






ANÁLISE DE TENDÊNCIAS EM SÉRIES HISTÓRICAS HIDROLÓGICAS DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU (SAB)

 Gustavo Soldado Peres ^{1*},  Pedro Luiz Becaro Crioni ¹,  Caio Marques Manara ¹,  Elias Hideo Teramoto ^{1,3},  Chang Hung Kiang ^{1,2,3}

¹ Laboratório de Estudos de Bacias - LEBAC, Universidade do Estado de São Paulo (UNESP), CEP 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil. *E-mails*: soldado.peres@unesp.br, pedro.crioni@unesp.br, caio.m.manara@unesp.br, elias.hideo-teramoto@unesp.br, chang.hung-kiang@unesp.br

² Departamento de Geologia, Universidade do Estado de São Paulo (UNESP), CEP 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil.

³ Centro de Estudos Ambientais - CEA, Universidade do Estado de São Paulo (UNESP), CEP 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil.

*Autor correspondente



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

RESUMO

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) é uma fonte vital de água para uma vasta e populosa região do Brasil, abrangendo os estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Mato Grosso do Sul. Diante da crescente demanda hídrica e da escassez de estudos sobre o comportamento de longo prazo deste aquífero, o presente trabalho teve como objetivo analisar as tendências temporais do nível potenciométrico, precipitação e recarga no SAB. Para isso, foram utilizados dados de 29 poços de monitoramento da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas – RIMAS (SGB, 2025a) e dados de precipitação do produto CHIRPS. A análise estatística foi realizada por meio dos testes não paramétricos de Mann-Kendall e da inclinação de Sen. Os resultados revelaram uma tendência de declínio estatisticamente significativa no nível potenciométrico em 25 dos 29 poços analisados, com taxas de rebaixamento que variam de -0,07 a -1,23 m/ano. Em contrapartida, a análise dos dados de precipitação não mostrou tendência significativa na maior parte da área de estudo. A discrepância entre a estabilidade da precipitação e o declínio acentuado dos níveis d'água sugere que o rebaixamento do nível potenciométrico no SAB é resultado de uma combinação de fatores, incluindo a intensificação da exploração de água subterrânea e possíveis alterações no comportamento da recarga do aquífero, influenciadas por mudanças na distribuição das chuvas. Estes resultados reforçam a necessidade de um monitoramento contínuo e de estratégias de gestão sustentável para garantir a segurança hídrica na região.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Bauru; Análise de Mann-Kendall; Sen's Slope; Flutuação do nível d'água; Depleção de aquíferos; Gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

TREND ANALYSIS IN HYDROLOGICAL TIME SERIES OF THE BAURU AQUIFER SYSTEM (BAS). The Bauru Aquifer System (BAS) is a vital water source for a vast and densely populated region of Brazil, covering the states of São Paulo, Minas Gerais, Paraná, and Mato Grosso do Sul. Given the increasing water demand and the scarcity of studies on the long-term behavior of this aquifer, this study aimed to analyze temporal trends in potentiometric level, precipitation, and recharge in the BAS. To

accomplish this, data from 29 monitoring wells of the Integrated Groundwater Monitoring Network (RIMAS/SGB) and precipitation data from the CHIRPS product were used. Statistical analysis was performed using the non-parametric Mann–Kendall test and Sen’s Slope estimator. The results revealed a statistically significant declining trend in the potentiometric level in 25 of the 29 wells analyzed, with drawdown rates ranging from -0.07 to -1.23 m/year. In contrast, the analysis of precipitation data showed no significant trend across most of the study area. The discrepancy between stable precipitation and the marked decline in groundwater levels suggests that the potentiometric-level drawdown in the BAS is the result of a combination of factors, including increased groundwater exploitation and potential changes in aquifer recharge behavior influenced by shifts in rainfall distribution. These findings reinforce the need for continuous monitoring and sustainable management strategies to ensure water security in the region.

Keywords: Bauru Aquifer System; Mann-Kendall analysis; Sen’s Slope; Groundwater level fluctuation; Aquifer depletion; Water resources management.

RESUMEN

ANÁLISIS DE TENDENCIAS EN SERIES HISTÓRICAS HIDROLÓGICAS DEL SISTEMA ACUÍFERO BAURU (SAB). El Sistema Acuífero Bauru (SAB) es una fuente vital de agua para una amplia y poblada región de Brasil, que abarca los estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná y Mato Grosso do Sul. Ante la creciente demanda hídrica y la escasez de estudios sobre el comportamiento a largo plazo de este acuífero, el presente trabajo tuvo como objetivo analizar las tendencias temporales del nivel potenciométrico, la precipitación y la recarga en el SAB. Para ello, se utilizaron datos de 29 pozos de monitoreo de la Red Integrada de Monitoreo de Aguas Subterráneas (RIMAS/SGB) y datos de precipitación del producto CHIRPS. El análisis estadístico se realizó mediante las pruebas no paramétricas de Mann–Kendall y la pendiente de Sen. Los resultados revelaron una tendencia de disminución estadísticamente significativa en el nivel potenciométrico en 25 de los 29 pozos analizados, con tasas de descenso que varían entre -0,07 y -1,23 m/año. En contraste, el análisis de los datos de precipitación no mostró tendencias significativas en la mayor parte del área de estudio. La discrepancia entre la estabilidad de la precipitación y el marcado descenso de los niveles de agua sugiere que la disminución del nivel potenciométrico en el SAB es resultado de una combinación de factores, incluyendo la intensificación de la explotación de agua subterránea y posibles cambios en el comportamiento de la recarga del acuífero, influenciados por variaciones en la distribución de las lluvias. Estos resultados refuerzan la necesidad de un monitoreo continuo y de estrategias de gestión sostenible para garantizar la seguridad hídrica en la región.

Palabras clave: Sistema Acuífero Bauru; Análisis de Mann-Kendall; Pendiente de Sen; Fluctuación del nivel potenciométrico; Depleción de acuíferos; Gestión de recursos hídricos.

1 INTRODUÇÃO

O atual cenário hídrico global aponta que diversos aquíferos vêm sofrendo deplecionamento em taxas que podem comprometer a resiliência hídrica. Exemplos como o Sistema Aquífero do Nordeste do Saara, registra uma depleção de aproximadamente 2,69 km³ por ano, que pode levar à perda de até 90% de seu armazenamento em cerca de 50 anos (Richey et al., 2015). Outros estudos como o de Jasechko et

al. (2024), baseados na análise de 170.000 poços encontrados em 1.693 sistemas aquíferos, também demonstraram que declínios rápidos do nível das águas subterráneas (mais de 0,5 m/ano) são generalizados no século XXI, sobretudo em regiões áridas com forte presença agrícola. Além disso, cerca de 30% dos aquíferos regionais apresentaram aceleração desses declínios nas últimas quatro décadas, e essa aceleração está correlacionada com redução de precipitação.

O nível potenciométrico em aquíferos livres apresenta um comportamento cíclico, caracterizado pela ascensão durante a estação chuvosa e pela queda na estação seca, refletindo o balanço entre precipitação, infiltração/percolação na zona não saturada e perdas por evapotranspiração e escoamento subterrâneo. A resposta do nível ao regime de chuvas pode apresentar defasagem de semanas a meses, dependendo das condições hidrogeológicas locais (Manara et al., 2025). Durante os períodos de estiagem, o escoamento subterrâneo e a evapotranspiração tendem a superar a recarga, provocando o rebaixamento do nível potenciométrico. Esses ciclos sazonais podem ser modulados por tendências de longo prazo associadas (I) às mudanças climáticas, nas quais o aumento da duração dos períodos de seca e o aumento do aquecimento intensifica a evapotranspiração e reduz a recarga/armazenamento, e/ou (II) à intensificação da exploração, que resulta em declínios progressivos e persistentes dos níveis piezométricos (Carroll et al., 2024; Jasechko et al., 2024).

Séries de monitoramento de dados hidrológicos podem ser submetidas a testes não paramétricos para definir se apresentam tendência monotônica de declínio ou ascensão. O teste não paramétrico de Mann-Kendall é um método comumente empregado em dados hidrológicos como precipitação, fluxo de base, vazão de rios, índice de seca, temperatura, entre outros (Dias et al., 2025; Groppo, et al., 2005; Nguyen et al., 2022; Xing et al., 2018; Yadav et al., 2014). Além do teste de Mann-Kendall é comumente avaliada a inclinação de Sen em séries históricas, a partir da qual se verifica a taxa de variação ao longo do tempo. Assim, é possível diagnosticar a direção (ascendente/descendente) e a magnitude da variação dos níveis d'água de um aquífero. Quando essa metodologia é aplicada em diferentes variáveis climáticas que naturalmente estão relacionadas (precipitação/recarga; nível d'água/precipitação; nível d'água/recarga) é possível comparar suas tendências e magnitudes.

A área de ocorrência do Sistema Aquífero Bauru (SAB) situa-se sobre os estados do Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, abrangendo uma região densamente populada. O SAB é responsável por grande parte do fornecimento hídrico das cidades que se encontram em seus domínios. No estado do Paraná, por exemplo, das cidades localizadas nos domínios do SAB, 80% são abastecidas por recursos subterrâneos (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais [CPRM],

2012). No Estado de São Paulo, 52% (240 de 645) dos municípios captam água do SAB; e em 210 (45%) o abastecimento é integralmente por água subterrânea (Paula e Silva et al., 2005). Apesar da intensa exploração, ainda são escassos os estudos que quantificam rebaixamentos de longo prazo. Em São José do Rio Preto (SP), por exemplo, análises de séries históricas de 1992 a 2020 apontam queda total de aproximadamente 15,23 m na potencimetria (de 499,76 m para 484,53 m) e taxa média de rebaixamento de aproximadamente 0,54 m/ano no período total e 0,07 m/ano entre 2010 e 2020 (Lourencetti et al., 2020).

Face à relevância do Sistema Aquífero Bauru (SAB) como fonte de água para abastecimento público, irrigação e uso industrial, bem como por seu papel regulador no fluxo de águas superficiais, a avaliação de sua disponibilidade hídrica é fundamental para o manejo sustentável. Nesse contexto, torna-se essencial compreender os possíveis impactos decorrentes de mudanças nos regimes climáticos bem como o resultado da superexploração. Com esse objetivo, o presente trabalho busca analisar o comportamento temporal da variação dos níveis potenciométricos do SAB, bem como seus ciclos de recarga e precipitação acumulada anual, diagnosticando a existência e a magnitude de tendências de longo prazo por meio da aplicação do teste de Mann-Kendall e da estimativa da inclinação de Sen (Sen's Slope).

2 HIDROGEOLOGIA REGIONAL

O Grupo Bauru está localizado na região sudeste do Brasil, com área aproximada de 370.000 km², abrangendo partes dos estados de Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso do Sul, Goiás e São Paulo. O arcabouço geológico de Bauru foi modelado por um histórico de deposição de sedimentos predominantemente siliciclásticos sob ambientes fluviais e eólicos na porção centro-sul da Plataforma Sul-Americana Cretácea. Essa sedimentação ocorreu contemporaneamente ao magmatismo alcalino em diversos pontos da Bacia Sedimentar do Paraná, como Lajes (SC), Iporá (GO) e Taiúva (SP).

