Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
ISSN 2237-8642

ANÁLISE DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL

Flow analysis in the Paraíba do Sul river watershed

Análisis de caudales en la cuenca del río Paraíba do Sul

Douglas da Silva Ferreira
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)
silva.douglas37@gmail.com

Gildo Rafael de Almeida Santana
Instituto Federal Fluminense
gildoraphael@gmail.com

Eliane Barbosa Santos
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF)
elianebs@uenf.br

Resumo: A compreensão dos padrões das variáveis do ciclo hidrológico é essencial para a gestão eficiente dos recursos hídricos. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi analisar as vazões máximas, mínimas e médias anuais e as principais vazões de referência na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, identificando tendências e padrões que possam contribuir para a compreensão da dinâmica hídrica da região. Para isso, foram utilizadas 12 estações fluviométricas localizadas nas regiões do Alto Paraíba do Sul (trecho paulista - TP), Médio Paraíba do Sul (MP) e Piabanha (PB), no período de 1987 a 2023, obtidas da rede hidrometeorológica gerenciada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Após verificar a qualidade dos dados, foram avaliadas as médias anuais dos valores máximos, mínimos e médios das vazões, além de suas tendências. Das 12 estações analisadas, Volta Redonda (MP) e Paraíba do Sul (MP) registraram os maiores valores de vazão, com médias máximas anuais de 782,9 m^3/s e 693,3 m^3/s, respectivamente. Na avaliação de tendências, constatou-se que a estação Santa Branca (TP) apresentou tendência estatisticamente significativas a 5% nas vazões máximas, mínimas e médias anuais. Em relação às vazões de referência, verificou-se que a região do MP possui a maior disponibilidade hídrica, com a estação de Volta Redonda (MP) registrando um valor de Q90 de 401,5 m^3/s. Por outro lado, as regiões do TP e norte de PB apresentaram os menores valores, com destaque para a estação Fazenda Santa Clara (TP), com Q90 de 6,14 m^3/s.

Palavras-chave: Vazões de referência. Tendência climática. Disponibilidade hídrica.

Abstract: Understanding the patterns of variations in the hydrological cycle is essential for the efficient management of water resources. In this context, the objective of this study was to analyze the annual

maximum, minimum, and mean flows, as well as the main reference flows in the Paraíba do Sul River watershed, identifying trends and patterns that may contribute to a better understanding of the region's water dynamics. For this purpose, data from 12 streamflow gauging stations located in the Alto Paraíba do Sul (São Paulo section - TP), Médio Paraíba do Sul (MP), and Piabanha (PB) regions were analyzed for the period from 1987 to 2023. The data were obtained from the hydrometeorological network managed by the National Water and Basic Sanitation Agency. After verifying data quality, annual averages of maximum, minimum, and mean flows were assessed, along with their trends. Among the 12 stations analyzed, Volta Redonda (MP) and Paraíba do Sul (MP) recorded the highest flow values, with annual maximum flow averages of 782.9 m³/s and 693.3 m³/s, respectively. In trend analysis, it was found that the Santa Branca (TP) station showed statistically significant trends at the 5% level in maximum, minimum, and mean annual flows. Regarding reference flows, the MP region exhibited the highest water availability, with the Volta Redonda (MP) station recording a Q90 value of 401.5 m³/s. On the other hand, the TP and northern PB regions showed the lowest values, with the Fazenda Santa Clara (TP) station standing out with a Q90 of 6.14 m³/s.

Keywords: Reference flows. Climate trend. Water availability.

Resumen: La comprensión del comportamiento de las variables del ciclo hidrológico es esencial para la gestión eficiente de los recursos hídricos. En este contexto, el objetivo de este estudio fue analizar los caudales máximos, mínimos y medios anuales, así como los principales caudales de referencia en la Cuenca del Río Paraíba do Sul, identificando tendencias y patrones que puedan contribuir a una mejor comprensión de la dinámica hídrica de la región. Para ello, se utilizaron datos de 12 estaciones fluviométricas ubicadas en las regiones de Alto Paraíba do Sul (tramo paulista - TP), Medio Paraíba do Sul (MP) y Piabanha (PB) en el período de 1987 a 2023, obtenidos de la red hidrometeorológica gestionada por la Agencia Nacional de Aguas y Saneamiento Básico. Después de verificar la calidad de los datos, se evaluaron los promedios anuales de los valores máximos, mínimos y medios de los caudales, además de sus tendencias. De las 12 estaciones analizadas, Volta Redonda (MP) y Paraíba do Sul (MP) registraron los mayores valores de caudal, con promedios anuales máximos de 782,9 m³/s y 693,3 m³/s, respectivamente. En el análisis de tendencias, se encontró que la estación Santa Branca (TP) presentó tendencias estadísticamente significativas al 5% en los caudales máximos, mínimos y medios anuales. En cuanto a los caudales de referencia, se verificó que la región del MP tiene la mayor disponibilidad hídrica, con la estación de Volta Redonda (MP) registrando un valor de Q90 de 401,5 m³/s. Por otro lado, las regiones de TP y el norte de PB presentaron los valores más bajos, destacándose la estación Fazenda Santa Clara (TP), con un Q90 de 6,14 m³/s.

Palabras clave: Caudales de referencia. Tendencia climática. Disponibilidad hídrica.

Submetido em: 01/03/2025
Aceito para publicação em: 20/06/2025
Publicado em: 03/07/2025

1. INTRODUÇÃO

A crescente urbanização, o avanço da industrialização e a expansão da agricultura têm gerado impactos relevantes no uso dos recursos naturais. Como consequência, aumentou-se também a demanda hídrica para suprir todas as atividades de origem antrópica (Sousa et al., 2020). Segundo a UNESCO (2012), há uma perspectiva de aumento da demanda pela água em até 40% até o ano de 2030. Tal perspectiva, aliada às mudanças climáticas, têm levado a discussão da implementação de medidas que visem garantir a segurança hídrica (Melo; Johnsson, 2017).

A segurança hídrica pode ser definida como a capacidade que uma população tem de garantir acesso e uso adequado dos recursos hídricos de modo a garantir meios de sobrevivência, desenvolvimento socioeconômico e bem estar humano, sem causar danos ao meio ambiente (ONU, 2013). Dessa forma, o conceito segurança hídrica traz uma nova e importante mudança na forma de gestão dos recursos hídricos, considerando os desafios crescentes relacionados aos múltiplos usos da água.

Nesse contexto, a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHRPS) se destaca por sua localização na região mais rica do Brasil, caracterizada por uma alta densidade populacional. Essa condição resulta em uma alta demanda hídrica, voltada principalmente para os setores de abastecimento urbano, industrial e agropecuário (CEIVAP, 2020). Entretanto, estudos de Marengo e Alves (2005) apontam para tendências negativas estatisticamente significativas (aos níveis de 5% ou 1%) nas vazões de algumas estações fluviométricas da bacia, não necessariamente associadas às variações de chuva, sugerindo forte influência de fatores antrópicos. Em estudos mais recentes, Santana, Santos e Silva (2020) e Santana, Santos e Lugon (2023) identificaram alterações no regime pluviométrico da BHRPS em uma escala local, com alguns postos pluviométricos apresentando tendência negativa de precipitação e outros apresentando tendência positiva significativa a 5%.

Em um cenário de escassez, os recursos hídricos da BHRPS concentram intensos conflitos de uso, agravados pelas grandes transposições de água que atravessam seu território. Destacam-se a transferência média de 120 m^3/s para o rio Guandu, iniciada há mais de meio século para geração energia elétrica e, atualmente, principal fonte de abastecimento público da Região Metropolitana do Rio de Janeiro; o túnel de 15 km entre as represas Jaguari e Atibainha, concebido em 2017 para captar de 5,13 m^3/s a 8,5 m^3/s durante crises hídricas e

reforçar o Sistema Cantareira de São Paulo; e a captação no rio Macabu, desviada para o rio Macaé para produção de energia elétrica, que reduz drasticamente a vazão natural em determinados períodos do ano (CEIVAP, 2021).

O acúmulo dessas demandas locais e interestaduais tem resultado em disputas expressivas entre os usuários, evidenciadas, por exemplo, nos conflitos entre os governos de São Paulo e Rio de Janeiro envolvendo o projeto Jaguari-Cantareira, analisado por Cavalcanti e Marques (2016), que investigaram os embates ocorridos durante a crise hídrica de 2014-2015. Adicionalmente, a barragem e transposição do rio Macabu configuram um cenário potencialmente conflituoso, com impactos relevantes sobre a hidrodinâmica fluvial, conforme apontado por Freitas et al. (2014).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise das principais vazões de referência e das vazões máximas, mínimas e médias na BHRPS, identificando tendências e padrões que possam contribuir para a compreensão da dinâmica hídrica da região. Essa análise visa fornecer subsídios para a gestão eficiente dos recursos hídricos e para o desenvolvimento de estratégias que assegurem a segurança hídrica da bacia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização da Área e Estudo

A BHRPS localizada na região Sudeste do Brasil, abrange um total de 184 municípios e possui uma área de drenagem de 61.307 km². Essa área está situada entre os paralelos 20°26’ e 23°00’ de latitude sul e os meridianos 41°00’ e 46°30’ de longitude oeste de Greenwich. Dentre essa extensão, 13.934 km² correspondem ao estado de São Paulo, 26.674 km² ao estado do Rio de Janeiro, e 20.699 km² ao estado de Minas Gerais (CEIVAP, 2020).

