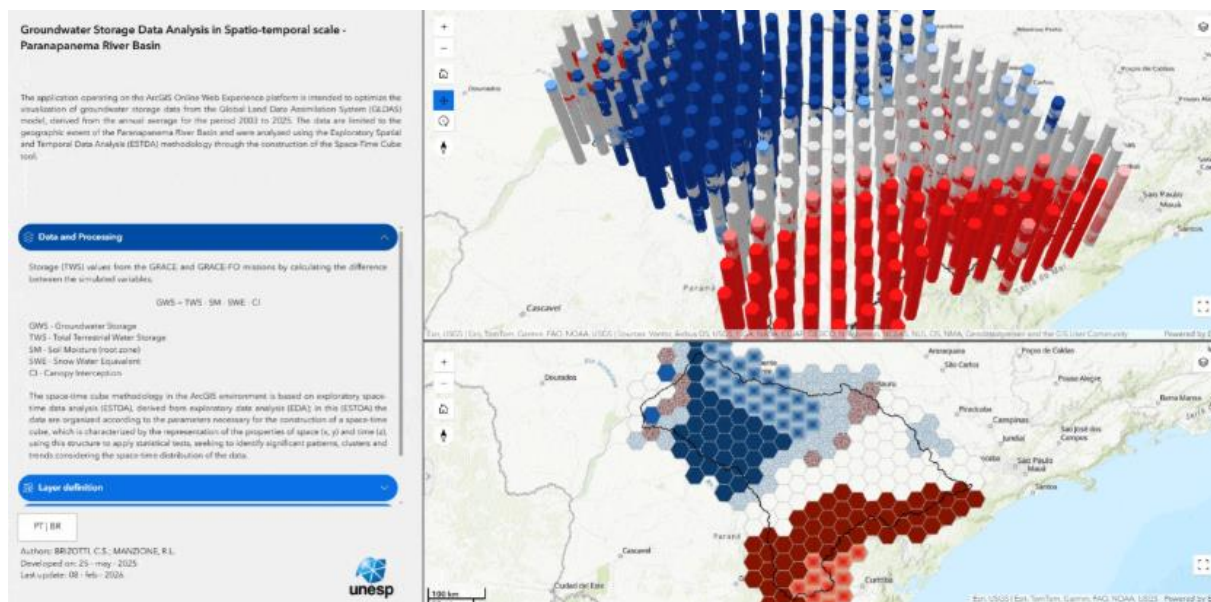
Explore as seções a seguir para entender a estrutura do conteúdo e utilizar plenamente os recursos desta ferramenta.

1. Visão geral da interface

Ao acessar o aplicativo, utilize os painéis expansíveis na barra lateral esquerda para obter informações completas sobre o projeto. Esta seção fornece informações

detalhadas sobre a metodologia de dados, camadas de mapa e trabalhos associados (Figura A.1).

Figura A.1 – Interface do Experience Builder.



2. Ferramentas de Navegação e Controle

Os mapas apresentam ferramentas de navegação localizadas na interface:

Zoom (Aumentar/Diminuir): Controla o nível de ampliação, também acessível pela roda de rolagem do mouse.

Extensão Padrão (Início): Retorna à visualização inicial do mapa.

Navegação 3D (Panorâmica/Rotação): Alterna entre panorâmica e rotação da visualização. Este recurso é exclusivo do mapa 3D e pode ser controlado usando os botões esquerdo e direito do mouse, respectivamente.

Bússola: Redefine a orientação do mapa para o Norte.

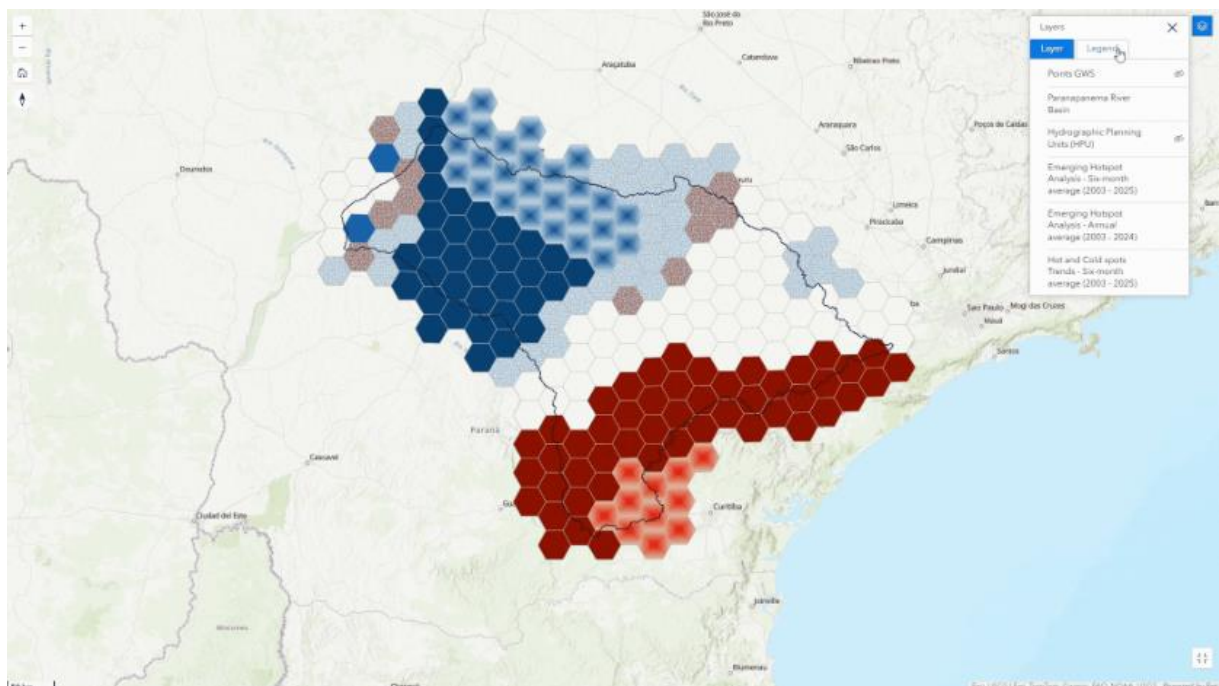
Em relação à visualização de dados, você pode usar a interface padrão com janelas minimizadas ou expandir qualquer um dos mapas para o modo de tela cheia. Para fazer isso, clique no botão Maximizar (☐), localizado no canto inferior direito de cada quadro do mapa.

