

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

UM SÉCULO DE CHUVA: ANÁLISE DA SÉRIE HISTÓRICA DA ESTAÇÃO ESALQ EM PIRACICABA-SP

*Danieli Mara Ferreira¹ ; Maria Fernanda Dames dos Santos Lima² ; José Eduardo Gonçalves³ ;
Jorge Antonio Mercanti⁴ ; Patrícia Gobet de Aguiar Barufaldi⁵ ; Eduardo Cuoco Léo⁶ ; Ana
Oliveira⁷ & Débora Lavoura⁸*

Abstract: The analysis of historical precipitation series is essential for understanding climate variability and its effects on water resources. This study evaluated the daily precipitation records from the Esalq/USP meteorological station in Piracicaba (São Paulo, Brazil), covering 1917–2023, to identify seasonal patterns, trends, and regime shifts. The study area, the Piracicaba, Capivari, and Jundiaí (PCJ) river basin, is crucial for urban and agricultural water supply in the state's interior. Data underwent quality control, descriptive statistical analysis, and specific tests to detect trends and structural changes. Monthly precipitation showed a skewed distribution, with predominance of low values and occasional extreme events. Marked seasonality was observed, with higher rainfall in summer and lower in winter. Time series decomposition revealed clear trend and seasonal components. The results highlight the high interannual variability of precipitation and the absence of recent significant trends, reinforcing the need for cautious, adaptive water resource planning in a context of climatic uncertainty.

Resumo: A análise de séries históricas de precipitação é fundamental para compreender a variabilidade climática e seus impactos sobre os recursos hídricos. Este estudo avaliou a série diária de precipitação da estação meteorológica da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (Esalq/USP), em Piracicaba (SP), no período de 1917 a 2023, com o objetivo de identificar padrões sazonais, tendências e mudanças de regime. A área de estudo, correspondente à Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (Bacias PCJ), é estratégica para o abastecimento urbano e agrícola do interior paulista. Os dados passaram por controle de qualidade, análise estatística descritiva e testes específicos para detecção de tendências e alterações estruturais. A precipitação mensal apresentou distribuição assimétrica, com predominância de baixos volumes e ocorrência de eventos extremos. A sazonalidade foi marcada, com maiores totais no verão e menores no inverno. A decomposição da série temporal indicou componentes bem definidos de tendência e sazonalidade. Os resultados evidenciam a elevada

¹ Simepar; danieli.ferreira@simepar.br

² Simepar; maria.dames@simepar.br

³ Simepar; jose.eduardo@simepar.br

⁴ Comitês PCJ; jorgemercanti@gmail.com

⁵ Agência das Bacias PCJ; patricia.barufaldi@agencia.baciaspcj.org.br

⁶ Agência das Bacias PCJ; eduardo.leo@agencia.baciaspcj.org.br

⁷ Agência das Bacias PCJ; ana.oliveira@agencia.baciaspcj.org.br

⁸ Agência das Bacias PCJ; debora.lavoura@agencia.baciaspcj.org.br

variabilidade interanual da precipitação e a ausência de tendências recentes relevantes, reforçando a necessidade de planejamento hídrico cauteloso e adaptativo diante das incertezas climáticas.

Palavras-Chave – Bacias PCJ, Estação Esalq, Análise estatística.

INTRODUÇÃO

A análise de séries históricas de precipitação é fundamental para o entendimento da variabilidade climática e seus impactos sobre os recursos hídricos. Em especial, o estudo de tendências, mudanças de regime e ocorrência de eventos extremos fornece subsídios essenciais para o planejamento e gestão sustentável da água, sobretudo em regiões com crescente demanda.

Neste estudo, foi analisada a série histórica de precipitação diária da estação meteorológica da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (Esalq/USP), localizada no município de Piracicaba, interior do estado de São Paulo. A série compreende o período de 1917 a 2023, representando mais de um século de observações contínuas.

O principal objetivo do estudo foi avaliar o comportamento temporal da precipitação na região, com foco nas seguintes questões: (i) qual é a distribuição estatística e a descrição geral dos dados? (ii) existe sazonalidade expressiva na série? (iii) houve mudanças significativas ao longo do tempo, como tendência ou alterações abruptas na média anual? Para isso, foram aplicados diferentes testes estatísticos e métodos de análise de tendência, mudança e variabilidade.