O Rio Paraíba do Sul, cuja bacia hidrográfica está inteiramente inserida no bioma Mata Atlântica, nasce na Serra da Bocaina, no estado de São Paulo, a uma altitude de 1.800 metros. Sua foz está localizada na praia de Atafona, no município de São João da Barra, estado do Rio de Janeiro, onde deságua no Oceano Atlântico. Ao longo de seu percurso, o rio percorre 1.100 km entre sua nascente e sua foz (CEIVAP, 2020).

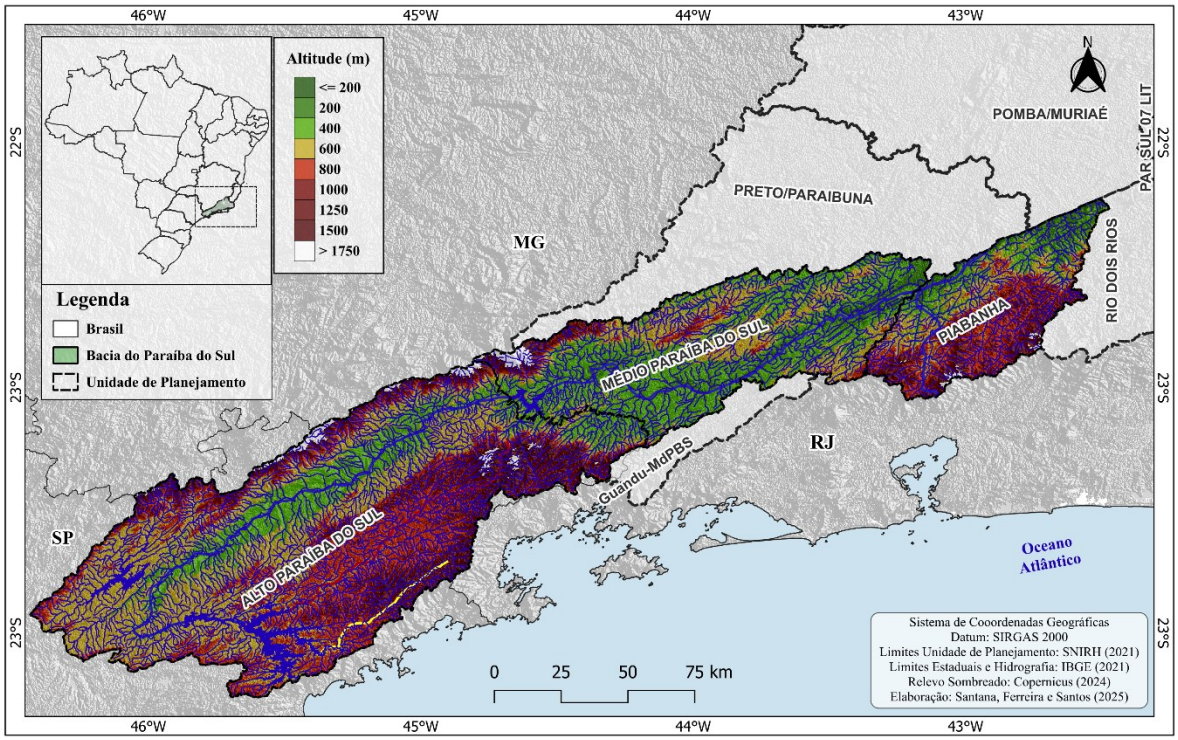
O clima da região é bastante diversificado, com temperaturas médias anuais variando entre 18°C e 24°C (Marengo; Alves, 2005). De acordo com Alvares et al. (2013), o clima da

BHRPS pode ser classificado em cinco grupos principais: tropical com verão úmido e inverno seco (Aw), além de climas tropicais temperados quentes (Cwa, Cwb, Cfa, Cfb). O clima tropical com verão úmido e inverno seco é predominante nas regiões norte e noroeste da bacia, enquanto os demais tipos climáticos apresentam uma distribuição heterogênea ao longo da área (Santana; Santos; Lugon, 2023). Em termos de precipitação, os maiores volumes são registrados em áreas com altitudes superiores a 1.000 metros, como em Visconde de Mauá, na Serra da Mantiqueira. Em contraste, a região de depressão do Rio Paraíba do Sul, assim como as áreas norte e noroeste fluminense, apresentam totais pluviométricos reduzidos, inferiores a 1.000 mm/ano (Brasiliense et al., 2020). A estação chuvosa ocorre principalmente durante o verão, com destaque para os meses de dezembro e janeiro, quando os volumes mensais de precipitação atingem 200 mm e 150 mm, respectivamente. Já nos meses de inverno, de maio a agosto, os volumes de precipitação são os mais baixos do ano, com médias inferiores a 50 mm/mês (MARENGO; ALVES, 2005).

Para este estudo, foram selecionadas as três regiões com maior demanda hídrica na BHRPS: o trecho paulista do Paraíba do Sul, o Médio Paraíba do Sul, e a região de Piabanha (CEIVAP, 2020). A região hidrográfica paulista abriga o maior parque industrial da bacia e se destaca pela presença de usinas hidrelétricas e grandes reservatórios. No Médio Paraíba do Sul, encontram-se importantes estruturas, como o reservatório de Funil e a barragem de Santa Cecília. A região de Piabanha, por sua vez, é a menos populosa entre as três, com 732.967 habitantes distribuídos em cinco municípios (CEIVAP, 2020).

A Figura 1 apresenta a localização, hipsometria e hidrografia da área de estudo e as Unidades de Planejamento: Alto Paraíba do Sul, Médio Paraíba do Sul e Piabanha. Observa-se que a região tem relevo muito acidentado, de colinoso a montanhoso e ultrapassa os 1500 metros em algumas regiões.

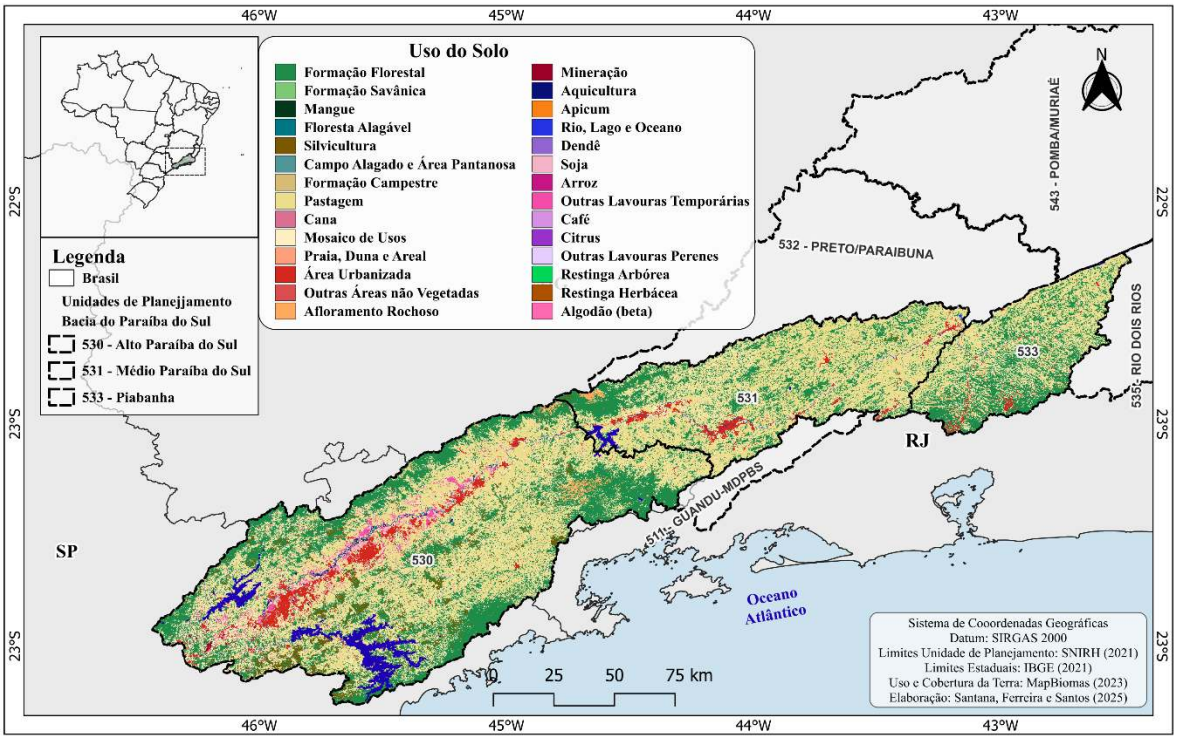
Figura 1 - Localização, hipsometria e hidrografia da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 2 apresenta o uso e cobertura do solo da área de estudo, apresentando uma visão abrangente da ocupação do território e dos elementos que influenciam diretamente na dinâmica hídrica da região. Observa-se uma predominância de atividades agropecuárias (como pastagens, cana-de-açúcar, café e culturas temporárias) e áreas urbanizadas que exercem forte pressão sobre os recursos hídricos, além da presença de fragmentos de formações florestais e savânicas que desempenham papel fundamental na conservação ambiental.