Os sedimentos do Grupo Bauru recobrem, em sua maior parte, os basaltos da Formação Serra Geral sob contato erosivo (Brandt Neto et al., 1978; Menegazzo et al., 2016; Paula e Silva et al., 2005). Em algumas regiões está sob as unidades do Aquífero Guarani – Formações Botucatu e Piramboia (Paula e Silva et al., 2005). Sua espessura média é de aproximadamente 100 m, atingindo 300

m na região de Marília. Em relação à litologia é composto por arenitos, arenitos argilosos, siltitos, lamitos e argilitos, com conglomerados e camadas calcárias locais (Paula e Silva et al., 2005).

Do ponto de vista hidrodinâmico, o SAB exibe um comportamento predominantemente livre, com porções localmente semiconfinadas. Levantamentos de dados compilados por Franzini (2012) indicam que a porosidade efetiva situa-se tipicamente na faixa de 5% a 15%, enquanto a condutividade hidráulica apresenta uma variação de 0,002 m/d a 3,66 m/d.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo abrange a totalidade do SAB nos Estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul (Figura 1), corres-

pondendo à área de afloramento deste sistema aquífero. Essa região apresenta grande relevância hidrogeológica, pois o SAB constitui uma das principais fontes de abastecimento público e privado, além de desempenhar papel estratégico no suporte às atividades agroindustriais e no fornecimento de água para áreas urbanas em rápida expansão. A análise em escala regional permite compreender as variações espaciais e temporais da carga hidráulica em diferentes contextos climáticos, geológicos e de uso do solo, proporcionando um diagnóstico sobre a disponibilidade e a vulnerabilidade hídrica do aquífero.

3.2 Aquisição de dados de nível d'água

Os dados de nível d'água utilizados neste estudo foram obtidos a partir da base de dados do RIMAS/SGB – Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas. Foram selecionados 29

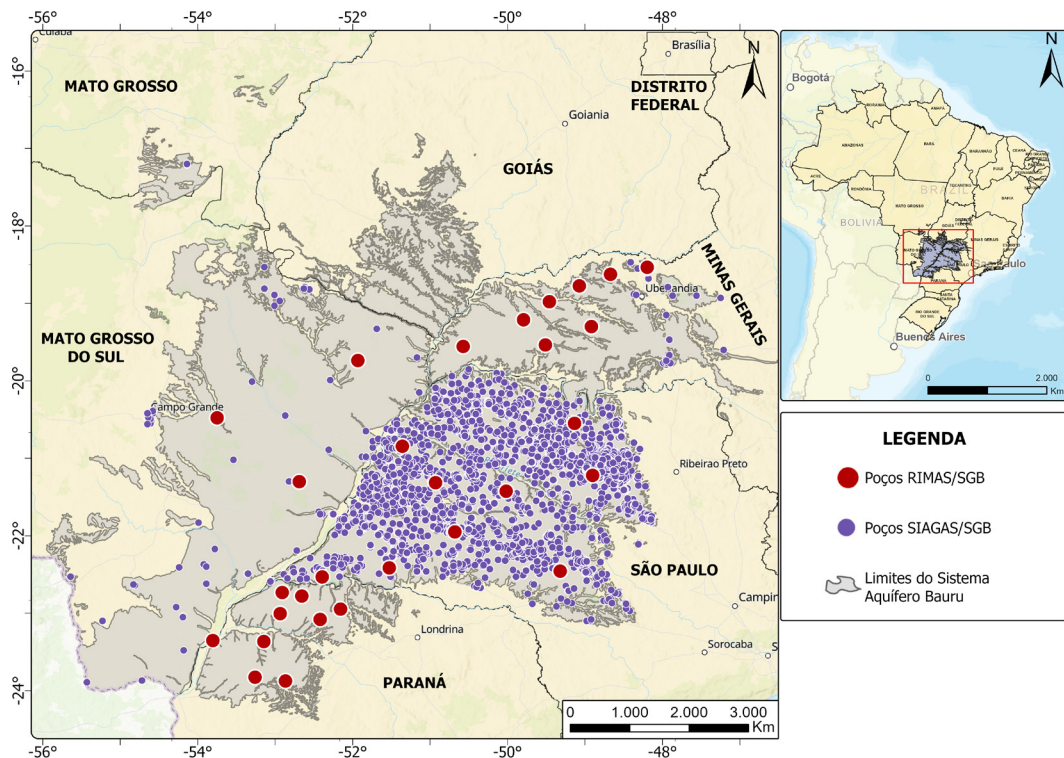


FIGURA 1 – Localização do Sistema Aquífero Bauru (SAB), abrangendo os limites da área de estudo. Estão indicados os poços de monitoramento do RIMAS/SGB, utilizados na análise das tendências temporais para os níveis potenciométricos, bem como os poços cadastrados no SIAGAS/SGB, empregados no cálculo da densidade de poços.

FIGURE 1 – Location of the Bauru Aquifer System (BAS), showing the boundaries of the study area. The figure indicates the RIMAS/SGB monitoring wells used in the temporal trend analysis of potentiometric levels, as well as the SIAGAS/SGB registered wells used to calculate well density.

poços, com séries temporais que variam de 5 a 14 anos, instalados no SAB.

As séries históricas disponíveis apresentam medidas diárias de nível d'água, as quais foram convertidas para potenciometria a partir do cálculo da subtração do nível d'água da cota topográfica do poço analisado. A extensão temporal dos registros varia conforme o poço, resultando em intervalos temporais heterogêneos entre os pontos analisados. Essa característica é típica de redes de monitoramento regionais, nas quais a periodicidade e a continuidade das séries dependem das condições operacionais e do histórico de funcionamento de cada piezômetro. Foram selecionados poços que apresentassem menos de 25% de lacunas nos dados, de modo que estas fossem distribuídas ao longo da série sem apresentar lacunas contínuas de mais de 6 meses.

3.3 Estimativa de recarga por VNA

O método Variação de Nível d'água (VNA), também conhecido como *Water-Table Fluctuation* (WTF), é uma técnica que estima a recarga de aquíferos livres a partir da flutuação do nível freático. A taxa de recarga associada a um evento de elevação do nível d'água pode ser calculada pela seguinte equação:

$$R = S_y \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que S_y corresponde ao rendimento específico do aquífero, ΔH é a variação do nível d'água e Δt o intervalo de tempo que ocorreu a recarga (anos).

Para determinar a recarga total de um ciclo completo, o ΔH é definido como a diferença entre o pico observado do nível d'água e o nível projetado caso a tendência de declínio da curva de recessão continuasse sem o evento de recarga. O valor obtido é então multiplicado por S_y (Healy, 2010).

A relativa simplicidade e a aplicação direta deste método fazem dele uma ferramenta amplamente utilizada para a quantificação da recarga em aquíferos não confinados (e.g. Blarasin, 2016; Deltottier et al., 2018; Walczuk et al., 2025).

Utilizando as séries convertidas dos níveis potenciométricos foram calculados os diferentes ciclos de recargas para os períodos disponíveis.

3.4 Aquisição e elaboração do mapa de densidade de poços

Com o objetivo de avaliar a relação entre a intensidade de exploração do SAB e a ocorrência de rebaixamentos expressivos do nível potenciométrico, foi elaborado um mapa de densidade espacial

dos poços tubulares. Para tanto, foram utilizados os dados de poços cadastrados e ativos no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), mantido pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2025b). A base de dados vetorial (*shapefile*) foi trabalhada no Sistema de Coordenadas Geográficas SIRGAS 2000 (EPSG: 4674). A análise espacial e a elaboração cartográfica foram conduzidas no software ArcGIS Pro 3.5.3. O mapa de densidade foi construído através da aplicação da simbologia do tipo "Mapa de Calor" (*Heat Map*) diretamente sobre a camada de pontos, a qual interpola visualmente a concentração espacial dos poços. Para esta renderização dinâmica, foram configurados um raio de influência (*Radius*) de 25 pixels e a não utilização de um campo de ponderação (*Weight field*), tratando cada poço com igual importância. A camada de densidade resultante foi sobreposta a um mapa base do serviço *OpenStreetMap*, e a simbologia empregada utilizou uma rampa de cores que transita do azul (baixa densidade) ao branco (alta densidade). Essa abordagem permite quantificar as regiões com mais densidade de poços e avaliar a influência desse adensamento e, por consequência, da exploração nos níveis de água subterrânea.

3.5 Aquisição e processamento de dados de precipitação

Os dados de precipitação foram obtidos a partir do produto *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) Daily Version 2.0. Trata-se de um conjunto de dados de precipitação quasi-global (50°S a 50°N) que combina estimativas de satélite com dados de estações pluviométricas em solo, resultando em um produto de alta resolução espacial (~ 5 km) e longa série temporal (Funk et al., 2015).

Todo o processamento foi executado na plataforma de geoprocessamento em nuvem *Google Earth Engine* (GEE), utilizando a coleção de imagens UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY (Climate Hazards Group, 2024). A análise compreendeu o período de 1 de janeiro de 1981 a 31 de dezembro de 2024, sendo 2024 o último ano completo disponível no momento da análise.

Para cada ano, a coleção de imagens diárias do CHIRPS foi primeiramente filtrada para o intervalo correspondente (de 1 de janeiro a 31 de dezembro). Em seguida, realizou-se o somatório de todas as precipitações diárias do ano, resultando em uma única imagem (*raster*) representativa da precipitação total acumulada (mm/ano) para o respectivo ano. Ao final do processo, foi gerada uma coleção de imagens, na

qual cada imagem corresponde ao total pluviométrico de um ano específico da série histórica.

Cada imagem da série anual foi então recortada (*clipped*) aos limites da área de estudo para análises espaciais. Finalmente, cada *raster* anual da coleção foi exportado individualmente no formato GeoTIFF, com a resolução espacial nativa do CHIRPS (5.566 m), para análises posteriores em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

3.6 Identificação de tendências temporais utilizando Mann-Kendall e Sen's Slope

A análise de tendência foi realizada através das bibliotecas *python pyMannKendall* (Hussain & Mahmud, 2019) para aplicação dos testes de Mann-Kendall (MK) e Mann-Kendall Sazonal (SMK). A inclinação de Sen foi calculada utilizando a biblioteca *scipy* (Virtanen et al., 2020).

3.6.1 Teste de Mann-Kendall (MK)

A existência de tendência monotônica (aumento ou queda) em séries históricas hidrológicas não é corretamente avaliada a partir de métodos paramétricos, devido sua natureza não linear, presença de lacunas, *outliers* e distribuições assimétricas. Nesse sentido o teste não paramétrico de Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945) tem como objetivo identificar tendências significativas em séries temporais. A estatística do teste é dada por:

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

sendo n o número de pontos de dados, x_j e x_i os respectivos valores dos dados em séries de tempo i e j ($j > i$) e $\text{sgn}(x_j - x_i)$ dada por:

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

Kendall (1975) mostrou que S é normalmente distribuída com média $E(S)$ e variância $\text{Var}(S)$. A variância é calculada como:

$$\text{Var}(S) = \frac{\{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m [t_i(t_i-1)(2t_i+5)]\}}{18} \quad (\text{Eq. 4})$$

em que n é o número de pontos dos dados e m é o número de grupos empatados (conjunto de dados da amostra com valores idênticos) e t_i indica a quantidade de valores repetidos no i -ésimo grupo. Se o tamanho da amostra n é maior que 10, a estatística de teste normalizada Z é calculada da seguinte forma:

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

A significância estatística é então avaliada em teste bicaudal. O valor-p corresponde à probabilidade, sob H_0 , de observar um $|Z|$ tão extremo quanto o obtido. Adotou-se um nível de significância de 5%. O sinal de S (ou de Z) indica a direção da tendência: positivo (crescente) e negativo (decrecente).