3. Gerenciamento de Camadas e Legendas

Para alternar a visibilidade das camadas, clique no ícone da lista de camadas no canto superior direito de cada janela do mapa. Selecione ou desmarque as camadas de interesse para personalizar sua visualização. As legendas de todas as camadas atualmente ativas também podem ser encontradas neste mesmo menu (Figura A.2).

Nota: O painel “Definições de Camada”, localizado na barra lateral expansível, fornece uma breve descrição técnica dos conjuntos de dados disponíveis e informações detalhadas da legenda.

Figura A.2 – Legendas.

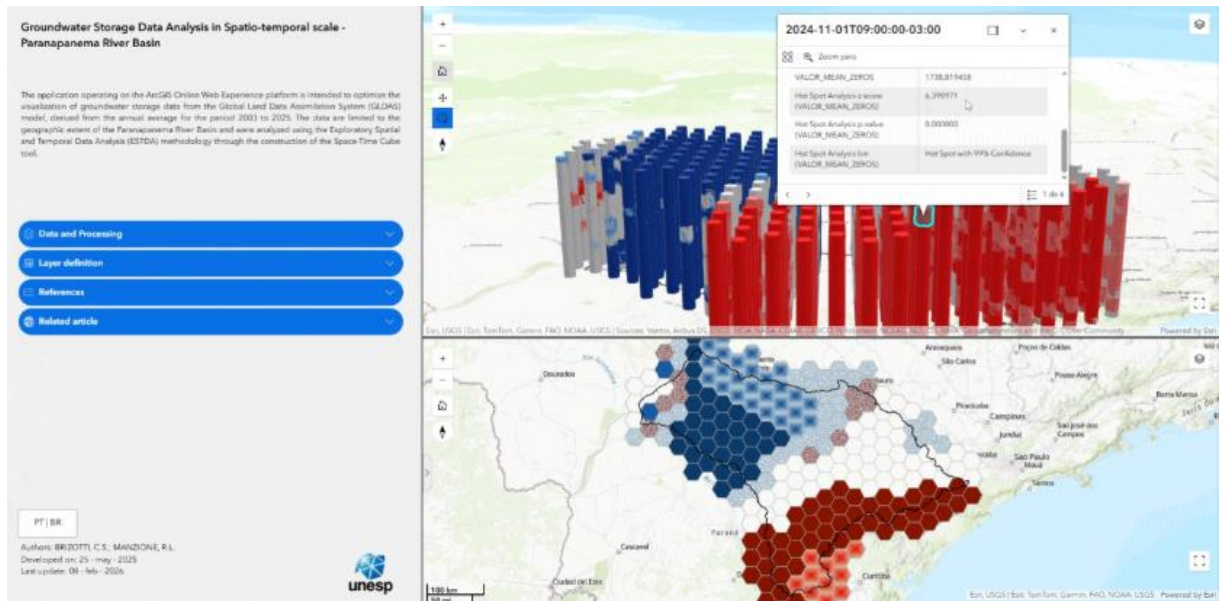


4. Interatividade e Exploração do Mapa

Os mapas contêm elementos selecionáveis com interfaces interativas. Ao clicar em um elemento, uma janela pop-up exibe dados detalhados dos atributos (Figura A.3), tais como:

- Identificação do objeto;
- Período de tempo correspondente;
- Valores brutos dos dados;
- Cálculos associados (quando disponíveis para a camada ativa).

Figura A.3 – Interatividade do mapa.



5. Extração e Exportação de Dados

Explore os dados no mapa inferior (interface 2D) usando a barra lateral expansível. Este painel permite interagir com as camadas, aplicar filtros personalizados e exportar os conjuntos de dados (Figura A.4).

Figura A.4 - Exportação dos dados.