Figura 2 – Uso e cobertura do solo da área de estudo.

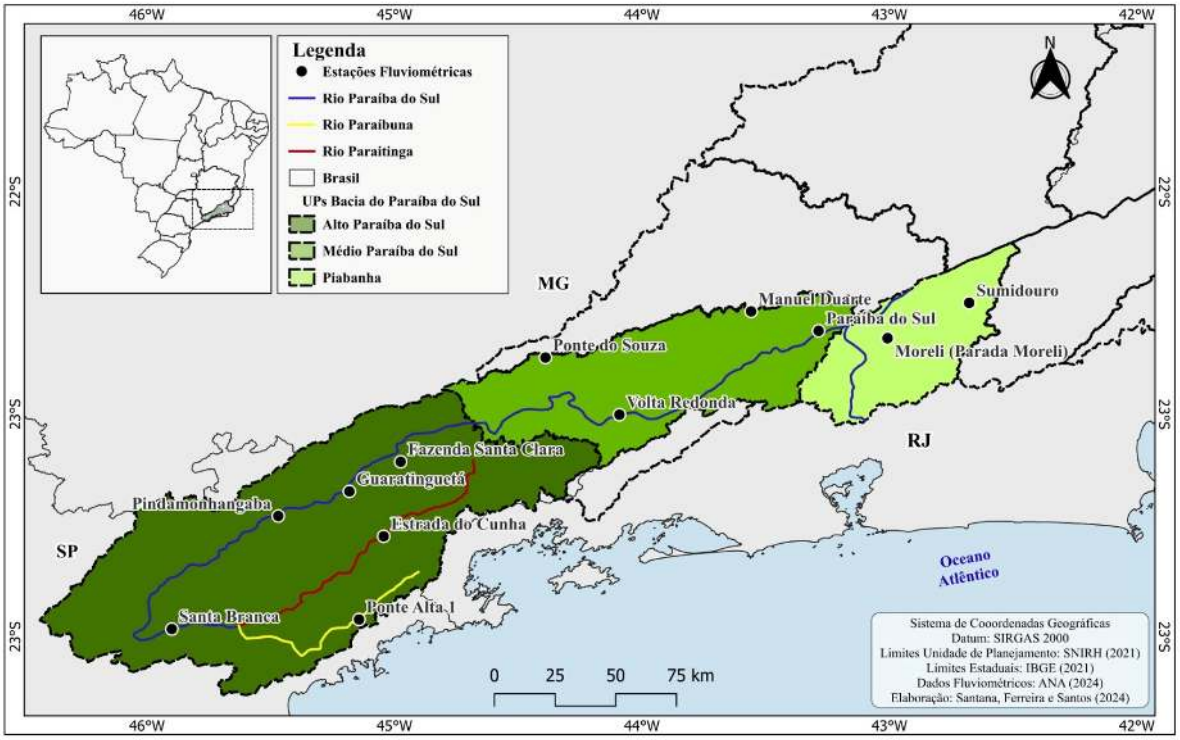


Fonte: Dados MapBiomas (2023). Elaborado pelos autores (2025).

2.2. Dados de Vazão

Para a realização deste estudo, foram utilizados dados diários de vazão de 12 estações fluviométricas localizadas nas regiões do Alto Paraíba do Sul (trecho paulista - TP), Médio Paraíba do Sul (MP) e Piabanha (PB), na BHRPS. Os dados, que abrangem o período de 1987 a 2023, foram obtidos junto à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A Figura 3 apresenta a distribuição espacial das estações fluviométricas utilizadas neste estudo.

Figura 3 - Distribuição espacial das estações fluviométricas utilizadas neste estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 4 apresenta o percentual de dados ausentes, por ano, das 12 estações fluviométricas analisadas. Em 2023, observa-se ausência total de registros na estação Fazenda Santa Clara (TP), além de percentuais superiores a 50% nas estações de Sumidouro (PB), Moreli (Parada Moreli) (PB), Volta Redonda (MP), Ponte de Souza (MP) e Estrada do Cunha (TP). Ressalta-se ainda que a estação Volta Redonda (MP) apresentou ausência superior a 50% também nos anos de 2020 e 2021.

Figura 4 - Percentual de dados ausentes por ano das estações fluviométricas utilizadas neste estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O processamento e a organização dos dados foram realizados utilizando a linguagem de programação R (R Core Team, 2022). A análise espacial dos resultados foi realizada por meio do método de interpolação inverso da distância ponderada (Inverse Distance Weighting - IDW), utilizando o software de Sistema de Informação Geográfica QGIS (versão 3.34.13). O método IDW emprega uma combinação linear ponderada dos pontos amostrados, onde o peso de cada ponto é inversamente proporcional à distância. Assim, quanto maior a distância entre o ponto a ser interpolado e um ponto amostrado, menor será o peso atribuído a ele (Silva et al., 2019).

2.2. Análise Descritiva e de Tendência

Para a análise descritiva dos dados, foram calculadas as vazões máximas, mínimas e as médias dos valores observados ao longo do período estudado, que são medidas essenciais para entender o comportamento dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica. As vazões máximas fornecem informações sobre os picos de fluxo, que são cruciais para a gestão de eventos extremos, como enchentes. Já as vazões mínimas ajudam a avaliar os períodos de escassez hídrica, fundamentais para o planejamento de abastecimento e para a identificação de possíveis riscos de seca. Por sua vez, as vazões médias oferecem uma visão geral do regime hidrológico ao longo do tempo.

Para verificar a presença de tendência nas vazões máximas, mínimas e médias anuais foram aplicados o teste de Mann Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) e o estimador de Sen (1968). O teste de Mann Kendall foi desenvolvido para verificar se uma série temporal apresenta uma tendência estatisticamente significativa. A hipótese nula assume a ausência de tendência na série, enquanto a hipótese alternativa indica a presença de tendência, seja em testes bilaterais ou unilaterais.

Para uma série temporal x_1 , x_2 , … , x_n, a estatística do teste é calculada da seguinte forma:

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

onde:

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & se\ x_j > x_i \\ 0, & se\ x_j = x_i \\ -1, & se\ x_j < x_i \end{cases} \quad (2)$$

Kendall (1975) mostrou que a estatística S é normalmente distribuída com média e variância dada por:

$$E(S) = 0 \quad (3)$$

$$VAR(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^{n} f_p(f_p - 1)(2f_p + 5)}{18} \quad (4)$$

onde n representa o número de elementos da série e fp corresponde à frequência de ocorrência do elemento p.

A estatística do teste de Mann-Kendall é obtida a partir do valor de Z_{mk}, o qual pode ser determinado pela seguinte equação:

$$Z_{mk} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}}, & para\ S > 0 \\ 0, & para\ S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}}, & para\ S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Quando um teste bilateral com nível de significância α é aplicado, rejeita-se a hipótese nula de ausência de tendência na série se o valor-p for menor que α. Nesse caso, a tendência é considerada positiva ou negativa, dependendo do sinal do parâmetro Z_{mk}.

Para estimar a magnitude das vazões anuais, foi utilizado o estimador de Sen (Sen, 1968). Para isso, é necessário calcular todos os declives entre cada par de variáveis j e k:

$$Q_i = \frac{X_j - X_k}{j - k}, \quad com\ j > k, \text{ para } i = 1, 2, 3, \ldots, N \quad (6)$$

onde X_j e X_k correspondem aos valores da variável em análise nos anos j e k.

Para uma série com n valores, o número de pares possíveis para a estimativa de Q é calculado como N = n(n - 1)/2. O estimador de declive de Sen é definido como a mediana desses N valores de Q_i .

2.3 Vazões de Referência

A vazão de referência pode ser definida como o valor que estabelece o limite máximo de uso da água em um corpo hídrico (Silva et al., 2006). Na concessão de outorgas para uso da água, é importante considerar o nível de rigor adotado ao estabelecer essa vazão. Vazões de referência mais conservadoras oferecem maior segurança hídrica, pois limitam a alocação de água, mas essa restrição pode reduzir seu uso. Por outro lado, a adoção de vazões de referência menos rigorosas pode aumentar a disponibilidade de água para diferentes atividades, mas com o risco de desabastecimento em determinados períodos (Silva; Monteiro, 2004).