É importante ressaltar que a presença de sazonalidade ou autocorrelações significativas afeta a sensibilidade desse método (Bayazit & Onoz, 2007; Hamed & Rao, 1998). A presença destes fatores aumenta a probabilidade de detecção de falsas tendências, a inexistência de tendências climáticas e a presença de autocorrelação positiva aumentam a probabilidade do erro tipo I. Características opostas são observadas na presença de autocorrelação negativa.

No presente estudo, o teste Mann-Kendall (MK não sazonal) foi aplicado às séries de precipitação acumulada anual e aos dados de recarga por não apresentarem autocorrelação.

3.6.2 Mann-Kendall Sazonal (SMK)

Séries históricas de níveis potenciométricos apresentam naturalmente autocorrelação, pois os níveis atuais dependem dos anteriores, assim como os níveis seguintes dependerão dos atuais. Além disso, a variação natural entre períodos secos e úmidos introduz sazonalidade, o que impede a aplicação direta do teste de Mann-Kendall tradicional. Para avaliar a tendência dessas séries, utilizou-se a proposta de Mann-Kendall Sazonal (SMK) de Hirsch & Slack (1984). Nesse método, os dados são organizados em sub-séries mensais sazonais (janeiro, fevereiro, ..., dezembro), e a tendência é avaliada em cada sub-grupo, evitando que a elevada variabilidade de determinados meses afete a análise global.

Dada a série temporal analisada de n anos organiza-se uma matriz $n \times 12$ com valores mensais Z_i :

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{1,Jan} & \cdots & Z_{1,Dez} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n,Jan} & \cdots & Z_{n,Dez} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 6})$$

Para cada coluna j , correspondente a um mês no ano, calcula-se a estatística, onde:

$$T_j = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(Z_{k,j} - Z_{i,j}) \quad (\text{Eq. 7})$$

onde:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & \text{se } x > 0 \\ 0, & \text{se } x = 0 \\ -1, & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 8})$$

Assim, T_j mede a quantidade de pares crescentes/decrecentes ao longo do tempo para um mês específico.

A variância de T_j é calculada de forma análoga a estatística do método original:

$$Var(T_j) = \frac{\{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m [t_i(t_i-1)(2t_i+5)]\}}{18} \quad (\text{Eq. 9})$$

em que n é o número de valores de cada série j mensal, m é o número de grupos de valores adjacentes iguais e t_i é o número de valores presentes em cada um desses grupos.

A estatística sazonal total é obtida pela soma das estatísticas mensais:

$$T = \sum_{i=1}^{12} T_j \quad (\text{Eq. 10})$$

Sob a hipótese nula de ausência de tendência e assumindo independência entre os meses (Hirsch & Slack, 1984), a variância de T é dada por:

$$Var(T) = \sum_{j=1}^{12} Var(T_j) \quad (\text{Eq. 11})$$

A estatística normalizada Z é dada por:

$$SMK = \begin{cases} \frac{T-1}{\sqrt{Var(T)}}, se T > 0 \\ 0, se T = 0 \\ \frac{T+1}{\sqrt{Var(T)}}, se T < 0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 12})$$

O mesmo nível de significância de 5% foi adotado.

3.6.3 Sen's Slope

Quando uma série histórica apresenta significância estatística, a inclinação de Sen, ou *Sen's Slope*

Estimator (Sen, 1968) permite quantificar a taxa de variação da variável analisada ao longo do tempo. Esse estimador é calculado como a mediana das inclinações entre todos os pares de pontos da série temporal, preservando a confiabilidade estatística diante de *outliers* e lacunas. A inclinação de Sen é expressa em unidades por tempo (no presente trabalho m/ano e m/mês) fornecendo uma medida quantitativa da magnitude da tendência identificada (Eq. 13):

$$Q = \text{mediana} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad \forall i < j \quad (\text{Eq. 13})$$

onde x_i e x_j representam os valores da variável em tempos i e j , respectivamente. O coeficiente Q expressa a taxa de variação da variável em relação ao tempo.

4 RESULTADOS

4.1 Tendências e magnitudes: nível potenciométrico

A partir do teste de Mann-Kendall Sazonal, foram avaliadas 29 séries históricas de níveis potenciométricos, das quais 26 apresentaram significância estatística ($p < 0,05$). Os resultados do teste de Mann-Kendall e Sen's Slope estão apresentados na Tabela 1. De modo geral, observou-se um padrão

TABELA 1 – Compilado das estatísticas Mann-Kendall, adaptadas para séries sazonais, Sen's Slope (m/ano) e intervalo das séries históricas para os níveis potenciométricos analisadas.

TABLE 1 – Summary of the Mann-Kendall statistics (adapted for seasonal series), Sen's Slope (m/year), and the time-span of the historical series for the analyzed potentiometric levels.

Cidade	Nº Meses	p-value	Tendência	S	Z	tau	Sen's Slope (m/ano)	Data inicial	Data Final	Lacunas (%)
Altair/SP	123	3.51E-14	Decrescente	-306	-7,58	-0,537	-0,216	18/05/2015	03/07/2025	0,54
Andradina/SP	158	< 1e-15	Decrescente	-780	-13,45	-0,811	-0,512	04/12/2010	04/07/2025	13,50
Araguari/MG	149	2.02E-13	Decrescente	-392	-7,35	-0,460	-0,196	18/10/2011	17/04/2025	10,50
Bastos/SP	146	7.99E-15	Decrescente	-402	-7,77	-0,493	-0,274	29/06/2012	03/12/2024	5,70
Cabrália Paulista/SP	110	< 1e-15	Decrescente	-358	-10,44	-0,796	-0,461	29/05/2015	04/12/2024	8,00
Campina Verde/MG	165	0.67	Não Significativo	27	0,42	0,026	0,012	16/06/2011	24/04/2025	2,70
Canápolis/MG	132	1.75E-04	Crescente	168	3,75	0,255	0,104	19/10/2011	18/01/2025	21,20
Gurinhata/MG	128	0.33	Não Significativo	42	0,96	0,068	0,021	11/07/2012	25/04/2025	20,40
Inocência/MS	106	< 1e-15	Decrescente	-274	-8,42	-0,659	-0,183	17/06/2015	29/03/2024	0,00
Itaúna do Sul/PR	153	2.41E-04	Decrescente	-204	-3,67	-0,227	-0,332	31/03/2012	21/11/2024	0,00
Ituiutaba/MG	137	1.94E-03	Decrescente	-147	-3,10	-0,206	-0,215	15/06/2011	25/04/2025	22,60
Ivaté/PR	150	2.08E-07	Decrescente	-280	-5,19	-0,324	-0,163	31/03/2012	16/09/2024	2,50
Limeira do Oeste/MG	160	< 1e-15	Decrescente	-838	-14,18	-0,850	-0,535	28/07/2010	22/04/2025	12,70
Narandiba/SP	148	< 1e-15	Decrescente	-444	-8,41	-0,529	-0,301	27/03/2012	21/11/2024	4,10
Paranacity/PR	145	9.62E-09	Decrescente	-294	-5,74	-0,366	-0,256	22/07/2011	20/11/2024	10,70
Paranavai/PR	152	2.03E-03	Decrescente	-170	-3,09	-0,191	-0,109	04/12/2010	20/11/2024	11,50
Penápolis/SP	171	5.55E-15	Decrescente	-509	-7,81	-0,449	-0,144	23/11/2010	03/07/2025	3,50
Pindorama/SP	167	< 1e-15	Decrescente	-895	-14,24	-0,829	-0,234	23/11/2010	09/07/2025	10,00
Planaltina do Paraná/PR	151	1.11E-13	Decrescente	-404	-7,43	-0,461	-0,219	30/03/2012	22/11/2024	2,40
Prata/MG	154	8.33E-08	Decrescente	-300	-5,36	-0,329	-0,138	16/06/2011	22/11/2025	12,50
Ribas do Rio Pardo/MS	161	< 1e-15	Decrescente	-565	-9,47	-0,564	-0,068	25/07/2011	28/11/2024	0,00
Santa Rita do Pardo/MS	142	7.69E-07	Decrescente	-246	-4,94	-0,319	-0,176	25/03/2012	26/11/2024	8,50
Tapira/PR	159	6.25E-04	Decrescente	-201	-3,42	-0,206	-0,071	21/07/2011	22/11/2024	2,10
Teodoro Sampaio/SP	144	0.67	Não Significativo	22	0,42	0,028	0,014	28/03/2012	21/11/2024	8,80
Terra Rica/PR	113	< 1e-15	Decrescente	-395	-11,06	-0,828	-1,23	28/07/2015	22/11/2024	0,80
Tuneiras do Oeste/PR	113	< 1e-15	Decrescente	-305	-8,53	-0,639	-0,656	30/07/2015	20/11/2024	0,80
Tupaciguara/MG	148	7.81E-04	Decrescente	-178	-3,36	-0,212	-0,141	19/04/2011	17/04/2025	18,10
Umuarama/PR	166	1.08E-04	Decrescente	-242	-3,87	-0,227	-0,12	29/11/2010	23/11/2024	2,00
Valparaíso/SP	170	5.93E-09	Decrescente	-376	-5,82	-0,336	-0,123	24/11/2010	03/07/2025	8,30

consistente de tendência decrescente em 25 das 26 séries significativas, com inclinações variando entre -0,07 e -1,23 m/ano, com uma queda média de -0,268 m/ano.

No estado de São Paulo, as taxas de rebaixamento variaram entre -0,12 e -0,51 m/ano, refletindo quedas moderadas a acentuadas, padrão semelhante é observado também no estado de Minas Gerais com taxas entre -0,138 e -0,535 m/ano. No Paraná, observaram-se os maiores declínios, com taxas entre -0,07 e -1,23 m/ano, maior queda observada em todas as análises. Já em Mato Grosso

do Sul, as variações foram mais moderadas, com valores entre -0,068 e -0,183 m/ano. Além disso, identificou-se uma única tendência crescente em Minas Gerais, na cidade de Canápolis, com taxa de 0,10 m/ano.