A área de estudo está situada nas coordenadas aproximadas de latitude -22,708 e longitude -47,633, inserida na região das Bacias Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (BaciasPCJ), região de relevante importância para o abastecimento urbano, irrigação e atividades industriais. Dada a elevada variabilidade climática em escala regional e as discrepâncias observadas entre modelos globais e padrões locais, estudos regionais tornam-se essenciais para uma compreensão mais precisa da variabilidade temporal e espacial do clima, contribuindo diretamente para o planejamento e a gestão eficaz de recursos hídricos (Dad et al., 2021).

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudos

As Bacias PCJ abrangem uma área de aproximadamente 15.300 km², distribuída entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, englobando 76 municípios. Trata-se de uma região de extrema relevância para o abastecimento urbano, industrial e agrícola, com destaque para a captação de água que abastece a Região Metropolitana de Campinas (RMC) e parte da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), por meio do Sistema Cantareira. A gestão dos recursos hídricos da bacia é realizada por meio de um arranjo institucional sólido e participativo, coordenado pelos Comitês das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (Comitês PCJ). Os Comitês atuam na articulação entre os diferentes usuários da água e na implementação de instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, como o Plano de Bacia, a outorga e a cobrança pelo uso da água, visando a sustentabilidade hídrica e a conservação ambiental da região.

A estação meteorológica da Esalq/USP, localizada em Piracicaba (SP), possui registros diários de diversas variáveis meteorológicas, como precipitação, umidade relativa do ar e temperatura. As observações meteorológicas da estação convencional tiveram início em 1917, com o registro

sistemático de precipitação, temperatura do ar e insolação. Posteriormente os dados passaram a incluir também medições de velocidade do vento, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, estimativas de radiação solar global e radiação líquida, além de evapotranspiração. Complementando a série histórica, a estação automática foi implantada em 1997, fornecendo registros contínuos e de alta frequência das variáveis meteorológicas, incluindo precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, saldo de radiação, evapotranspiração, além de velocidade e direção do vento (ESALQ, 2025). Neste estudo, foi analisada a série histórica de precipitação no período de 1917 a 2023. Os dados passaram por inspeção visual e controle de qualidade, incluindo a verificação de dados ausentes e a detecção de possíveis valores espúrios.

Análises Estatísticas

As análises estatísticas visam caracterizar estatisticamente a série, identificar padrões sazonais e tendências, bem como avaliar a ocorrência de eventos extremos. As etapas principais foram:

- Descrição estatística: cálculo de média, mediana, desvio padrão, coeficiente de assimetria, valor mínimo, máximo e amplitude total para os dados mensais.
- Distribuição dos dados: histogramas para visualização da distribuição dos dados mensais.
- Sazonalidade: média mensal analisada ao longo dos anos para avaliar a presença e a persistência de padrões sazonais, a análise de boxplots decadais.
- Tendência: estimativa de Theil-Sen para quantificar a inclinação da tendência da precipitação anual.
- Identificação de mudanças na série: teste de Pettitt para identificar pontos de mudança abrupta na média da série anual.
- Estacionariedade: teste de Dickey-Fuller aumentado (ADF) para verificar a estacionariedade da série temporal.