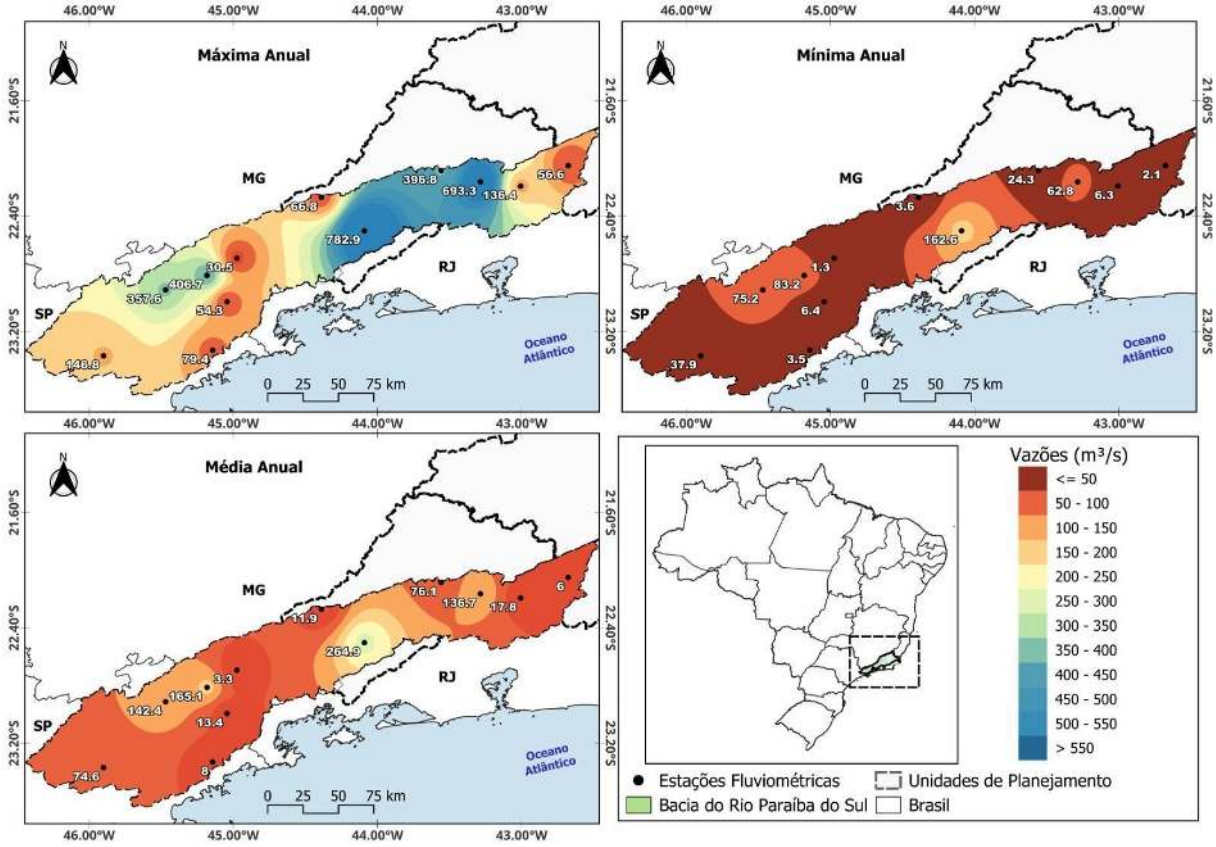
Neste estudo, serão calculadas as principais vazões de referência utilizadas para outorga de água, que são as vazões Q90, Q95 e Q7,10. As vazões Q90 e Q95 correspondem aos percentis 90 e 95, respectivamente, ou seja, são os valores de vazão que são igualados ou superados em 90% e 95% do tempo. A vazão Q7,10, por sua vez, representa a menor vazão média registrada em sete dias consecutivos, com um período de retorno de 10 anos (Silva et al., 2006).

Assim, as vazões mínimas utilizadas como referências apresentam alta permanência ao longo do tempo, como é o caso das vazões Q90 e Q95. Quando há necessidade de assegurar uma maior segurança hídrica, são adotadas vazões mais conservadoras, como a Q7,10 (ANA, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta os valores máximos, mínimos e médios das vazões anuais na região de estudo para o período analisado (1987 a 2023). Na análise das médias das vazões anuais máximas, foi verificado que os menores valores de vazão (menores que 100 m^3/s) foram registrados em três estações do Alto Paraíba do Sul (Fazenda Santa Clara, Estrada do Cunha e Ponte Alta 1), em uma estação da região de Piabanha (Sumidouro) e uma estação do Médio Paraíba do Sul (Ponte de Souza). As maiores médias anuais de vazões máximas foram registradas nas estações de Volta Redonda (MP), Paraíba do Sul (MP) e Guaratinguetá (TP), com valores de 782,9 m^3/s, 693,3 m^3/s e 406,73 m^3/s, respectivamente.

Figura 5 – Valores máximos, mínimos e médios das vazões anuais para o período analisado (1987 a 2023), nas Unidades de Planejamento: Alto Paraíba do Sul, Médio Paraíba do Sul e Piabanha.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Nas médias das vazões mínimas anuais, observa-se que a maior parte da região apresenta valores inferiores a 50 m³/s. Entretanto, no noroeste do Trecho Paulista, foram registradas vazões mínimas anuais superiores a 50 m³/s. Um comportamento semelhante é observado na estação de Paraíba do Sul (MP), localizada nos limites das sub-regiões do Médio Paraíba do Sul. Destaca-se, porém, a região central do Médio Paraíba do Sul, onde se encontra a estação fluviométrica de Volta Redonda, que registra o maior valor mínimo anual da área de estudo, superando 150 m³/s.

É possível observar ainda, na Figura 5, que as médias anuais das vazões são inferiores a 100 m³/s na maioria das estações fluviométricas analisadas, evidenciando a predominância de eventos de baixa vazão neste trecho da BHRPS. Um destaque é a estação Fazenda Santa Clara (TP), que apresenta valores notavelmente baixos, com uma mínima anual de 1,3 m³/s. Em contrapartida, vazões médias anuais superiores a 100 m³/s foram registradas no noroeste do Trecho Paulista, na região central do Médio Paraíba do Sul e nos limites entre o Médio Paraíba do Sul e Piabanha.

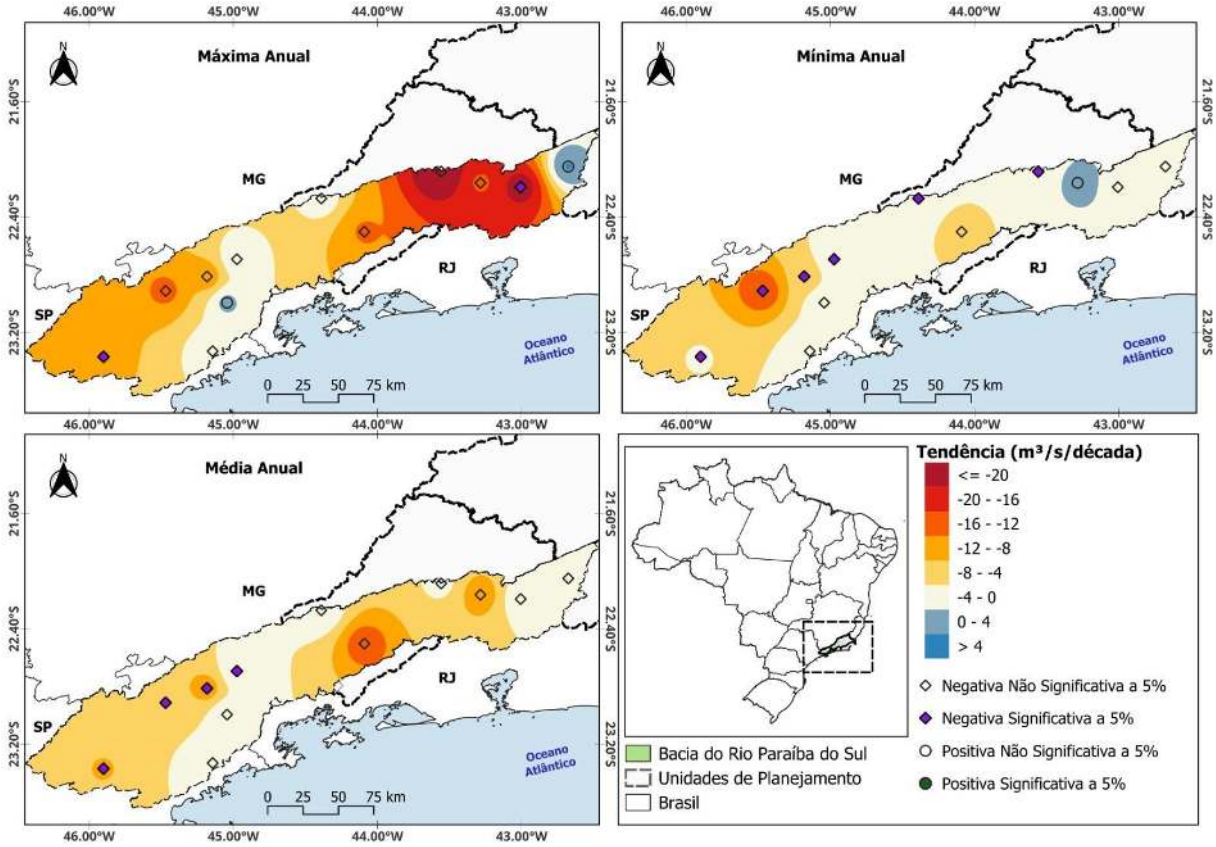
De modo geral, observa-se que algumas estações fluviométricas apresentam vazões relativamente menores em comparação com outras. Essa variação está, em grande parte, associada à localização das estações de monitoramento. Muitas delas estão situadas em afluentes do Rio Paraíba do Sul que, naturalmente, possuem vazões menores. Exemplos dessas estações incluem Estrada do Cunha (TP), localizada no Rio Paraitinga; Fazenda Santa Clara (TP), no Rio Bocaina; Manuel Duarte (MP), Moreli (Parada Moreli) (PB) e Ponte do Souza (MP), no Rio Preto; Ponte Alta 1 (TP), no Rio Paraibuna; e Sumidouro (PB), no Rio Paquequer (ANA, s.d).