As Figuras 2 e 3, apresentam, respectivamente, os gráficos de nível d'água com a inclinação observada distribuídos de Nordeste a Sudoeste e Leste a Oeste respectivamente. O conjunto das séries históricas revela que, para a porção central do aquífero no estado de São Paulo, ocorrem oscilações interanuais bem definidas, associadas ao

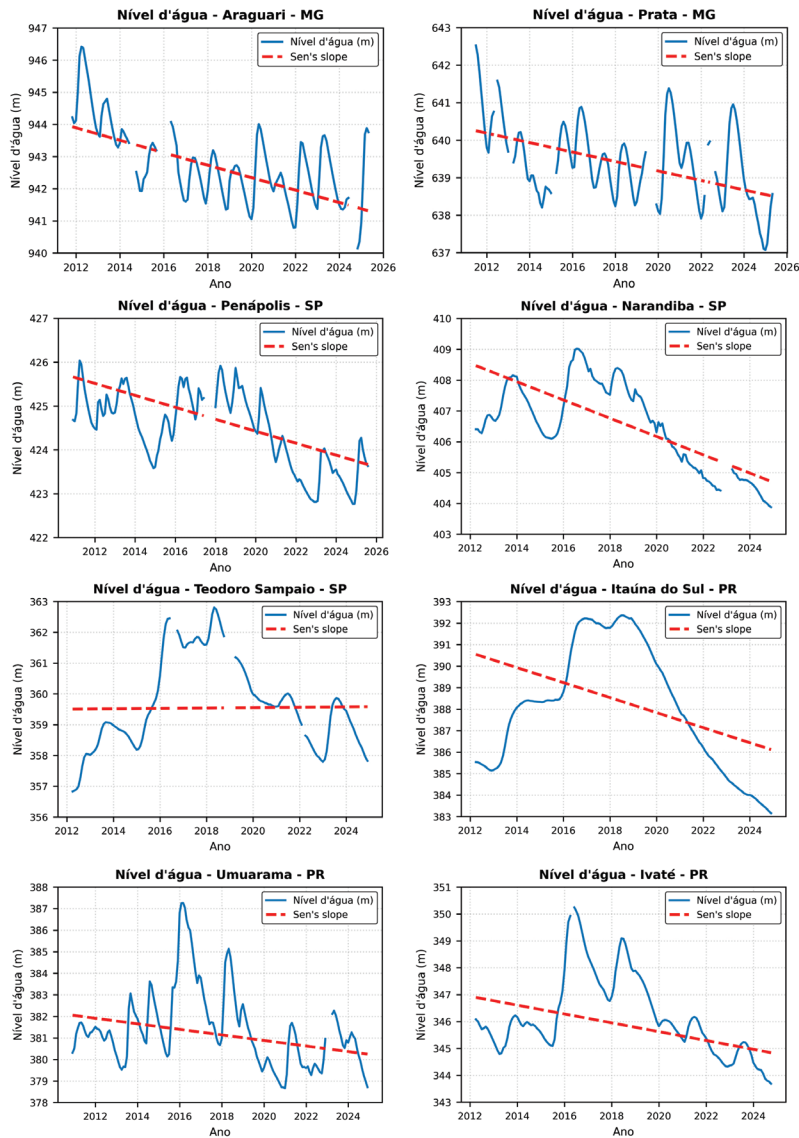


FIGURA 2 – Tendências para os níveis potenciométricos do Aquífero Bauru de Nordeste a sudoeste. Araguari/MG; Prata/MG; Penápolis/SP; Narandiba/SP; Teodoro Sampaio/SP; Itaúna do Sul/PR; Umuarama/PR; Ivaté/PR

FIGURE 2 – Trends in potentiometric levels of the Bauru Aquifer from northeast to southwest. Araguari/MG; Prata/MG; Penápolis/SP; Narandiba/SP; Teodoro Sampaio/SP; Itaúna do Sul/PR; Umuarama/PR; Ivaté/PR.

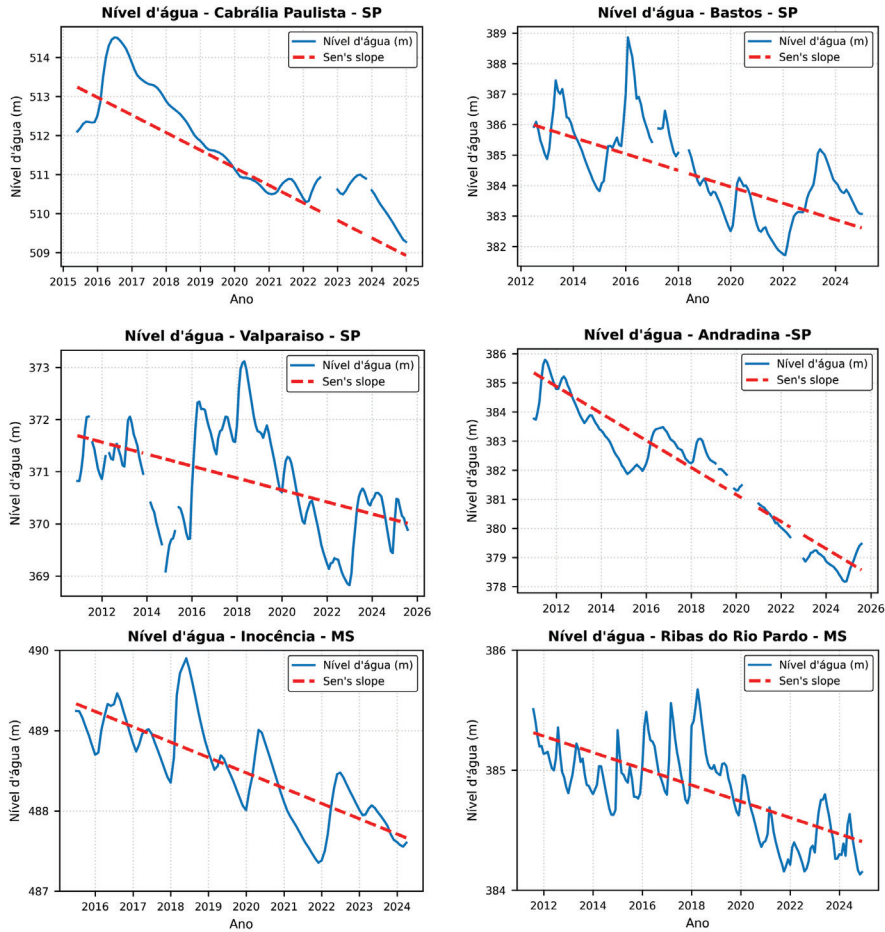


FIGURA 3 – Tendências para os níveis d’água do Aquífero Bauru de Leste a Oeste. Cabrália Paulista/SP; Bastos/SP; Valparaíso/SP; Andradina/SP; Inocência/MS e Ribas do Rio Pardo/MS.

FIGURE 3 – Trends in groundwater levels of the Bauru Aquifer from east to west. Cabrália Paulista/SP; Bastos/SP; Valparaíso/SP; Andradina/SP; Inocência/MS; Ribas do Rio Pardo/MS.

regime sazonal de recarga, mas acompanhadas por um declínio persistente dos níveis ao longo do tempo. Em Minas Gerais, na porção norte, a sazonalidade está bem-marcada, com taxas de rebaixamento acentuadas, semelhantes às observadas na porção central. No Paraná, ao sul, além da forte variabilidade anual, destacam-se quedas mais abruptas a partir de 2016, sugerindo intensificação do rebaixamento nos últimos anos. No Mato Grosso do Sul, por sua vez, as séries apresentam oscilações regulares com declínios menos intensos, condizentes com as inclinações moderadas observadas, reforçando o caráter mais gradual da queda, semelhante ao identificado em Prata e Araguari (MG).

4.2 Tendências e magnitudes: precipitação

A aplicação do teste de Mann-Kendall para a série de precipitação anual não indicou tendência

monotônica significativa na maior parte das localidades. Apenas quatro pontos apresentaram tendência decrescente estatisticamente significativa: Limeira do Oeste/MG, Prata/MG, Pindorama/SP e Santa Rita do Pardo/MS, com magnitudes estimadas em aproximadamente -4,14 a -7,09 mm/ano (Tabela 2).

A Figura 4 ilustra o comportamento observado nas cidades nas quais a significância estatística foi comprovada. Observa-se que, embora as séries apresentem marcada variabilidade interanual (sazonalidade), os ciclos mais recentes tendem a se posicionar em patamares progressivamente mais baixos. Esse padrão reforça a tendência negativa estimada pela inclinação de Sen, indicando que a oscilação natural entre anos secos e chuvosos ocorre em um contexto de declínio gradual da precipitação média.

TABELA 2 – Compilado das estatísticas Mann-Kendall para dados de acumulado anual de precipitação, e taxas Sen’s Slope (mm/ano).

TABLE 2 – Summary of the Mann–Kendall statistics for annual precipitation totals and the corresponding Sen’s Slope rates (mm/year).

Cidade	Nº de anos	p-value	Tendência	S	Z	Tau	Sen's Slope (mm/ano)
Altair/SP	44	1.12E-01	Não Significativo	-158	-1,59	-0,17	-3,27
Andradina/SP	44	7.34E-02	Não Significativo	-178	-1,79	-0,19	-2,94
Araguari/MG	44	6.42E-02	Não Significativo	-184	-1,85	-0,19	-4,66
Bastos/SP	44	6.72E-02	Não Significativo	-182	-1,83	-0,19	-4,14
Cabrália Paulista/SP	44	3.47E-01	Não Significativo	-94	-0,94	-0,10	-1,95
Campina Verde/MG	44	4.01E-01	Não Significativo	-84	-0,84	-0,09	-2,05
Canápolis/MG	44	1.72E-01	Não Significativo	-136	-1,37	-0,14	-3,25
Gurinhata/MG	44	8.48E-01	Não Significativo	-20	-0,19	-0,02	-0,51
Inocência/MS	44	1.22E-01	Não Significativo	-154	-1,55	-0,16	-3,18
Itaúna do Sul/PR	44	9.12E-02	Não Significativo	-168	-1,69	-0,18	-3,81
Ituiutaba/MG	44	5.51E-01	Não Significativo	-60	-0,60	-0,06	-1,38
Ivaté/PR	44	6.93E-01	Não Significativo	40	0,39	0,04	1,40
Limeira do Oeste/MG	44	2.82E-02	Decrescente	-218	-2,19	-0,23	-4,14
Narandiba/SP	44	3.90E-01	Não Significativo	-86	-0,86	-0,09	-1,91
Paranacity/PR	44	5.51E-01	Não Significativo	-60	-0,60	-0,06	-1,35
Paranavaí/PR	44	7.08E-01	Não Significativo	-38	-0,37	-0,04	-1,05
Penápolis/SP	44	3.37E-01	Não Significativo	-96	-0,96	-0,10	-1,94
Pindorama/SP	44	2.04E-03	Decrescente	-306	-3,08	-0,32	-6,87
Planaltina do Paraná/PR	44	1.99E-01	Não Significativo	-128	-1,28	-0,14	-3,20
Prata/MG	44	9.34E-03	Decrescente	-258	-2,60	-0,27	-7,09
Ribas do Rio Pardo/MS	44	7.08E-01	Não Significativo	38	0,37	0,04	0,76
Santa Rita do Pardo/MS	44	4.01E-02	Decrescente	-204	-2,05	-0,22	-4,98
Tapira/PR	44	3.68E-01	Não Significativo	-90	-0,90	-0,10	-2,67
Teodoro Sampaio/SP	44	1.66E-01	Não Significativo	-138	-1,39	-0,15	-3,46
Terra Rica/PR	44	2.14E-01	Não Significativo	-124	-1,24	-0,13	-3,37
Tuneiras do Oeste/PR	44	4.48E-01	Não Significativo	-76	-0,76	-0,08	-2,17
Tupaciguara/MG	44	3.90E-01	Não Significativo	-86	-0,86	-0,09	-2,25
Umuarama/PR	44	6.49E-01	Não Significativo	-46	-0,46	-0,05	-1,43
Valparaíso/SP	44	2.70E-01	Não Significativo	-110	-1,10	-0,12	-2,48

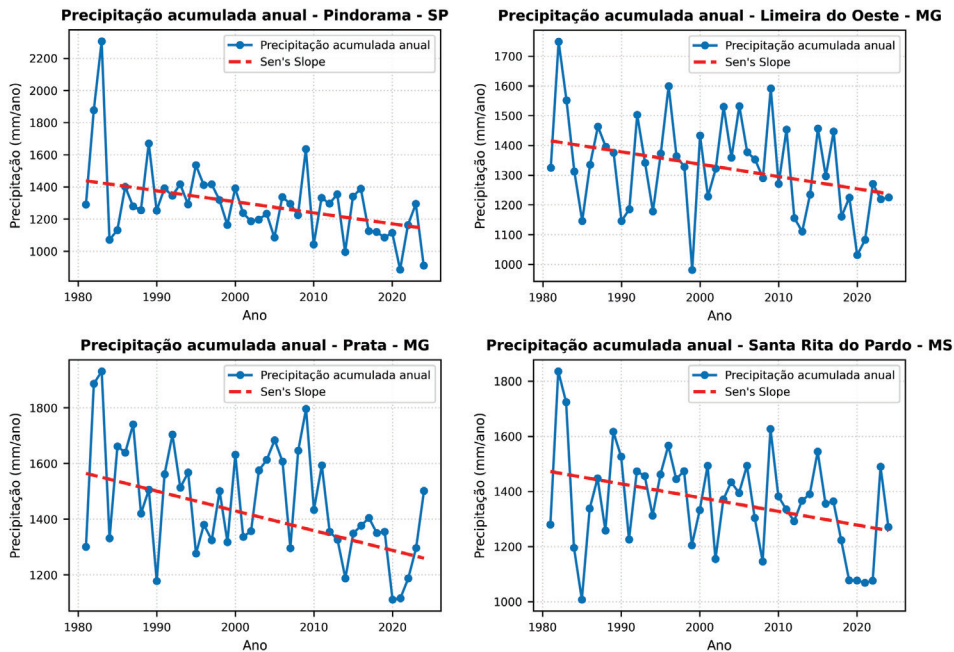


FIGURA 4 – Tendências para precipitação acumulada anual.