RESULTADOS

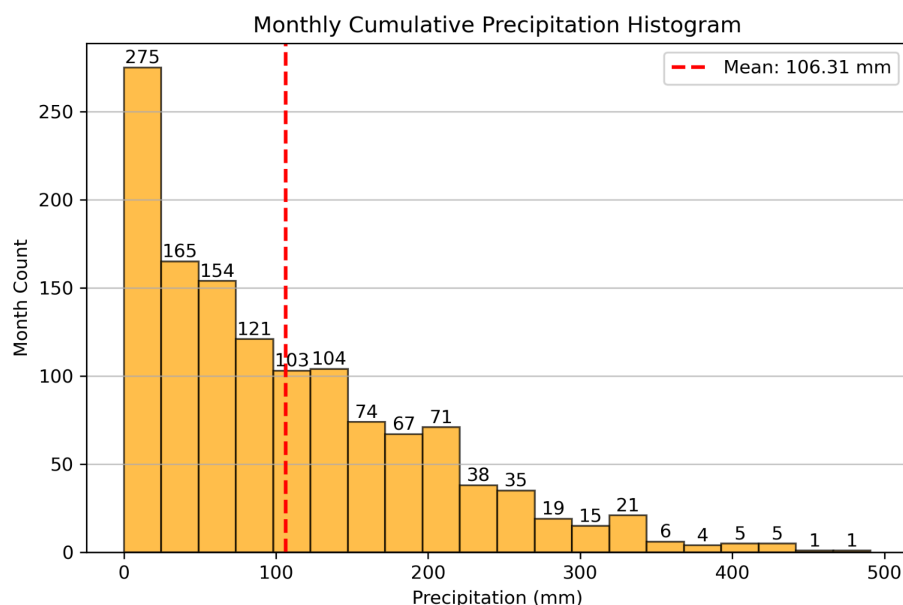
Descrição estatística

As estatísticas descritivas dos valores mensais das variáveis meteorológicas fornecem uma visão sobre a tendência central, a variabilidade e as características da distribuição dessas variáveis, destacando padrões e possíveis anomalias. Um total de 1278 registros foi utilizado.

A precipitação mensal apresentou grande variação, oscilando entre 0,00 e 490,90 mm, com média de 106,10 mm e desvio-padrão de 91,65 mm. A assimetria positiva (1,06) indica a influência de eventos extremos de chuva, o que faz com que a distribuição seja assimétrica à direita, com predominância de valores mais baixos de precipitação. A mediana inferior à média (83,45 mm e 106,10 mm, respectivamente) sugere que a maior parte das observações corresponde a valores mais baixos de precipitação, enquanto alguns eventos extremos elevam a média.

A Figura 1 apresenta o histograma da precipitação mensal, ilustrando a distribuição assimétrica dos dados, com 58% dos meses registrando precipitação abaixo da média.