Mesmo estando localizada no curso principal do Rio Paraíba do Sul, há casos em que a estação fluviométrica registra vazões inferiores às observadas em determinados trechos do rio. É o caso da estação Santa Branca (TP), que apresenta as menores vazões em comparação com outras estações situadas ao longo do Rio Paraíba do Sul. Essa variação deve-se ao reservatório de Santa Branca, que retém uma parcela expressiva das águas do rio antes que estas alcancem a estação fluviométrica. O mesmo ocorre para a estação Paraíba do Sul (MP), que sofre uma redução da vazão devido ao reservatório de Santa Cecília (CEIVAP, s.d.).

Vale destacar que, mesmo na ausência de reservatórios, algumas estações fluviométricas apresentam grandes variações nas vazões. Por exemplo, a estação Volta Redonda (MP) registra uma vazão média anual de 264,93 m^3/s, enquanto a estação Guaratinguetá (TP), localizada a montante, possui uma média anual de 165,10 m^3/s. Essa diferença ocorre devido ao aporte de água de diversos rios afluentes que deságuam no Rio Paraíba do Sul ao longo do seu percurso (CEIVAP, s.d.).

A Figura 6 apresenta as tendências estatisticamente significativas (ao nível de 5%) das vazões máximas, mínimas e médias anuais, bem como suas magnitudes. Observa-se que, das 12 estações fluviométricas analisadas, 7 apresentaram tendências significativas ao nível de significância de 5% para pelo menos uma das três vazões (máxima, mínima e média). Adicionalmente, todas as três unidades de planejamento utilizadas no estudo registraram pelo menos uma estação com tendência significativa para alguma das vazões analisadas. É importante destacar também que todas as tendências significativas foram negativas, indicando uma redução nas vazões ao longo do tempo. Esse resultado pode estar relacionado a diversos fatores, como alterações climáticas, uso e ocupação do solo, ou outras mudanças ambientais e antrópicas que afetam o regime hídrico da região.

Figura 6 - Tendências temporais das vazões máximas, mínimas e médias nas Unidades de Planejamento: Alto Paraíba do Sul, Médio Paraíba do Sul e Piabanha.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

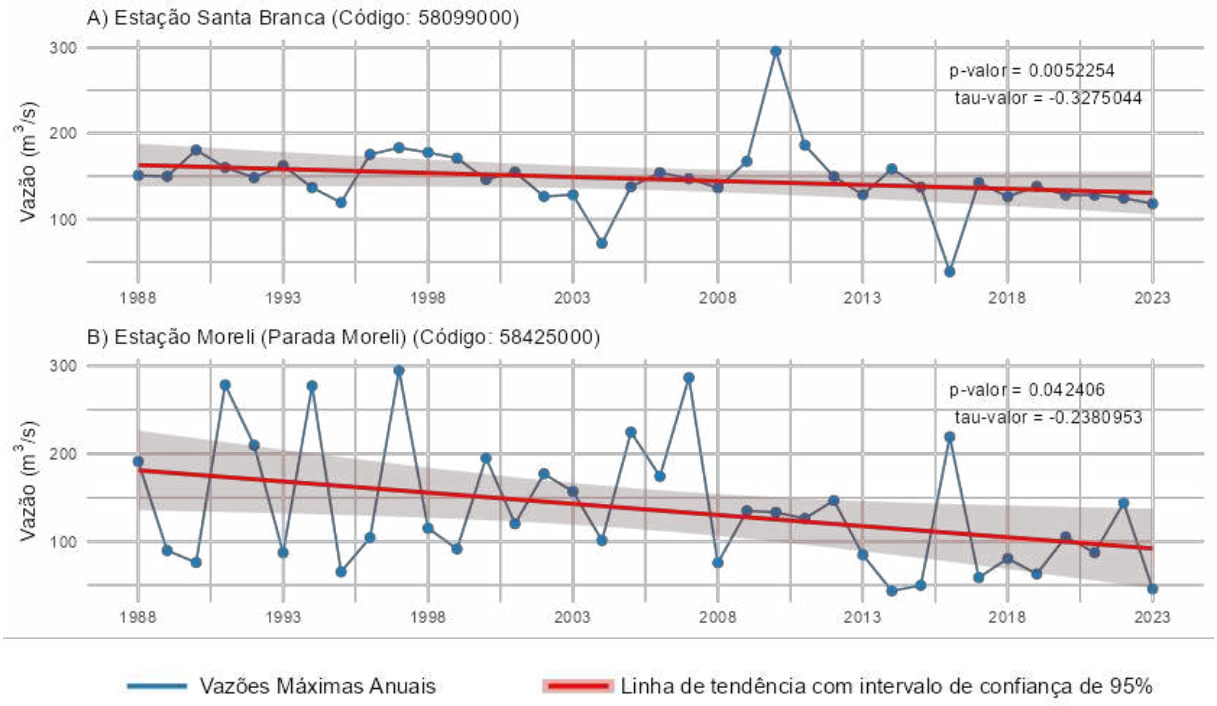
Na Figura 6, também é apresentada a magnitude das tendências por década. Observa-se que a região central do Médio Paraíba do Sul e a região do Piabanha registram os maiores decréscimos nas vazões máximas, com uma magnitude de diminuição inferior a -20 m³/s por década. Em contrapartida, as estações fluviométricas de Sumidouro, no norte do Piabanha, e Estrada do Cunha, na região central do Trecho Paulista, exibem um comportamento mais estável, com magnitudes nas vazões máximas entre 0 e 4 m³/s por década.

Em relação às tendências das vazões médias e mínimas, foi observado uma redução menos acentuada quando comparada às vazões máximas, cujas quedas mais expressivas ocorreram em regiões com maior urbanização e uso intensivo do solo. Somente as estações de Pindamonhangaba (TP) e Volta Redonda (MP) se destacam por apresentarem magnitudes de diminuição inferiores a -12 m³/s por década, nas vazões mínimas e médias. No caso de Pindamonhangaba (TP), localizada na região do Alto Paraíba do Sul, além da urbanização, a área no entorno é caracterizada por formações florestais e savânicas, além do cultivo

extensivo de cana-de-açúcar ao longo do Rio Paraíba do Sul, elementos que, juntos, exercem forte influência sobre o regime hidrológico local.

Nas Figuras 7, 8 e 9 são apresentadas as séries temporais das estações fluviométricas que apresentaram tendência significativa ao nível de significância de 5%, para as vazões máximas, mínimas e médias anuais, respectivamente. Na Figura 7, observa-se as séries históricas das duas estações fluviométricas que apresentaram tendência significativa para as vazões máximas anuais: Santa Branca (TP) e Moreli (Parada Moreli) (PB).

Figura 7 - Série temporal das vazões máximas anuais para os postos fluviométricos que apresentaram tendência significativa (ao nível de significância de 5%): A. Estação Santa Branca-TP, B. Estação Moreli (Parada Moreli)-PB.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Para a estação Santa Branca (TP), destaca-se que, as vazões máximas anuais se concentraram entre 100 e 200 m³/s, com apenas três eventos extremos fora desse intervalo, registrados em 2004, 2010 e 2016. As menores vazões máximas anuais ocorreram em 2004 e 2016, com valores de 71,63 m³/s e 38,45 m³/s, respectivamente. Em contraste, o ano de 2010 registrou a maior vazão máxima do período analisado, alcançando 295,77 m³/s. Esses dados evidenciam a variabilidade nas vazões máximas e destacam os anos de 2004, 2010 e 2016 como eventos relevantes no histórico da estação.

Para a estação Moreli (Parada Moreli) (PB), observa-se que os dados apresentam uma maior variabilidade, com picos de máximas superiores a 250 m³/s e picos de mínimas inferiores a 100 m³/s. Observa-se também, nas Figuras 6 e 7, que a tendência negativa foi mais acentuada, com magnitude de diminuição inferior a -25 m³/s por década, em comparação a estação Santa Branca (TP) que apresentou magnitude de diminuição inferior a -9,5 m³/s por década. Também é possível notar que houve uma mudança no comportamento das vazões máximas a partir de 2009, na intensidade e variabilidade dos dados, com os menores valores registrados nos anos de 2014, 2015 e 2023, cujas vazões máximas anuais foram, respectivamente, 43,42 m³/s, 49,78 m³/s e 45,72 m³/s.