FIGURE 4 – Trends for annual accumulated precipitation.

A Figura 5 apresenta a distribuição da precipitação acumulada anual considerando o conjunto de todas as cidades analisadas. Observa-se uma acentuada variabilidade interanual, evidenciada pela alternância entre anos mais úmidos e anos mais secos, caracterizando a variação natural do regime pluviométrico na região. Essa variação se reflete em períodos de maior dispersão, quando a precipitação acumulada apresenta ampla variação entre localidades, e em anos mais estáveis, nos quais a variabilidade entre cidades é reduzida.

Ainda que a variabilidade da precipitação seja o aspecto predominante, verifica-se uma tendência

geral de redução dos valores medianos nos *boxplots* a partir da década de 2010, sugerindo que os ciclos sazonais recentes ocorrem em patamares progressivamente mais baixos quando comparados às décadas anteriores.

4.3 Tendências e Magnitudes: recarga

O teste de Mann-Kendall para as séries de recarga indicou ausência de significância estatística em 26 das 29 analisadas (Tabela 3). Apenas três séries apresentaram significância estatística, todos com tendência crescente: Canápolis/MG, Gurinhatã/MG e Itaipava/MG.

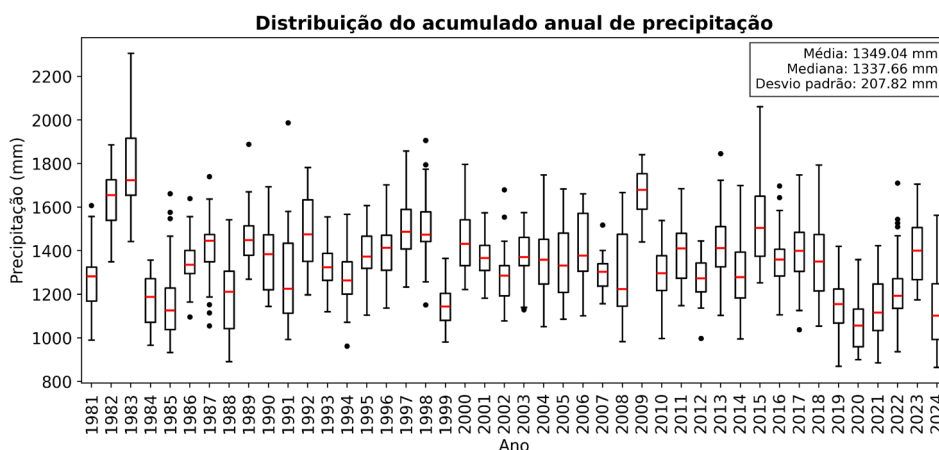


FIGURA 5 – *Boxplot* dos acumulados anuais de precipitação de cada localidade do SAB analisadas.

FIGURE 5 – *Boxplot* of annual accumulated precipitation for each location in the SAB analyzed

TABELA 3 – Compilado das estatísticas Mann-Kendall para os ciclos de recarga, e taxas Sen’s Slope (m/ano).

TABLE 3 – Compilation of Mann-Kendall statistics for recharge cycles and Sen’s Slope rates (m/year).

Cidade	Nº Ciclos	p-value	Tendência	S	Z	tau	Sen’s Slope (m/ano)
Altair/SP	8	0.53	Não Significativo	-6	-0.619	-0.214	-0.024
Andradina/SP	8	0.26	Não Significativo	-10	-1.113	-0.357	-0.021
Araguari/MG	14	0.22	Não Significativo	23	1.204	0.253	0.017
Bastos/SP	18	0.28	Não Significativo	-29	-1.061	-0.190	-0.005
Cabrália Paulista/SP	8	0.53	Não Significativo	6	0.619	0.214	0.017
Campina Verde/MG	13	0.10	Não Significativo	28	1.647	0.359	0.030
Canápolis/MG	12	0.007	Crescente	40	2.674	0.606	0.036
Gurinhata/MG	12	0.02	Crescente	34	2.263	0.515	0.065
Inocência/MS	8	1.00	Não Significativo	0	0.000	0.000	0.001
Itaúna do Sul/PR	5	0.08	Não Significativo	-8	-1.715	-0.800	-0.172
Ituiutaba/MG	14	0.91	Não Significativo	-3	-0.109	-0.033	-0.001
Ivaté/PR	10	0.59	Não Significativo	7	0.537	0.156	0.015
Limeira do Oeste/MG	11	1.00	Não Significativo	1	0.000	0.018	0.003
Narandiba/SP	14	0.22	Não Significativo	-23	-1.204	-0.253	-0.008
Paranacity/PR	5	0.80	Não Significativo	-2	-0.245	-0.200	-0.120
Paranavaí/PR	8	0.71	Não Significativo	4	0.371	0.143	0.036
Penápolis/SP	22	0.82	Não Significativo	9	0.226	0.039	0.001
Pindorama/SP	13	0.30	Não Significativo	18	1.037	0.231	0.004
Planaltina do Paraná/PR	9	0.46	Não Significativo	-8	-0.730	-0.222	-0.022
Prata/MG	13	1.00	Não Significativo	0	0.000	0.000	0.001
Ribas do Rio Pardo/MS	23	0.01	Crescente	91	2.377	0.360	0.004
Santa Rita do Pardo/MS	12	0.83	Não Significativo	4	0.206	0.061	0.002
Tapira/PR	23	0.79	Não Significativo	11	0.264	0.043	0.001
Teodoro Sampaio/SP	6	0.45	Não Significativo	5	0.751	0.333	0.034
Terra Rica/PR	3	1.00	Não Significativo	-1	0.000	-0.333	-0.263
Tuneiras do Oeste/PR	9	0.17	Não Significativo	14	1.355	0.389	0.025
Tupaciguara/MG	6	0.70	Não Significativo	3	0.376	0.200	0.020
Umuarama/PR	16	0.89	Não Significativo	4	0.135	0.033	0.005
Valparaíso/SP	15	1.00	Não Significativo	-1	0.000	-0.010	0.000

tã/MG e Ribas do Rio Pardo/MS. As inclinações de Sen estimadas para esses casos variaram entre 0,004 e 0,065 m/ano, sugerindo aumentos muito sutis no aporte de recarga ao longo dos ciclos avaliados.

A Figura 6 apresenta os valores de recarga (m) estimados para cada ciclo das séries históricas dos níveis potenciométricos analisados, considerando o S_y equivalente à porosidade efetiva. Observam-se dois comportamentos principais: (I) poços com baixos valores de recarga associados a reduzida variabilidade histórica, refletindo condições mais estáveis de recarga; e (II) localidades em que se destacam valores mais elevados acompanhados de maior dispersão, refletindo um maior efeito de sazonalidade.

Além disso, verifica-se a presença de *outliers* em alguns pontos de monitoramento, principalmente nas cidades a sul do aquífero (como Ivaté/PR, Paranavai/PR, Tapira/PR e Umuarama/PR), que indicam ciclos de recarga anômalos em relação ao padrão local. Não se identifica um gradiente espacial claro no sentido norte-sul, embora haja uma tendência de valores mais baixos e com menor variabilidade nos poços situados na porção central do SAB, em contraste com margens norte e sul, onde as recargas são mais elevadas e dispersas.

4.4 Densidade de poços cadastrados

O cálculo da densidade de poços que exploram água exclusivamente do SAB revela uma marcada heterogeneidade espacial. As maiores concentrações de poços ocorrem no Estado de São Paulo (Figura 7). O pico de densidade é observado no

município de São José do Rio Preto, embora densidades significativas sejam observadas nos municípios de Barretos, Bauru, Marília e Presidente Prudente.

Em contraste, registram-se baixas densidades de poços nos Estados de Mato Grosso do Sul, Paraná e Minas Gerais, indicando menor pressão de exploração sobre o aquífero nessas regiões.

5 DISCUSSÃO

5.1 Lacunas nas séries históricas dos níveis potenciométricos

As séries históricas de níveis potenciométricos utilizadas neste estudo apresentam percentuais de lacunas entre 0% e 22,7%, com média de 7,97%, indicando boa continuidade temporal na maior parte dos poços. Em estatística não paramétrica, o teste de Mann-Kendall (*MK*) é robusto à presença de lacunas, pois se baseia apenas nas ordens relativas dos valores observados e não exige espaçamento regular entre medições. Dessa forma, falhas distribuídas aleatoriamente não introduzem tendências artificiais nem inviabilizam a aplicação do método (Helsel et al., 2020; Yue & Wang, 2004).

No entanto, a presença de lacunas reduz o tamanho amostral efetivo (n), diminuindo o poder estatístico do teste e aumentando a probabilidade de erro tipo II, isto é, a não detecção de uma tendência real. A literatura não estabelece um limite universal de percentual máximo de falhas admissível para o Mann-Kendall; o desempenho depende mais da distribuição temporal dessas lacunas do

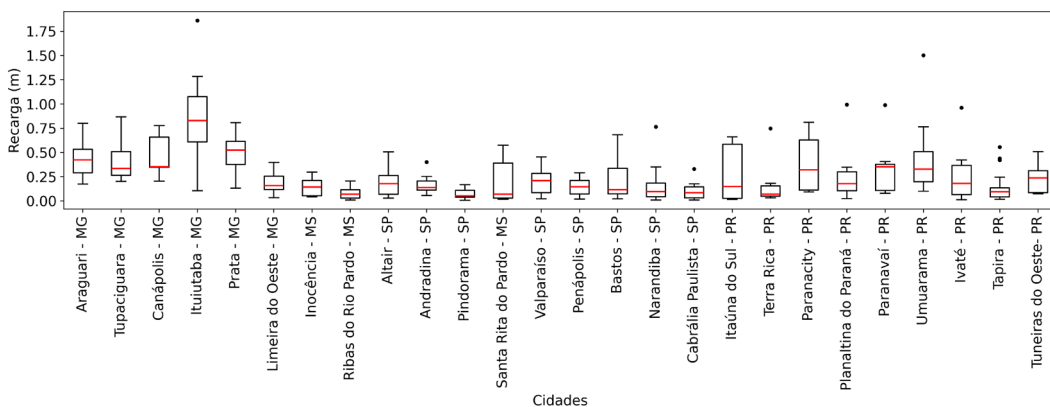


FIGURA 6 – Boxplot dos ciclos de recarga obtidos das séries históricas dos níveis potenciométricos para as diferentes localidades do SAB, organizados de norte a sul.