Figura 1 – Histograma da precipitação mensal no período de 1917 a 2023



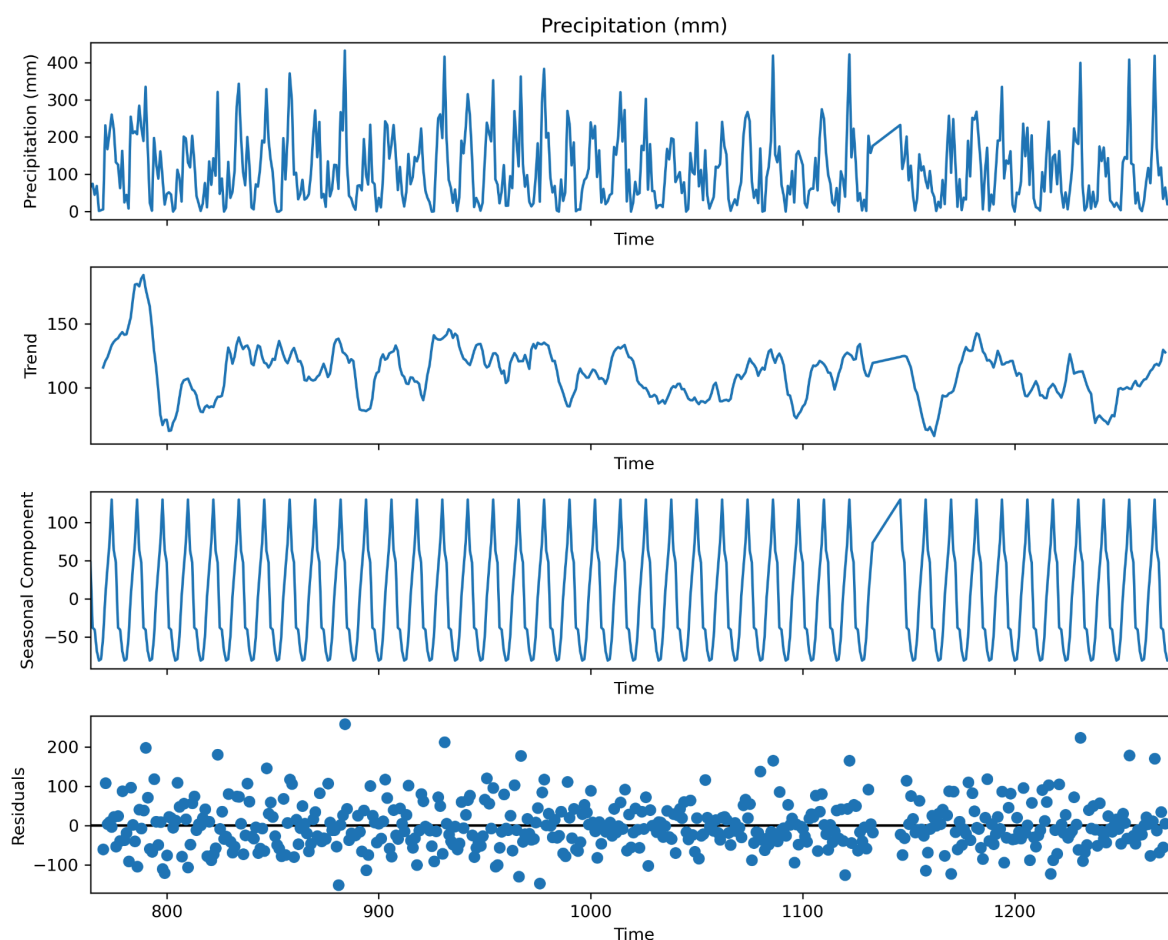
Sazonalidade

A sazonalidade do conjunto de dados foi avaliada por meio de dois métodos: decomposição sazonal da série temporal e comparação de boxplots com base em dados sazonais e por década. O primeiro método tem como objetivo analisar os componentes subjacentes aos padrões de precipitação. A série temporal mensal foi decomposta em três componentes principais: tendência, sazonalidade e resíduo. Utilizou-se um modelo aditivo, assumindo que os dados observados são a soma desses componentes. Os resultados, apresentados na Figura 2 para a precipitação, revelam cada um desses componentes separadamente. Essa decomposição auxilia na compreensão das tendências de longo prazo, das flutuações sazonais e das variações irregulares nos dados de precipitação.

Os dados de precipitação apresentam alta variabilidade entre os meses, com períodos de chuvas intensas (picos) e meses mais secos. A tendência mostra oscilações, com fases de aumento e de redução, possivelmente associadas aos ciclos alternados de seca e umidade.

Observa-se uma componente sazonal bem definida, com repetições anuais. O resíduo representa a diferença entre os valores observados na série original e a soma das componentes de tendência e sazonalidade: $\text{Resíduo} = \text{Valor Observado} - (\text{Tendência} + \text{Sazonalidade})$. Quando os resíduos estão próximos de zero, isso indica que a combinação dos componentes de tendência e sazonalidade explica bem os dados originais.

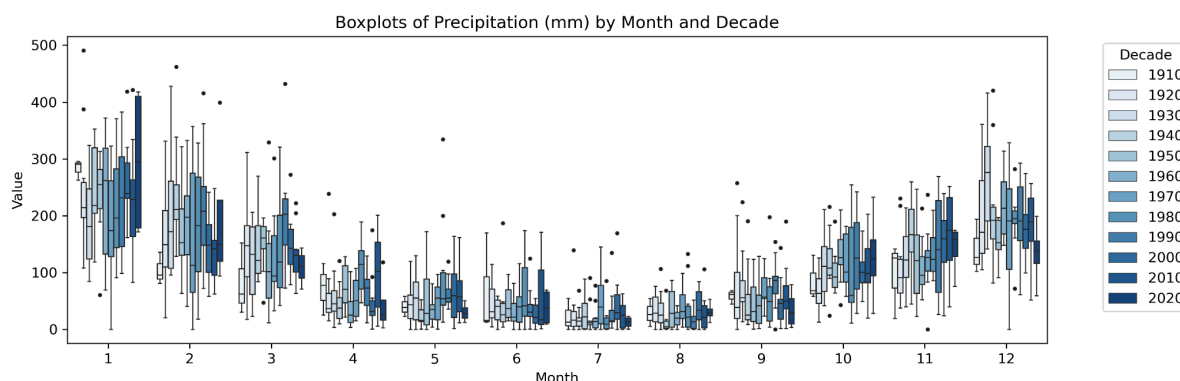
Figura 2 – Decomposição sazonal da série temporal mensal de precipitação



O objetivo principal da segunda análise é examinar como as variáveis meteorológicas evoluíram ao longo do tempo, com ênfase nos padrões sazonais e por década. Os boxplots são ferramentas úteis para compreender a distribuição, a tendência central e para identificar valores atípicos nos dados mensais. É importante destacar que as décadas de 1910 e 2020 estão incompletas (o conjunto de dados inicia-se em 1917 e termina em 2023), o que pode influenciar a interpretação das tendências nesses períodos.