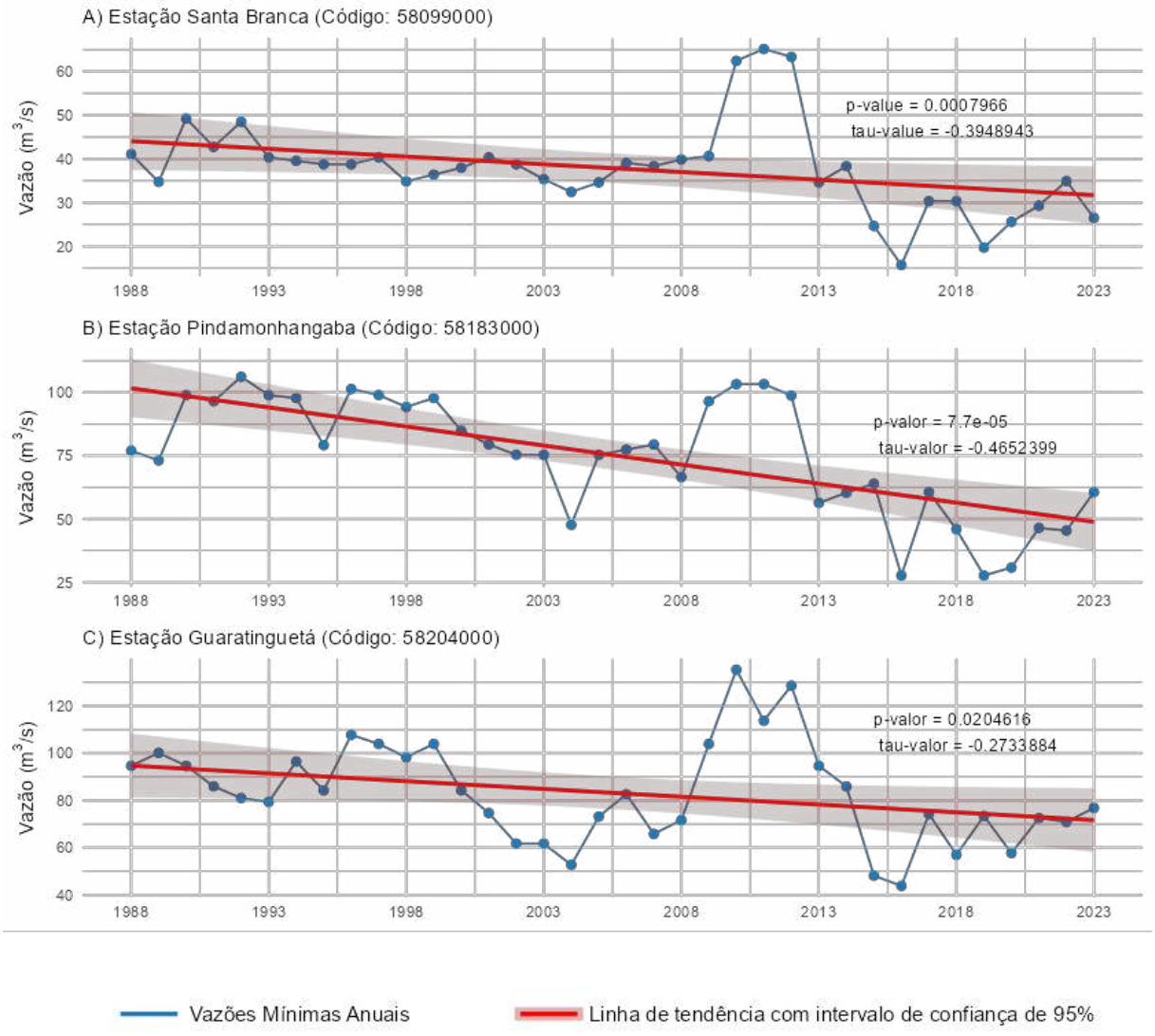
Essas tendências de redução de vazões, especialmente nas regiões urbanizadas e sob elevada pressão antrópica, somadas ao uso intensivo do solo, marcado pela predominância de pastagens e áreas agrícolas, evidenciam um desequilíbrio crescente entre a oferta e a demanda hídrica. Esse quadro é agravado pela fragmentação da vegetação nativa e pela expansão de atividades que comprometem a capacidade de regulação natural do ciclo hidrológico. A persistência desse cenário ameaça a segurança hídrica da bacia, especialmente no que diz respeito ao abastecimento urbano.

Nas séries temporais das vazões mínimas anuais, seis estações fluviométricas apresentaram tendências negativas significativas ao nível de 5%. Dessas seis, quatro estão localizadas no Alto Paraíba do Sul (TP) e duas no Médio Paraíba do Sul (MP). A Figura 8 apresenta as séries históricas das três estações que apresentaram magnitudes mais intensas, com diminuição de -3,83 m³/s, -16,18 m³/s e -7,33 m³/s por década, em Santa Branca (TP), Pindamonhangaba (TP), Guaratinguetá (TP), respectivamente.

Como ilustrado na Figura 8, as séries temporais das estações Santa Branca (TP), Pindamonhangaba (TP) e Guaratinguetá (TP) apresentaram variações semelhantes. Destaca-se o período entre 2009 e 2012, marcado por um aumento acentuado nas vazões mínimas anuais. Nesse intervalo, os maiores valores foram registrados em 2010 para as estações Pindamonhangaba (TP) (103,29 m³/s) e Guaratinguetá (TP) (135,35 m³/s), e em 2011 para a estação Santa Branca (TP) (65,15 m³/s). Por outro lado, os menores valores das vazões mínimas foram observados para essas estações em períodos distintos. Na estação Santa Branca (TP), as menores vazões foram registradas em 2016 (15,70 m³/s) e 2019 (19,70 m³/s). Para a estação Pindamonhangaba (TP), os anos de 2016 (27,62 m³/s), 2019 (27,62 m³/s) e 2020

(30,75 m³/s) destacam-se como períodos de vazões reduzidas. Já na estação Guaratinguetá (TP), os valores mais baixos ocorreram em 2015 (48,18 m³/s) e 2016 (43,83 m³/s).

Figura 8 - Série temporal das vazões mínimas anuais para os postos fluviométricos que apresentaram tendência significativa (ao nível de significância de 5%): A. Estação Santa Branca- TP, B. Estação Pindamonhangaba- TP, C. Estação Guaratinguetá- TP.



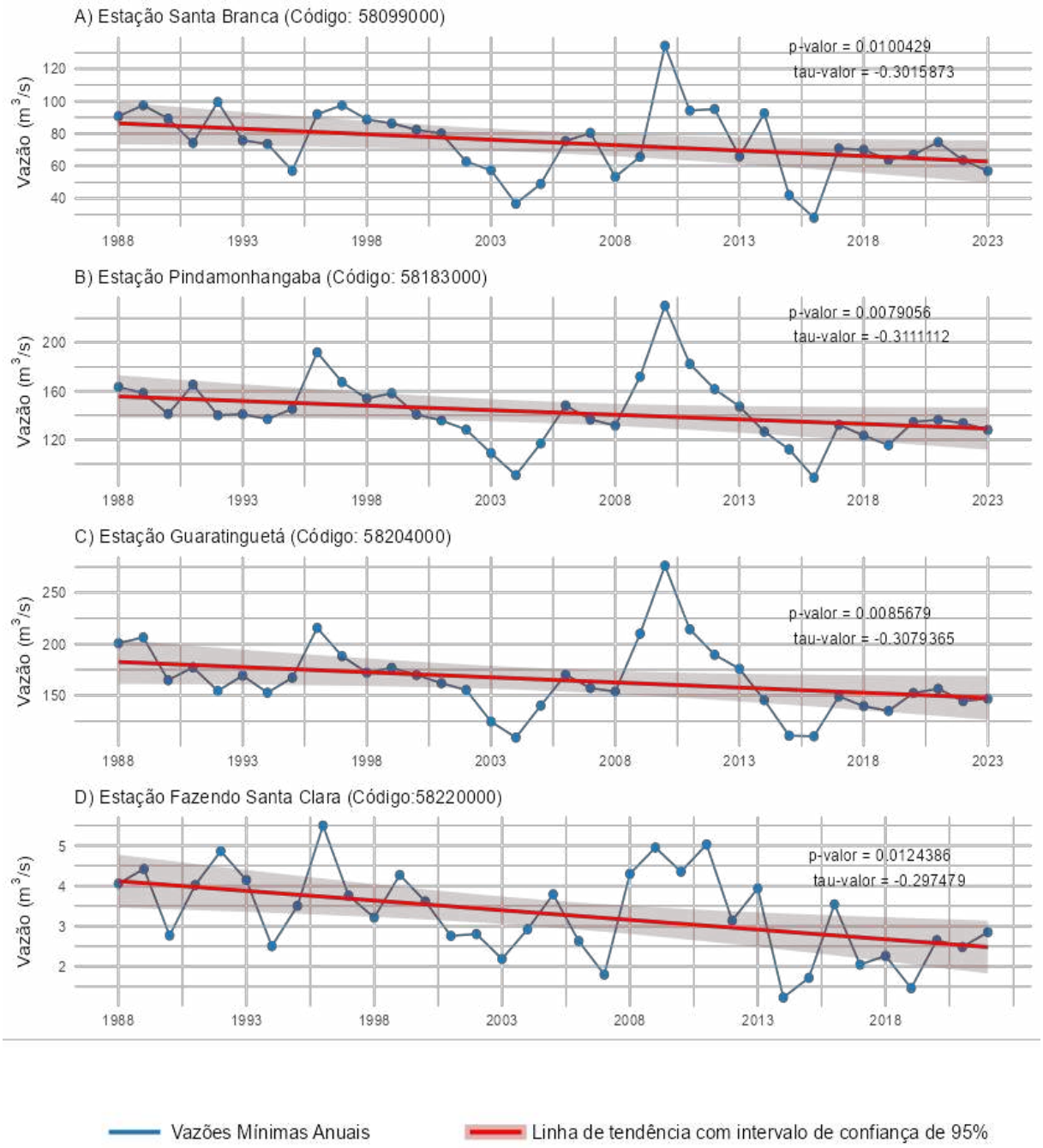
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O período entre 2014 e 2016, conforme destacado por Vasconcelos, Formiga-Johnsson e Ribeiro (2019), foi marcado por uma forte crise hídrica na BHRPS, resultando em sérios problemas sociais, como escassez no abastecimento urbano. Essa seca histórica justifica os baixos valores registrados nas vazões das estações de Santa Branca (TP), Pindamonhangaba (TP) e Guaratinguetá nesse período.