FIGURE 6 – Boxplot of recharge cycles obtained from the historical potentiometric-level time series for the different BAS localities, organized from north to south.

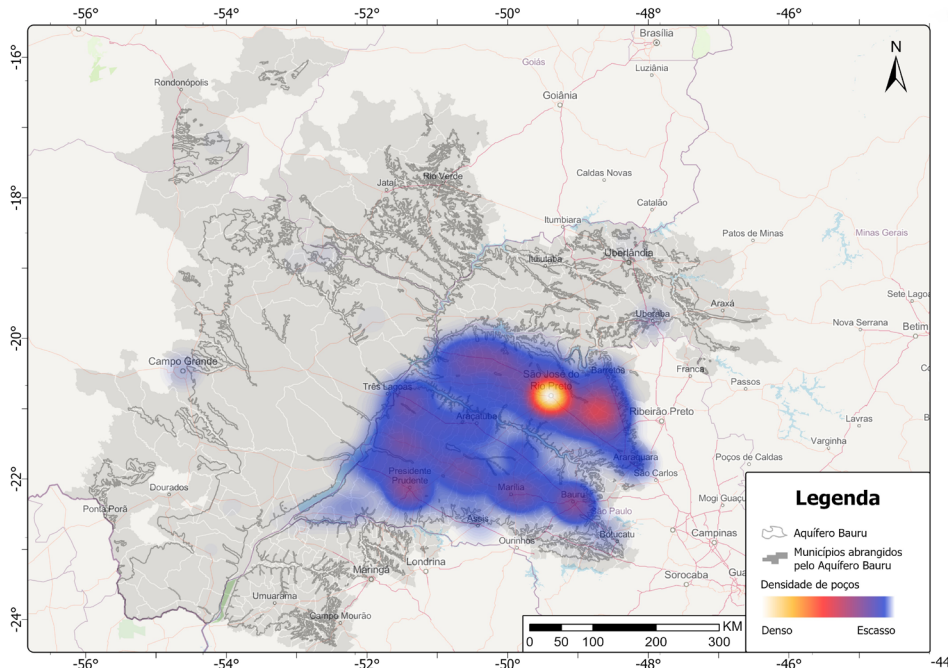


FIGURA 7 – Mapa de densidade de poços cadastrados obtidos junto ao banco de dados do SIAGAS/SGB.

FIGURE 7 – Well-density map of registered wells obtained from the SIAGAS/SGB database.

que da porcentagem absoluta de dias ausentes. Para a aplicação do teste, recomenda-se, de modo geral, o uso de séries com dimensão $n \geq 10$ (Sneyers, 1990). No presente estudo, mesmo nos casos em que o percentual de lacunas ultrapassou 20%, as falhas não ocorreram em blocos longos e contínuos, mas distribuídas ao longo da série, sem intervalos ausentes superiores a 10% do total, reduzindo seu impacto estrutural sobre a análise.

A maior parte das séries apresentou percentuais de lacunas inferiores a 10%, faixa na qual o *MK* tende a apresentar comportamento estável e confiável. Apenas três séries, Ituiutaba/MG, Canápolis/MG e Gurinhatã/MG, exibiram lacunas superiores a 20%, exigindo cautela na interpretação de valores de p próximos ao limiar de significância. Ainda assim, nessas séries as lacunas também estão distribuídas ao longo do período de monitoramento, reduzindo a possibilidade de gerar padrões artificiais ou rupturas estruturais.

Além das lacunas, a sazonalidade natural dos níveis potenciométricos constitui outro fator que pode afetar a sensibilidade do *MK*. A alternância entre períodos úmidos e secos impõe variabilidade intra-anual significativa, a qual pode mascarar ou imitar tendências de longo prazo. Por esse motivo, para os níveis d'água empregou-se o teste de Mann-Kendall sazonal (*SMK*) de Hirsch & Slack

(1984), que avalia a tendência separadamente em sub-séries mensais, mitigando o efeito dessa variabilidade sazonal. Já as séries anuais de precipitação acumulada e os dados anuais de recarga, que não apresentam sazonalidade mensal, foram analisados utilizando o *MK* tradicional.

5.2 Tendências nas séries históricas analisadas

A análise dos dados potenciométricos revelou uma tendência predominante e estatisticamente significativa de rebaixamento em praticamente toda a área do SAB. Essa constatação é evidenciada pelos p -values extremamente baixos obtidos para a maioria das séries históricas, que indicam uma probabilidade mínima de que as tendências de queda observadas serem resultado do acaso.

Em contraste, três localidades não seguiram este padrão: Campina Verde/MG, Gurinhatã/MG e Teodoro Sampaio/SP. Nesses pontos, a análise não comprovou uma tendência monotônica, o que se refletiu em valores do teste Z próximos de zero e p -values elevados (0,67; 0,33 e 0,67, respectivamente). A ausência de significância estatística, como nestes casos, pode decorrer de múltiplos fatores, tais como a alta variabilidade de dados que pode mascarar tendências de pequena magnitude, o curto intervalo da série temporal, autocorrelação serial ou a presença de mudanças não monotônicas

(Hamed & Rao, 1998; Helsel et al., 2020; Yue & Wang, 2004).

Diante do cenário generalizado de rebaixamento do aquífero, torna-se fundamental investigar seus fatores condicionantes. Analisou-se, portanto, a tendência do acumulado anual de precipitação, a fim de verificar se alterações no regime pluviométrico podem estar associadas ao declínio observado. Adicionalmente, a avaliação de possíveis tendências na recarga do aquífero foi conduzida para aprofundar a compreensão da área.

Diferente do observado para os níveis potenciométricos, a análise das séries de precipitação acumulada anual não revelou tendências estatisticamente significativas na maioria das estações (25 de 29). Esse resultado indica que o rebaixamento regional do Sistema Aquífero Bauru não pode ser atribuído simplesmente a uma redução sistemática no volume anual de chuvas. Entretanto, trabalhos recentes apontam que, mesmo na ausência de tendências anuais, mudanças no padrão intra-anual e na intensidade dos eventos de chuva podem alterar profundamente o processo de recarga.

Qiu et al. (2025) demonstram que a distribuição temporal da precipitação é crítica: em regiões áridas, a predominância de chuvas de baixa intensidade favorece a evapotranspiração e inibe a recarga, levando ao declínio do armazenamento de água. Por outro lado, eventos de alta intensidade são essenciais para gerar infiltração profunda e recarga efetiva. De forma semelhante, Zheng et al. (2023) mostram que apenas eventos acima de ~ 40 mm/dia produzem recarga efetiva em regiões semi-áridas; chuvas frequentes, porém fracas, têm papel marginal, e eventos extremos geram recarga preferencial e episódica. Esses autores também apontam que a recarga depende fortemente do mecanismo dominante (fluxo preferencial, fluxo translacional, mistura com água do solo), que varia conforme a intensidade e continuidade das chuvas.

Nesse contexto, a ausência de tendência na precipitação anual não exclui a possibilidade de redução da recarga. Alterações na intensidade, na concentração sazonal e na ocorrência de eventos extremos podem levar a menor infiltração efetiva, maior escoamento superficial, déficits acumulados e consequente queda dos níveis potenciométricos.

Embora a extensão temporal seja adequada para capturar padrões climatológicos de médio e longo prazo, a elevada variabilidade interanual e multidecadal típica de regimes climáticos pode mascarar possíveis sinais de tendência. Embora a maioria das localidades tenha apresentado um

Sen's Slope negativo, indicando uma propensão à diminuição da chuva, a magnitude dessa variação não foi suficiente para se distinguir estatisticamente da variabilidade natural do clima no período.

As únicas exceções foram Limeira do Oeste/MG, Prata/MG, Pindorama/SP e Santa Rita do Pardo/MS, que registraram uma tendência de queda significativa, embora marginal. Esses pontos, contudo, não representam o padrão regional, mas sim possíveis núcleos isolados de redução pluviométrica mais acentuada.

A análise da recarga do aquífero corrobora o comportamento observado na precipitação, com ausência de tendências estatisticamente significativas na vasta maioria das estações (26 de 29). Apenas Canápolis/MG, Gurinhata/MG e Ribas do Rio Pardo/MS apresentaram tendência significativa de aumento. Esse resultado, no caso de Ribas do Rio Pardo, contrasta com o rebaixamento observado do nível potenciométrico no mesmo local. Essa divergência reforça a hipótese de que a dinâmica do nível do aquífero está sendo governada por fatores para além das variáveis climáticas analisadas.

A comparação desses resultados com a literatura existente do SAB impõe desafios. Embora diversos autores tenham estimado eventos de recarga (e.g., Bertol, 2007; Bertol et al., 2006; Campos, 2022; Campos et al., 2021, 2023; Gonçalves & Manzione, 2019; Gonçalves et al., 2017; Maldaner, 2010; Ramires, 2017; Zambianqui, 2018), a grande disparidade metodológica e a brevidade das séries analisadas (geralmente 1 a 2 anos) dificultam a consolidação de uma tendência histórica regional. Exceções como Campos (2022), que analisou séries mais longas no Triângulo Mineiro, indicam reduções expressivas na média de recarga entre as décadas de 2000 e 2010 (de 751 mm para 499 mm). Isso sugere uma mudança abrupta no regime de recarga que pode não ter se estendido para a década seguinte (2010-2019), período onde há disponibilidade de dados de níveis d'água. Portanto, correlações simples com a precipitação anual podem falhar em capturar essa dinâmica.

É fundamental ressaltar que, embora correlacionadas, a precipitação anual não traduz linearmente a recarga. A intensidade e o espaçamento temporal entre os eventos chuvosos são determinantes para a infiltração eficaz (Owor et al., 2009; Wu et al., 1996). A variabilidade climática, incluindo fenômenos como o ENOS, pode alterar drasticamente a eficiência da recarga, como demonstrado por Zambianqui (2018), que observou um salto na razão recarga/precipitação de 5%

para 28% durante eventos de El Niño, na região de Bastos.

Dessa forma, a ausência de tendências significativas nos dados de precipitação e recarga não deve ser interpretada como breve instabilidade climática, mas como um resultado complexo, influenciado tanto pela forte variabilidade natural quanto por limitações metodológicas, como a curta extensão das séries temporais (Lins & Slack, 1999; Taylor et al., 2013). Nesse contexto, o rebaixamento generalizado dos níveis potenciométricos, sem uma diminuição linear correspondente nas entradas de água, sugere causas mais complexas. A hipótese principal aponta para fatores não climáticos (como superexploração), mas também se deve considerar mudanças no comportamento da chuva que não se refletem como tendência linear.

O prolongamento dos períodos de seca, ou o aumento da frequência de anos com chuvas abaixo da média, que ocorre dentro da ciclicidade natural de eventos pluviais (Figura 5), pode camuflar uma tendência de queda nas análises estatísticas. No entanto, essa alteração na frequência e duração dos déficits hídricos compromete a recarga efetiva e resulta no rebaixamento do nível d'água, visto que o aquífero fica sucessivamente exposto a longos períodos sem a reposição de armazenamento adequada. Este cenário de vulnerabilidade é corroborado por projeções recentes (Hirata et al., 2025), que alertam para reduções potenciais de até 27,9% na recarga do Sistema Bauru-Caiuá frente às mudanças climáticas.