Os resultados são ilustrados na Figura 3 para a precipitação. Observa-se um padrão claro de sazonalidade, com maiores volumes de precipitação nos meses de verão (dezembro a março) e menores volumes nos meses de inverno (maio a agosto). Além disso, é possível identificar uma variabilidade considerável dentro de cada mês ao longo das décadas, com a presença de valores extremos em praticamente todos os meses, especialmente nos meses mais chuvosos. Também é perceptível uma possível redução na variabilidade das precipitações nos meses mais secos nas décadas mais recentes.

Figura 3 – Boxplot de precipitação por mês e década



Estacionariedade

Para avaliar a estacionariedade dos dados meteorológicos anuais, foi aplicado o teste de Dickey-Fuller aumentado (ADF). Este teste verifica a presença de raiz unitária na série temporal, o que indicaria a não estacionariedade e a possível existência de tendências ou variações estruturais ao longo do tempo.

Os resultados indicaram que as séries temporais de radiação solar global, insolação, precipitação, umidade relativa e velocidade máxima do vento apresentaram estatísticas ADF significativamente negativas, com valores de p muito baixos (por exemplo, para a precipitação, o valor da estatística ADF foi -8,9751, com $p = 7,569 \times 10^{-15}$, utilizando 0 defasagens e 106 observações). Os valores críticos para esses testes foram -3,4936 (1%), -2,8892 (5%) e -2,5815 (10%). Dessa forma, rejeita-se a hipótese nula de não estacionariedade para essas variáveis, indicando que essas séries podem ser consideradas estacionárias, sem a presença de tendências ou ciclos de longo prazo.

Tendência

Para avaliar as tendências temporais dos parâmetros analisados, foi realizada uma análise de séries anuais considerando os dados dos últimos 40 anos (a partir de 1983). A crescente influência de fatores antrópicos, como a urbanização e as mudanças climáticas globais desde a década de 1980 possivelmente teve impactos mais evidentes nos dados recentes, tornando as últimas quatro décadas particularmente relevantes para a compreensão dos padrões e da variabilidade climática atual.

Para cada variável, foi verificada a presença de variabilidade suficiente, ou seja, mais de um valor distinto, além da disponibilidade de dados válidos (não nulos) em quantidade adequada para a aplicação do procedimento estatístico. Variáveis que não atendiam a esses critérios foram excluídas da análise.

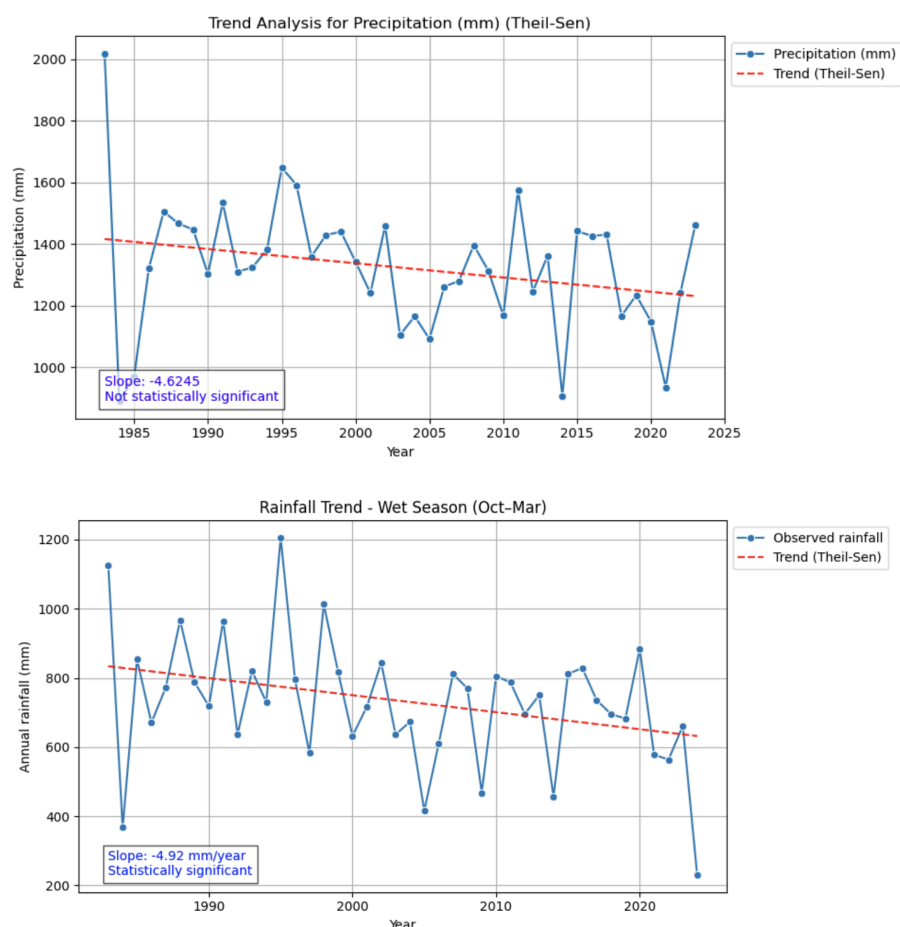
Em seguida, foi aplicado o estimador robusto de tendência de Theil-Sen, que calcula a inclinação da linha de tendência como a mediana das inclinações entre todos os pares possíveis de pontos da série temporal. Esse método é resistente à presença de valores extremos e amplamente utilizado em estudos hidrológicos e ambientais. Para cada série, foram estimados a inclinação, que