A Figura 9 apresenta as séries históricas das estações fluviométricas que apresentaram tendências significativas nas vazões médias anuais: Santa Branca (TP), Pindamonhangaba (TP), Guaratinguetá (TP) e Fazenda Santa Clara (TP). Valores extremos são observados nas quatro estações, com destaque para o ano de 2010, quando ocorreram vazões médias mais elevadas, registrando 134,19 m³/s na estação Santa Branca (TP), 230,39 m³/s em Pindamonhangaba (TP), 276,26 m³/s em Guaratinguetá (TP) e 4,35 m³/s em Fazenda Santa Clara (TP). Os anos de 2014 e 2015 também se destacam, apresentando vazões médias anuais inferiores a 2 m³/s na estação Fazenda Santa Clara (TP), indicando um período de condições hidrológicas mais severas, conforme aponta Cavalcanti e Marques (2016). Com relação a variabilidade, a estação Fazenda Santa Clara (TP) apresenta um comportamento diferente na série histórica, em comparação com as outras três, com uma variabilidade interanual.

Os extremos observados nas séries temporais das vazões máximas, mínimas e médias anuais analisadas estão em consonância com os resultados obtidos por Gomes et al. (2021). Em sua análise das séries pluviométricas na BHRPS, esses autores identificaram que os anos de 1990, 1993, 2014 e 2017 apresentaram acumulados anuais abaixo do desvio padrão da média, enquanto os anos de 1996, 2004, 2008 e 2009 registraram acumulados acima do desvio padrão. Esses padrões pluviométricos coincidiram com períodos em que as vazões analisadas sofreram impactos relevantes, evidenciando a relação entre os eventos extremos de precipitação e os comportamentos anômalos das vazões.

Figura 9 - Estações fluviométricas que apresentaram tendência significativa nas vazões médias anuais: A. Estação Santa Branca- TP, B. Estação Pindamonhangaba- TP, C. Estação Guaratinguetá- TP, D. Estação Fazenda Santa Clara- TP.

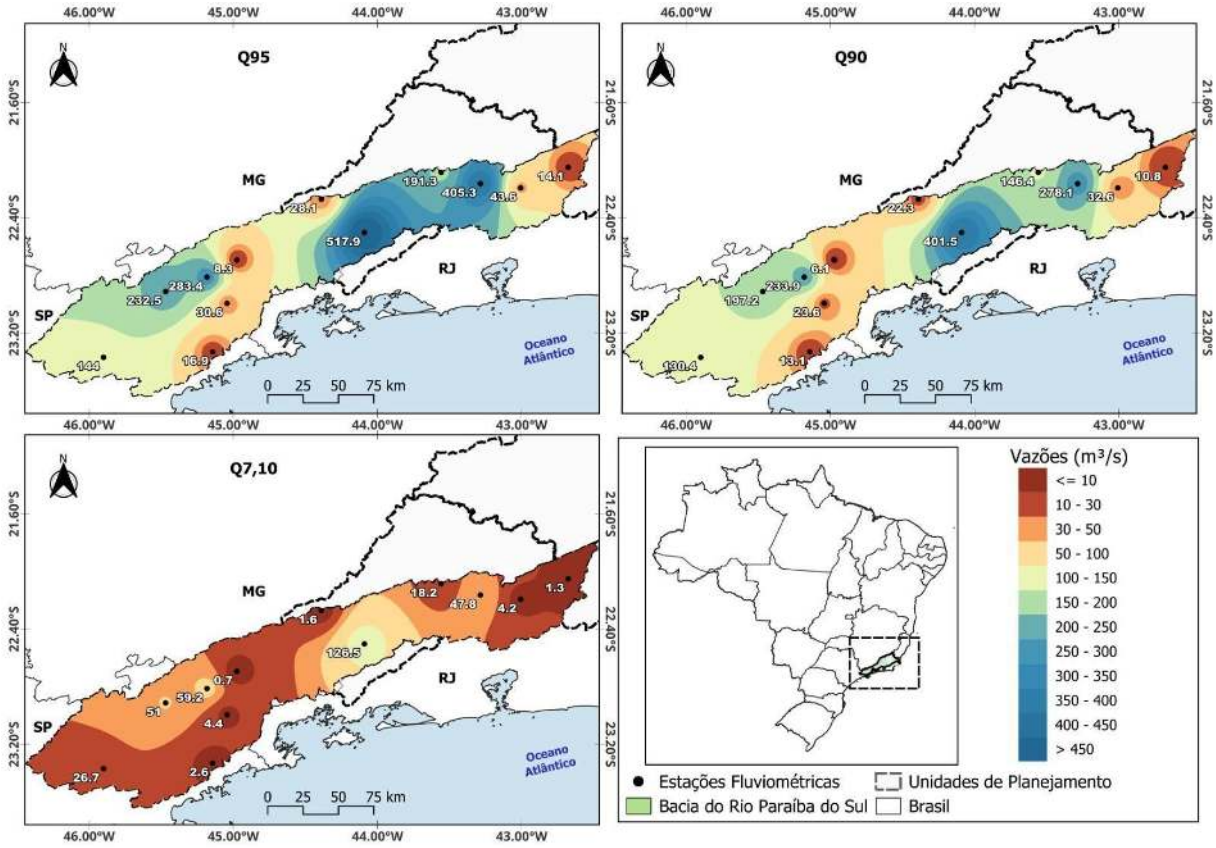


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 10 apresenta os valores das vazões de referência (Q90, Q95 e Q7,10) nas Unidades de Planejamento Alto Paraíba do Sul, Médio Paraíba do Sul e Piabanha. As vazões Q90 e Q95 representam os percentis 90 e 95, respectivamente, indicando os valores de vazão que são igualados ou excedidos em 90% e 95% do tempo. Por outro lado, a vazão Q7,10

corresponde à menor vazão média registrada em um período consecutivo de sete dias, considerando um intervalo de recorrência de 10 anos.

Figura 10 – Vazões de referência (Q90, Q95 e Q7,10) para o período analisado (1987 a 2023) nas Unidades de Planejamento: Alto Paraíba do Sul, Médio Paraíba do Sul e Piabanha.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Observa-se na Figura 10 que os maiores valores de vazões de referência (Q90, Q95 e Q7,10) concentram-se na região do Médio Paraíba do Sul, evidenciando uma maior capacidade de suporte hídrico nessa unidade de planejamento. Destacam-se, nesse contexto, as estações de Volta Redonda (MP) e Paraíba do Sul (MP), cujos valores de Q90 atingem, respectivamente, 401,48 m³/s e 278,09 m³/s; os de Q95 são 517,94 m³/s e 405,34 m³/s; enquanto que os de Q7,10 correspondem a 126,55 m³/s e 47,76 m³/s, respectivamente. Esses dados reforçam o papel estratégico do Médio Paraíba do Sul na manutenção da regularidade hídrica da bacia como um todo.

Em contrapartida, o Trecho Paulista e o norte da região de Piabanha se destacam por apresentarem os menores valores de vazões de referência (Q90, Q95 e Q7,10), evidenciando uma importante vulnerabilidade hídrica. Nas estações Fazenda Santa Clara (TP), Ponte Alta 1

(TP) e Sumidouro (PB), os valores registrados são reduzidos, com valores de: 6,14 m³/s, 13,11 m³/s e 10,84 m³/s para Q90; 8,27 m³/s, 16,94 m³/s e 14,06 m³/s para Q95; e 0,65 m³/s, 2,63 m³/s e 1,32 m³/s para Q7,10, respectivamente.

Os resultados obtidos neste estudo estão em consonância com os apresentados pelo relatório do CPRM/SGB (2017), que evidencia que os menores valores de vazão ocorrem nas regiões sob maior pressão antrópica e reforça a importância da regionalização da vazão de referência como instrumento de apoio à gestão hídrica. A convergência entre os dados observacionais e a regionalização amplia a confiabilidade das análises e permite uma visão mais abrangente da disponibilidade hídrica em áreas não monitoradas.