Dessa forma, ainda que não se verifique um sinal estatístico claro de redução nas chuvas ou recarga, o rebaixamento generalizado dos níveis potenciométricos no SAB requer atenção especial. A ausência de tendência nos indicadores climáticos e hidrológicos de entrada reforça a hipótese de que outros fatores, possam estar desempenhando o papel maior na intensificação do rebaixamento observado.

5.3 Rebaixamento dos níveis potenciométricos do SAB: possíveis causas

Como visto anteriormente, a significância estatística deve ser interpretada com cautela. A ausência de significância em séries de precipitação e recarga não deve ser tomada como prova da inexistência de processos climatológicos relevantes, mas sim como a ausência de uma tendência, atuando como um indicativo das limitações impostas pela variabilidade natural e por fatores externos que interferem na resposta hidrológica. Nesse sentido,

a não significância abre espaço para novas indagações: estaria o SAB sendo mais impactado pela variabilidade interanual (secas prolongadas, baixa frequência de eventos de recarga) ou por pressões antrópicas crescentes (expansão da exploração e mudanças no uso do solo)? Essas hipóteses não são excludentes e, ao contrário, podem atuar de forma combinada, explicando o rebaixamento dos níveis potenciométricos observados.

Mesmo sem uma tendência de queda no volume anual de chuva, a forma como a recarga ocorre é fundamental. A distribuição da recarga anual no SAB, conforme sugerido pela Figura 5, apresenta marcada assimetria positiva, com medianas reduzidas em diversas localidades. Este padrão indica que o aquífero é sustentado por eventos episódicos de alta recarga, intercalados por períodos mais longos de contribuições modestas. Uma diminuição na frequência desses eventos de grande magnitude, mesmo que a média histórica se mantenha, pode resultar em um balanço hídrico negativo e, conseqüentemente, em um rebaixamento acumulado.

Essa vulnerabilidade é amplificada pela "memória" dos sistemas de água subterrânea, que respondem de forma lenta e integrada à duração e persistência das secas, mais do que a totais pluviométricos anuais isolados (Bloomfield & Marchant, 2013; Van Loon, 2015). Adicionalmente, o aumento da temperatura pode intensificar a evapotranspiração, reduzindo a recarga efetiva mesmo em anos de chuva normal (Vicente-Serrano et al., 2010). As séries históricas de níveis potenciométricos (Figuras 2 e 3) materializam esse efeito acumulativo: em municípios como Cabralia Paulista/SP, Penápolis/SP, Prata/MG e Umuarama/PR, os rebaixamentos sucessivos não são compensados por recuperações proporcionais, evidenciando um déficit persistente.

A Figura 5 apresenta a distribuição do acumulado anual de precipitação considerando todas as localidades analisadas desde 1981. Observa-se a marcada sazonalidade interanual, caracterizada pela alternância entre anos mais secos e mais úmidos, refletida na ampla dispersão das medianas ao longo da série. Essa variabilidade natural é acompanhada por *outliers* recorrentes, que evidenciam eventos extremos de precipitação em diferentes períodos. Uma análise visual das medianas indica que, embora a precipitação anual flutue em torno da mediana geral de 1337 mm, a partir de 2014 observa-se um comportamento mais persistente de redução, com vários anos consecutivos apresentando valores abaixo desse patamar. Em 2023 há indícios de recuperação, aproximando-se novamente

da mediana histórica, mas sem reverter totalmente o padrão recente de anos mais secos (com valores inferiores a 1.200 mm em parte da década). Esse quadro sugere que, além da sazonalidade interanual, pode estar em curso uma mudança no regime pluviométrico, aspecto que merece maior atenção.

A análise das séries históricas de precipitação acumulada anual para as quatro localidades (Pindorama/SP, Limeira do Oeste/MG, Prata/MG e Santa Rita do Pardo/MS) revela um padrão consistente de redução ao longo dos 43 anos avaliados (1981–2024). Embora a variabilidade interanual continue evidente, com anos mais chuvosos e outros menos (picos e vales da série temporal), observa-se que esses extremos vêm se tornando progressivamente menores. Esse comportamento se acentua a partir de 2015, quando os valores médios anuais passaram a se manter de forma persistente abaixo da mediana histórica. A magnitude das tendências negativas, estimadas pelo método de Sen, varia entre -4,14 e -7,09 mm/ano, o que representa uma redução acumulada entre 178 mm e 304 mm no período analisado; esses valores são expressivos e suficientes para impactar os padrões de recarga do SAB.

O declínio pluviométrico observado a partir de 2015 se reflete diretamente no comportamento hídrico do Sistema Aquífero Bauru (SAB). A redução nas chuvas entre 2015 e 2016 repercutiu nos níveis potenciométricos, gerando rebaixamentos persistentes em praticamente todos os postos analisados após essa data. De forma complementar, o compilado geral das estimativas de recarga (Figura 6), que contém dados desde 2012, apresenta valores reduzidos e com baixa variabilidade, indicando que não apenas após 2016 houve diminuição expressiva, mas que esse padrão já vinha se consolidando anteriormente. Essa redução progressiva dos aportes de recarga, associada ao rebaixamento consistente dos níveis potenciométricos, aponta para um cenário de menor reposição hídrica no SAB.

Apesar de haver indícios de que alterações nos regimes climáticos estejam relacionadas ao rebaixamento persistente, não se deve descartar o fato do SAB como uma das principais fontes de água para os municípios que estão em seus domínios e a superexploração influenciar no rebaixamento. O mapa de densidade de poços cadastrados (Figura 7) evidencia concentrações elevadas, sobretudo no estado de São Paulo, refletindo a crescente demanda de água subterrânea na região. Estudos prévios reforçam esse quadro, em São José do Rio Preto, Lourencetti et al. (2020) identificaram uma taxa de

rebaixamento de -0,47 m/ano entre 2002 e 2012. No presente estudo, localidades vizinhas como Altair e Pindorama apresentaram taxas de -0,22 m/ano e -0,23 m/ano, respectivamente, para um período mais recente. A conclusão mais importante desta comparação está na consistência da tendência de rebaixamento ao longo de mais de duas décadas. Fica evidente que o rebaixamento do SAB, pelo menos nessa porção do território paulista, é um processo contínuo e de longa duração. A diferença observada nas magnitudes das taxas de declínio é esperada e pode ser atribuída a dois fatores como os distintos períodos de análise que refletem dinâmicas de exploração e condições hidroclimáticas específicas para cada intervalo de tempo. E o contexto local, onde a exploração em um polo urbano denso como São José do Rio Preto pode induzir rebaixamentos mais intensos do que em municípios vizinhos com diferentes perfis de demanda hídrica.

Os valores de Sen's Slope reforçam esse quadro: as taxas de queda variam de -0,07 m/ano em Tapira/PR a -1,23 m/ano em Terra Rica/PR. Entre os declínios mais expressivos destacam-se Cabrália Paulista/SP (-0,46 m/ano), Andradina/SP (-0,51 m/ano), Limeira do Oeste/MG (-0,53 m/ano), Pindorama/SP (-0,23 m/ano), Tuneiras do Oeste/PR (-0,65 m/ano) e Terra Rica/PR (-1,23 m/ano). Considerando o período analisado (≈ 14 anos), essas taxas representam quedas acumuladas de 5 a 15 metros em alguns pontos do SAB, magnitude capaz de comprometer captações menos profundas e aumentar custos de bombeamento.

Cabe ressaltar, entretanto, que as séries temporais utilizadas neste estudo, para avaliação potenciométrica, possuem extensão máxima de cerca de quatorze anos. Dessa forma, os resultados podem estar parcialmente condicionados por eventos climáticos atípicos. Análises futuras, com séries temporais mais longas e abrangentes, poderão oferecer diagnósticos mais seguros sobre a evolução do comportamento dos níveis d'água do aquífero.

Em síntese, a análise estatística de tendências se mostra uma ferramenta essencial para o manejo sustentável das águas subterrâneas, fornecendo bases quantitativas e qualitativas para o planejamento de medidas de gestão e mitigação de impactos sobre a disponibilidade hídrica. Além disso, os resultados ressaltam a necessidade de programas contínuos de monitoramento da carga hidráulica conduzidos por órgãos governamentais, a fim de subsidiar decisões sobre outorga, restrições de uso e definição de volumes exploráveis. Ressalta-se, portanto, que a identificação precoce de tendên-

cias de depleção é crucial para reverter quadros de esgotamento, desde que acompanhada pela implementação de políticas públicas eficazes de uso e gestão integrada dos recursos hídricos.

6 CONCLUSÃO

A análise das séries históricas permitiu identificar um quadro de rebaixamento generalizado dos níveis potenciométricos no Sistema Aquífero Bauru. Embora as séries de precipitação e recarga não tenham apresentado, em sua maior parte, tendências estatisticamente significativas, verificou-se que o balanço entre anos de recarga reduzida e a ausência de compensação adequada em anos subsequentes resulta em um déficit acumulativo. Esse padrão indica que a variabilidade climática natural, associada a períodos prolongados de baixa recarga, desempenha papel relevante na evolução dos níveis de água subterrânea. Ao mesmo tempo, a elevada densidade de poços e a crescente demanda configuram um fator de pressão adicional sobre o aquífero, potencializando os efeitos da variabilidade climática. As taxas de rebaixamento estimadas, que em alguns pontos superam 50 cm/ano, evidenciam a magnitude do processo e alertam para riscos à segurança hídrica, como o comprometimento de captações menos profundas, risco de crise hídrica e aumento dos custos operacionais.

Considerando que a extensão das séries dos níveis potenciométricos avaliadas é de aproximadamente 14 anos, os resultados devem ser interpretados como preliminares. Esse intervalo é relativamente curto para caracterizar mudanças estruturais de longo prazo, podendo refletir variações interanuais ou oscilações climáticas temporárias. Ainda assim, os dados analisados demonstram de forma consistente que, nos últimos 14 anos, a tendência predominante é de queda, o que configura um sinal de alerta. A continuidade do monitoramento é, portanto, essencial para confirmar se esse padrão se manterá, bem como para aprimorar a compreensão dos processos que condicionam a dinâmica do aquífero.

Nesse contexto, a identificação precoce das tendências e a manutenção de programas de monitoramento contínuo, com a criação de novos poços de observação distribuídos em todo o domínio do aquífero, constituem etapas fundamentais para subsidiar políticas públicas de uso sustentável da água subterrânea. A integração de estratégias de controle da exploração, conservação da recarga e planejamento territorial torna-se imprescindível para assegurar a disponibilidade hídrica futura no SAB.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos aos editores e relatores da revista Derbyana pelas revisões e contribuições ao presente manuscrito.