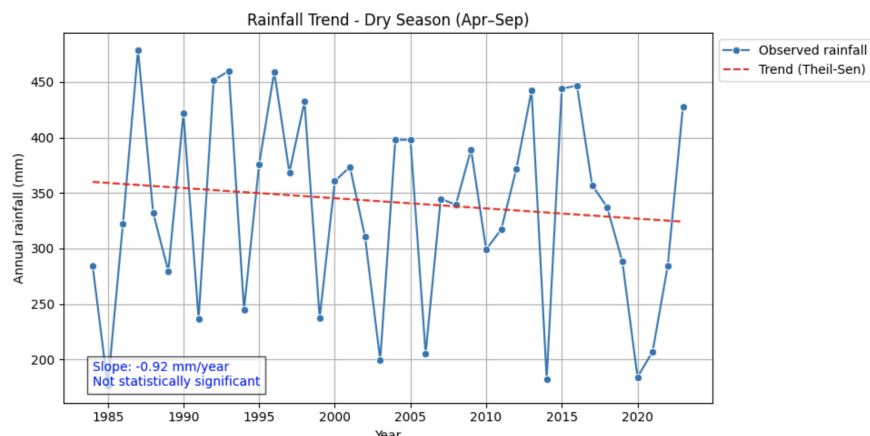
representa a taxa anual de variação do parâmetro, o intercepto, que corresponde ao valor estimado para o início da série, e o intervalo de confiança da inclinação com 95% de confiança, definido pelos limites inferior e superior. Esse intervalo permitiu avaliar a significância estatística da tendência: quando incluía o valor zero, a tendência era considerada não estatisticamente significativa; caso contrário, classificava-se como estatisticamente significativa.

A Figura 4 apresenta os resultados para a variável precipitação anual, onde a série temporal foi plotada juntamente com a linha de tendência estimada pelo método de Theil-Sen e a respectiva indicação de significância estatística. Os resultados indicam que a precipitação anual não apresentou tendência estatisticamente significativa, o que reforça a complexidade da variabilidade climática observada ao longo das últimas quatro décadas.

Adicionalmente, os testes foram conduzidos separadamente para os períodos seco e úmido. Observou-se que o período seco não apresentou tendência significativa, ao contrário do período úmido, no qual há indicativos de redução da precipitação acumulada total, sugerindo alterações nas dinâmicas sazonais da precipitação.

Figura 4 - Testes de tendência para precipitação anual (a) e para os períodos úmido (b) e seco (c)