As informações obtidas neste estudo são fundamentais para avaliar a disponibilidade hídrica da BHRPS, auxiliando na identificação das regiões com maior ou menor flexibilidade para a concessão de outorgas de uso da água, com base nas vazões de referência. A identificação de regiões com menor disponibilidade hídrica, como o Trecho Paulista e o norte de Piabanha, deve ser acompanhada de estratégias específicas de manejo, priorizando ações de conservação da vegetação nativa, controle do uso do solo e proteção das áreas de recarga. Já nas regiões com maior disponibilidade, como o Médio Paraíba do Sul, é fundamental garantir que o uso intensivo da água seja acompanhado por mecanismos de monitoramento e prevenção de impactos cumulativos.

Nesse sentido, a segurança hídrica da BHRPS deve ser compreendida como um equilíbrio dinâmico entre oferta, demanda e capacidade de resiliência do sistema, exigindo uma abordagem integrada que articule instrumentos técnicos, políticas públicas e participação social. Essa perspectiva é essencial para garantir o uso equitativo e sustentável da água, especialmente diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela intensificação das pressões antrópicas sobre os recursos hídricos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho consistiu em analisar o comportamento das vazões na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHRPS), visando identificar tendências e padrões que possam contribuir para a compreensão da dinâmica hídrica da região. Para isso, foram utilizadas séries históricas de 12 estações fluviométricas localizadas nas regiões do Alto Paraíba do Sul (trecho paulista - TP), Médio Paraíba do Sul (MP) e Piabanha (PB).

Na análise das médias dos valores máximos, mínimos e médios das vazões anuais, constatou-se que as estações de Volta Redonda (MP) e Paraíba do Sul (MP) registraram os maiores valores, com vazões máximas de 782,9 m³/s e 693,3 m³/s, mínimas de 162,4 m³/s e 62,8 m³/s, enquanto as médias foram de 264,3 m³/s e 136,7 m³/s, respectivamente. Essas duas estações destacaram-se por apresentar os maiores valores de vazão em todas as métricas avaliadas.

Na análise de tendência, foi verificado que as 12 estações fluviométricas apresentaram tendência negativa significativa a 5%, em pelo menos uma das vazões analisadas (máxima, mínima ou média), com destaque para as regiões mais urbanizadas e sob uso intensivo do solo. A estação de Pindamonhangaba (TP), por exemplo, apresentou uma das maiores quedas nas vazões, o que sugere que fatores como urbanização, fragmentação da vegetação nativa e expansão agrícola têm contribuído para a redução da capacidade de regulação natural do ciclo hidrológico.

A análise das vazões de referência revelou que a região do Médio Paraíba do Sul apresenta os maiores valores de vazão, com destaque para a estação de Volta Redonda (MP), onde os valores de Q90, Q95 e Q7,10 são de 401,5 m³/s, 517,9 m³/s e 126,5 m³/s, respectivamente. Por outro lado, as menores vazões foram observadas no Trecho Paulista e na região norte de Piabanha, com a estação Fazenda Santa Clara (TP) se destacando pelos menores valores registrados, sendo Q90 de 6,14 m³/s, Q95 de 8,27 m³/s e Q7,10 de 0,65 m³/s.

Este estudo evidencia a relevância da análise da disponibilidade hídrica como base para o planejamento sustentável da bacia, ao mesmo tempo em que ressalta a influência direta do uso e da cobertura do solo sobre a dinâmica hidrológica regional. Assim, a segurança hídrica da bacia depende não apenas do volume de água disponível, mas também da forma como o território é ocupado e manejado. As informações geradas por este estudo oferecem subsídios valiosos para o planejamento e a gestão integrada dos recursos hídricos, contribuindo para decisões mais embasadas e sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), por meio do

projeto "Variabilidade Climática e Extremos Hidrológicos na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul", Processo Nº E-26/211.976/2021. Os autores também agradecem à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), pela disponibilização dos dados.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Outorga de direito de uso dos recursos hídricos**. Cadernos de capacitação em recursos hídricos; v.1 vol.6. Brasília: ANA, p. 50, 2011.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Dados da Bacia. Estudos auxiliares para a Gestão do Risco de Inundações. Bacia do Rio Paraíba do Sul**. [s.d.]. Disponível em: < http://gripbsul.ana.gov.br/ABacia.html>. Acesso em: 1 de janeiro de 2025.

BRASILIENSE, C. S., DERECZYNSKI, C. P., SATYAMURTY, P., CHOU, S. C., CALADO, R. N. Climatologias da Temperatura do Ar e da Precipitação na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Região Sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências** - UFRJ, v. 43, n. 1, p. 355–365, 30 mar. 2020.

CAVALCANTI, B. S.; MARQUES, G**.** Recursos hídricos e gestão de conflitos. A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a partir da crise hídrica de 2014-2015. **Revista Portuguesa e Brasileira de Gestão**, Lisboa, v. 15, n. 1, p. 4-16, mar. 2016.

CEIVAP - Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Relatório de Situação**. Bacia do Paraíba do Sul. 2020. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/conteudo/relsituacao2020.pdf>. Acesso em: 6 de novembro de 2024.

CEIVAP - Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. Sistema Integrado de Gestão das Águas**. [s.d.]. Disponível em: <https://sigaceivap.org.br/salaDeSituacao>. Acesso em: 15 de novembro de 2024.

CEIVAP – Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.** 2021. Disponível em: <https://sigaceivap.org.br/publicacoesArquivos/ceivap/arq_pubMidia_Processo_030-2018-RF01.pdf>. Acesso em: 19 junho de 2025.

CPRM/SGB – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/ Serviço Geológico do Brasil**. Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras: Estudo da Vazão de 95% de permanência da sub-bacia 58.** Execução técnica e autoria de Jefferson Santana Melo e Mariana Dias Villas Boas. – Rio de Janeiro: CPRM, 2017. 132p. Disponível em: < https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/20819>. Acesso em: 19 junho de 2025.

FREITAS, L. N. F.; SANTOS, K. P.; MELLO, D. S.; FERREIRA, Maria I. P.; OLIVEIRA, Vicente P. S. O. Barragem e Transposição do Rio Macabu: Conflitos Gerados Pelo Uso da Água e a Integração

de Bacias Hidrográficas no Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**. v. 8, n214-05, 2014.

GOMES, F. B. R.; VARGAS, I. S.; PROCÓPIO, A. S.; CASTRO, S. R.; RIBEIRO, C. B. M. Estudo da variabilidade espaço-temporal e tendências de precipitação na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 17-28, jan./jun. 2021.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. 4 ed. London: Charles Griffin, 1975.

MANN, H.B. Non-parametric tests against trend. The econometric society. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245-259, 1945.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas – Coleção 9 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. 2023. Disponível em: https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection_9/lclu/coverage/brasil_coverage_2023.tif. Acesso em: 13 abr. 2025.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, n.2, v. 20, p. 215–226, mar. 2005.

MELO, M. C.; JOHNSSON, R. M. F. O conceito emergente de segurança hídrica. **Sustentare**, Três Corações, v. 1, n. 1, p. 72-92, ago./dez. 2017.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2022. Acesso: https://www.R-project.org/.

SANTANA, G. R. A.; SANTOS, E. B.; LUGON JUNIOR, J. **Características climáticas e análise de tendência pluviométrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Alterações antrópicas & meio Ambiente. 1 ed. Campina Grande: EPTEC, p. 187-194, 2023.

SANTANA, G. R. A.; SANTOS, E. B.; SILVA, M. G. A. J. Caracterização Espaço-Temporal das Secas na Bacia do Rio Paraíba do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências** - UFRJ, Rio de Janeiro, v. 43, n. 4, p. 364-375, 2020. ISSN 0101-9759. e-ISSN 1982-3908.

SEN, P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SILVA, A. M.; OLIVEIRA, P. M.; MELLO, C. R.; PIERANGELI, C. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.374–380, 2006.

SILVA, L. M. C.; MONTEIRO, R. A. **Outorga de direito de uso de recursos hídricos: uma das possíveis abordagens**. In: Machado, C. J. S. (Org.). Gestão de águas doces. Rio de Janeiro: Interciência. Cap. 5, p.135-178, 2004.

SILVA, A. S. A.; STOSIC, B.; MENEZES, R. S. C.; SINGH, V. P. Comparison of Interpolation Methods for Spatial Distribution of Monthly Precipitation in the State of Pernambuco, Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 24, n. 3, p. 04018068, mar. 2019.

SOUSA, L. C. O. de; BEZERRA, S. de T. M.; AMORIM, J. M. B. dos S.; ALVES, I. M.; DUARTE, A. D. Avaliação de alternativas direcionadas à redução do consumo de água potável em residências:

estudo de caso em Caruaru, PE, Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 465-487, out./dez. 2020.

UNITED NATIONS EDUCATION, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION UNESCO. **Managing Water under Uncertainty and Risk**. UNESCO, Parte 2. wwdr4, p. 230 – 370, 2012.

UNU. **Water Security & the Global Water Agenda: A UN-Water Analytical Brief**., 2013.

VASCONCELOS, N. A.; FORMIGA-JOHNSSON, R. M.; RIBEIRO, N. B. Impactos da crise hídrica 2014-2016 sobre os usuários dos rios Paraíba do Sul e Guandu. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 16, e14, 2019.