8 REFERÊNCIAS

- Bayazit, M., & Onoz, B. (2007). To prewhiten or not to prewhiten in trend analysis? *Hydrological Sciences Journal*, 52(4), 611–624. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.4.611>
- Bertol, G. A. (2007). *Avaliação da recarga aquífera anual no aquífero Bauru no Município de Araguari, Minas Gerais* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais]. <http://hdl.handle.net/1843/MPBB-74MN3Y>
- Bertol, G. A., Camargos, C. C., Velásquez, L. N. M., Branco, O. E. A., & Cota, S. D. S. (2006). Aplicação do método do cálculo do balanço hídrico na avaliação da recarga no Aquífero Bauru em Araguari - MG. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. <https://aguassubterraneas.emnuvens.com.br/asubterraneas/article/view/22175>
- Blarasin, M. T., Cabrera, A., Matteoda, E., Alincastro, N., & Albo, G. (2016). Weekly and monthly groundwater recharge estimation in a rural piedmont environment using the water table fluctuation method. *International Journal of Environmental & Agriculture Research (IJOEAR)*, 2(5), 104–113.
- Bloomfield, J. P., & Marchant, B. P. (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 4769–4787. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013>
- Brandt Neto, M., Petri, S., & Coimbra, A. M. (1978). Considerações sobre a estratigrafia e ambiente de sedimentação da Formação Bauru. *Anais do 30º Congresso Brasileiro de Geologia*, Recife, p. 557–566. <http://www.sbgeo.org.br/home/pages/44>
- Campos, J. C. V. (2022). Interação das águas subterrâneas/superficiais: um paradigma na gestão dos recursos hídricos – Sistema Aquífero Bauru no Triângulo Mineiro-MG

- [Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista]. <http://hdl.handle.net/11449/236190>
- Campos, J. C. V., Gastmans, D., & Santarosa, L. V. (2023). Utilização do GRACE no cálculo da recarga das águas subterrâneas no Sistema Aquífero Bauru na Bacia do Rio São Jerônimo - Triângulo Mineiro. *Revista Águas Subterrâneas*, 37(2), Artigo e-30168. <https://doi.org/10.14295/ras.v37i2.30168>
- Campos, J. C. V., Gastmans, D., Santarosa, L. V., Lopes, I. O., Alves, M. C. P., Martins, L. F., & Fabian, A. J. (2021). Estimativas da Recarga do Sistema Aquífero Bauru em uma Microbacia no Entorno da Cidade de Uberaba – MG. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44, Artigo 40585. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_40585
- Carroll, R. W. H., Niswonger, R. G., Ulrich, C., Varadharajan, C., Siirila-Woodburn, E. R., & Williams, K. H. (2024). Declining groundwater storage expected to amplify mountain streamflow reductions in a warmer world. *Nature Water* 2, 419–433. <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00239-0>
- Climate Hazards Group. (2024). CHIRPS Daily: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (Version 2.0). Santa Barbara: University of California (UCSB).
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil). (2012). *Projeto de redes de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas: Relatório diagnóstico – Bacia Sedimentar do Paraná*.
- Delottier, H., Pryet, A., Lemieux, J. M., & Dupuy, A. (2018). Estimating groundwater recharge uncertainty from joint application of an aquifer test and the watertable fluctuation method. *Hydrogeology Journal*, 26(7), 2495–2505. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1790-6>
- Dias, L. C., Fernandes, L. L., Teixeira, L. C. G. M., Lira, B. R. P., & Barbosa, P. A. V. (2025). Trend analysis of streamflow and rainfall of Amazon River. *Theoretical and Applied Climatology*, 156, Article 222. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05457-4>
- Franzini, A. S. (2012). *Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: Relatório diagnóstico – Sistema aquífero Bauru-Caiuá nos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná*. Volume 14 - Coleção Diagnóstico dos Aquíferos Sedimentares do Brasil.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, Article 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gonçalves, V. F. M., & Manzione, R. L. (2019). Estimativa da recarga das águas subterrâneas no sistema Aquífero Bauru (SAB). *Revista GeoUERJ*, 35, Artigo e37063. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2019.37063>
- Gonçalves, V. F. M., Manzione, R. L., Santarosa, L. V., & Nava, A. (2017). Estimativa da recarga para o sistema Aquífero Bauru no Município de Assis/SP. *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.28726>
- Grosso, J. D., Moraes, J. M., Beduschi, C. E., & Martinelli, L. A. (2005). Análise de séries temporais de vazão e precipitação em algumas bacias do Estado de São Paulo com diferentes graus de intervenções antrópicas. *Geociências*, 24(2), 181-193.
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182–196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Healy, R. W. (2010). *Estimating groundwater recharge*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511780745>
- Helsel, D. R., Hirsch, R. M., Ryberg, K. R., Archfield, S. A., & Gilroy, E. J. (2020). Statistical Methods in Water Resources. In U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 4 - *Hydrologic Analysis and Interpretation* (chapter A3). <https://doi.org/10.3133/tm4a3>

- Hirata, R., Goodarzi, L., Rörig, F. S., Alves, L. M., & Bertolo, R. (2025). Climate change impacts on groundwater: a growing challenge for water resources sustainability in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197, Article 784. <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14235-8>
- Hirsch, R. M., & Slack, J. R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research*, 20(6), 727-732. <https://doi.org/10.1029/WR020i006p00727>
- Hussain, M. M., & Mahmud, I. (2019). pyMannKendall: a Python package for non-parametric Mann-Kendall family of trend tests. *Journal of Open Source Software*, 4(39), Article 1556. <https://doi.org/10.21105/joss.01556>
- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Fallatah, O., & Kirchner, J. W. (2024). Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature*, 625, 715–721. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods* (4th ed.). Charles Griffin.
- Lins, H. F., & Slack, J. R. (1999). Streamflow trends in the United States. *Geophysical Research Letters*, 26(2), 227–230. <https://doi.org/10.1029/1998GL900291>
- Lourencetti, J., Faria, G. A., Felizardo, L. M., Prates, M. M., & Oliveira, J. N. (2020). Estimativa do decréscimo do nível potenciométrico do aquífero Bauru. *Research, Society and Development*, 9(10), Article e8939109303. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9303>
- Maldaner, C. H. (2010). *Recarga de aquífero em área urbana: estudo de caso de Urânia (SP)* [Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP. <https://doi.org/10.11606/D.44.2010.tde-08012011-201628>
- Manara, C.M., Teramoto, E.H. & Chang, H.K. (2025). Assessing groundwater recharge of a shallow aquifer in an urbanized area. *Environmental Earth Sciences*, 84, Article 372. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12370-6>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Menegazzo, M. C., Catuneanu, O., & Chang, H. K. (2016). The South American retroarc foreland system: The development of the Bauru Basin in the back-bulge province. *Marine and Petroleum Geology*, 73, 131–156. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.02.027>
- Nguyen, H. M., Ouillon, S., & Vu, V. D. (2022). Sea level variation and trend analysis by comparing Mann–Kendall Test and innovative trend analysis in front of the Red River Delta, Vietnam (1961–2020). *Water*, 14(11), Article 1709. <https://doi.org/10.3390/w14111709>
- Owor, M., Taylor, R. G., Tindimugaya, C., & Mwesigwa, D. (2009). Rainfall intensity and groundwater recharge: empirical evidence from the Upper Nile Basin. *Environmental Research Letters*, 4(3), Article 035009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/035009>
- Paula e Silva, F., Kiang, C. H., & Caetano-Chang, M. R. (2005). Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. *Revista Águas Subterrâneas*, 19(2), 19–36. <https://doi.org/10.14295/ras.v19i2.8225>
- Qiu, Y., Famiglietti, J. S., Behrangi, A., Farmani, M. A., Yousefi Sohi, H., Gupta, A., Hung, F., Abdelmohsen, K., & Niu, G-Y. (2025). The strong impact of precipitation intensity on groundwater recharge and terrestrial water storage change in Arizona, a typical dryland. *Geophysical Research Letters*, 52, Article e2025GL114747. <https://doi.org/10.1029/2025GL114747>
- Ramires, T. (2017). *Balanço hídrico e recarga do Sistema Aquífero Bauru (SAB) com dados de diferentes resoluções espaciais em Águas de Santa Bárbara-SP* [Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista]. <http://hdl.handle.net/11449/150742>
- Richey, A. S., Thomas, B. F., Lo, M.-H., Famiglietti, J. S., Swenson, S., & Rodell, M. (2015). Uncertainty in global groundwater storage estimates in a Total Groundwater Stress framework. *Water Resources Research*, 51(7), 5198–5216. <https://doi.org/10.1002/2015WR017351>

- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Serviço Geológico do Brasil. (2025a). RIMAS – Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas. <https://rimasweb.sgb.gov.br>. Acesso em 10 Ago. 2025.
- Serviço Geológico do Brasil. (2025b). Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). <https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/>. Acesso em 24 nov. 2025.
- Sneyers, R. (1990). *On the statistical analysis of series of observations*. World Meteorological Organization (Technical Note, n. 143).
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M. F. P., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yecheili, Y., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P. J.-F., Holman, I. & Treidel, H. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3, 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2(4), 359–392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C. J., Polat, I., Feng, Y., Moore, E. W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E. A., Harris, C. R., Archibald, A. M., Pedregosa, A., Mulbregt, P., & SciPy 1.0 Contributors. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Walczuk, A., Campos, J. E. G., & Teles, L. S. B. (2025). Potential and effective recharge of the Federal District shallow aquifers, Brazilian savanna region—Coupled analysis of GLDAS2, WaterTable Fluctuation (WTF), and rainfall pattern. *Journal of South American Earth Sciences*, 156, Article 105426. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105426>
- Wu, J., Zhang, R., & Yang, J. (1996). Analysis of rainfall-recharge relationships. *Journal of Hydrology*, 177(1–2), 143–160. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02935-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02935-4)
- Xing, L., Huang, L., Chi, G., Yang, L., Li, C., & Hou, X. (2018). A Dynamic study of a karst spring based on wavelet analysis and the Mann-Kendall Trend Test. *Water*, 10(6), Article 698. <https://doi.org/10.3390/w10060698>
- Yadav, R., Tripathi, S. K., Pranuthi, G., & Dubey, S. K. (2014). Trend analysis by Mann-Kendall test for precipitation and temperature for thirteen districts of Uttarakhand. *Journal of Agrometeorology*, 16(2), 164–171. <https://doi.org/10.54386/jam.v16i2.1507>
- Yue, S., & Wang, C. (2004). The Mann-Kendall Test Modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management*, 18, 201–218. <https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60>
- Zambianqui, R. P. (2018). *Monitoramento dos níveis freáticos do Aquífero Bauru (Formação Adamantina) no município de Bastos-SP frente a correlações com o regime de precipitação* [Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista]. <http://hdl.handle.net/11449/194279>
- Zheng, W., Wang, S., Tan, K., Shen, Y., & Yang, L. (2023). Rainfall intensity affects the recharge mechanisms of groundwater in a headwater basin of the North China plain. *Applied Geochemistry*, 155, Article 105742. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105742>

Manuscrito submetido em 10 de setembro de 2025, aceito em 3 de dezembro de 2025.

Como citar: Peres, G. S., Crioni, P. L. B., Manara, C. M., Teramoto, E. H., & Chang, H. K. (2025). Análise de tendências em séries históricas hidrológicas do Sistema Aquífero Bauru (SAB). *Derbyana*, 46, Artigo e875.

Contribuição dos autores: G.S.P.: conceituação, metodologia, redação do texto, interpretação estatística e elaboração das figuras. P.L.B.C.: levantamento de dados, redação, revisão e elaboração dos mapas. C.M.M.: metodologia, organização dos dados e redação. E.H.T.: conceituação, revisão, edição e organização dos dados. C.H.K.: revisão, edição e organização dos dados.

Conflito de interesses: Os autores declaram que não há conflito de interesses.