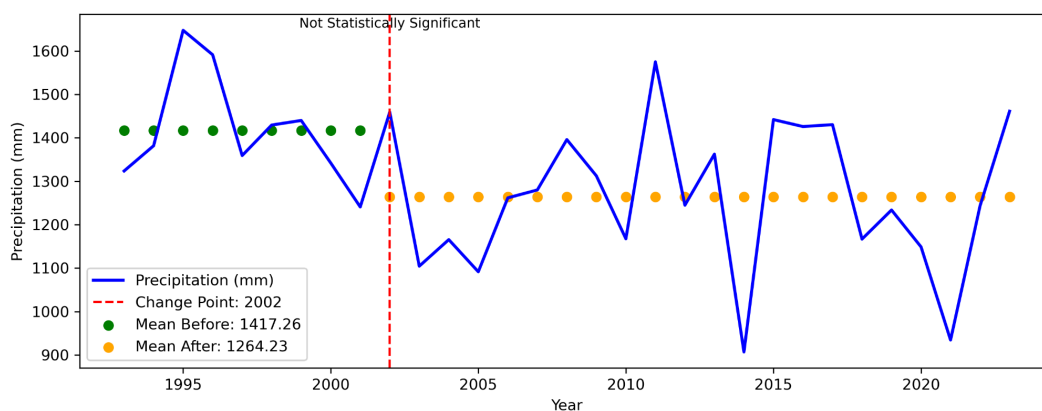
Alterações da série anual

Para investigar possíveis mudanças no regime anual de precipitação, foi aplicado o teste de Pettitt, um teste não paramétrico amplamente utilizado para detectar pontos de mudança em séries temporais. O teste identifica o ano mais provável em que ocorreu uma mudança significativa na mediana da série, sem pressupor distribuição específica dos dados. A significância estatística do ponto de mudança é avaliada com base no valor de p , sendo considerado significativo quando $p < 0,05$.

A figura apresenta a série temporal anual de precipitação (linha azul), com a identificação visual do ponto de mudança estimado (linha tracejada vermelha) no ano de 2002. As médias antes e depois desse ponto são destacadas com marcadores verde e laranja, respectivamente.

Embora seja observada uma redução da média anual de precipitação de aproximadamente 1417,26 mm (antes de 2002) para 1264,23 mm (após 2002), o teste indicou que essa mudança não é estatisticamente significativa ($p \geq 0,05$). Isso sugere que, apesar da aparente alteração no padrão, não há evidências estatísticas suficientes para afirmar que houve uma mudança estrutural no regime de precipitação durante o período analisado.

Figura 5 - Teste de Pettitt para verificação de alteração das precipitações anuais



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da série histórica de precipitação da estação meteorológica da Esalq/USP, com mais de um século de dados contínuos (1917–2023), permite avaliar a variabilidade climática em Piracicaba e região. A consistência e a extensão temporal dessa série são fundamentais para compreender padrões hidrológicos de longo prazo, identificar anomalias e subsidiar estratégias de adaptação frente às mudanças climáticas.

Os resultados indicaram sazonalidade bem definida e predominância de chuvas nos meses de verão. Embora tenha sido identificada uma leve redução na precipitação acumulada no período úmido nas últimas décadas, não foram observadas tendências significativas na precipitação anual nem mudanças estruturais estatisticamente significativas ao longo da série. A estacionariedade da série anual reforça esse cenário ao longo do tempo analisado. Destaca-se, no entanto, estudos que têm apontado aumento de temperatura e alteração de outras variáveis meteorológicas na região (e. g. Dias et al., 2017), que podem impactar a disponibilidade hídrica na região.

Essas informações são especialmente relevantes para a gestão integrada dos recursos hídricos nas Bacias PCJ, onde a disponibilidade de água está diretamente associada aos padrões de precipitação. Com base nesses dados históricos, é possível embasar discussões visando aprimorar a modelagem hidrológica, planejar ações de conservação e aumentar a resiliência das políticas de abastecimento urbano, irrigação e uso industrial da água, contribuindo para uma gestão mais sustentável e eficaz dos recursos hídricos na região.

REFERÊNCIAS

- Dad, J. M., Muslim, M., Rashid, I., & Reshi, Z. A. (2021). Time series analysis of climate variability and trends in Kashmir Himalaya. *Ecological Indicators*, 126, 107690.
- Dias, H. B., Alvares, C. A., & Sentelhas, P. C. (2017). Um século de dados meteorológicos em Piracicaba, SP: Mudanças do clima pela classificação de Köppen. In Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Simpósio de Mudanças Climáticas e Desertificação do Semiárido Brasileiro. Juazeiro. Anais.
- ESALQ/USP - Escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”. Posto Meteorológico Automático – ESALQ/USP. Disponível em: <http://www.leb.esalq.usp.br/posto/>. Acesso em: 11 dez. 2024.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) pelo apoio e agradecem os Comitês das Bacias PCJ e a Fundação Agência das Bacias PCJ pela oportunidade de realização deste estudo.