

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DA INTENSIDADE DAS CHUVAS NAS BACIAS PCJ: TENDÊNCIAS TEMPORAIS E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (2015–2024)

Grenda Izabeli Menezes da Silva¹ ; Danieli Mara Ferreira² ; Maria Fernanda Dames dos Santos Lima³ ; José Eduardo Gonçalves⁴ ; Michael Mannich⁵ ; Jorge Antonio Mercanti⁶ ; Patrícia Gobet de Aguiar Barufaldi⁷ ; Eduardo Cuoco Léo⁸ ; Ana Oliveira⁹ ; Débora Lavoura¹⁰ & Marco Antonio Rodrigues Jusevicius¹¹

Abstract: The Piracicaba, Capivari, and Jundiaí River Basins (PCJ Basins) face increasing pressure on water resources due to urbanization and high demand. In this context, understanding the behavior of intense rainfall is essential for water management and disaster prevention. This study analyzed precipitation intensity in the region between 2015 and 2024, based on data from the PCJ Basin Agencies and the National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (CEMADEN). Statistical methods and spatial interpolation (ADW) were applied to calculate hourly and daily rainfall intensities. The results showed strong seasonality, with peaks in the summer and in the afternoon, as well as an increase in the frequency of moderate rainfall events (5–10 mm/h), especially in the central portion of the basin. The Kendall Tau test indicated positive trends in some central areas and negative trends around the basin's edges. These results contribute to improving the hydrometeorological forecasting system and to informing climate change adaptation policies.

Resumo: As Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (Bacias PCJ) enfrentam pressões crescentes sobre os recursos hídricos devido à urbanização e alta demanda. Neste contexto, compreender o comportamento das chuvas intensas é fundamental para a gestão hídrica e a prevenção de desastres. Este estudo analisou a intensidade das precipitações na região entre 2015 e 2024, com base em dados das Agências das Bacias PCJ e do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). Aplicaram-se métodos estatísticos e interpolação espacial (ADW) para calcular as intensidades horária e diária da chuva. Os resultados mostraram forte sazonalidade, com picos no verão e à tarde, além de aumento na frequência de chuvas moderadas (5–10 mm/h), especialmente na porção central da bacia. O teste de Kendall Tau apontou tendências positivas em algumas áreas centrais e negativas no entorno da bacia. Esses resultados contribuem para o aperfeiçoamento do sistema de previsão hidrometeorológica e para políticas de adaptação às mudanças climáticas.

¹) Simepar, grenda.menezes@simepar.br

²) Simepar, danieli.ferreira@simepar.br

³) Simepar, maria.dames@simepar.br

⁴) Simepar, jose.eduardo@simepar.br

⁵) UFPR, mannich@ufpr.br

⁶) Comitês PCJ, jorgemercanti@gmail.com

⁷) Agência das Bacias PCJ, patricia.barufaldi@agencia.baciaspcj.org.br

⁸) Agência das Bacias PCJ, eduardo.leo@agencia.baciaspcj.org.br

⁹) Agência das Bacias PCJ, ana.oliveira@agencia.baciaspcj.org.br

¹⁰) Agência das Bacias PCJ, debora.lavoura@agencia.baciaspcj.org.br

¹¹) Simepar, marco.jusevicius@simepar.br

Palavras-Chave – Intensidade de chuvas, Análise de tendências, Bacias PCJ

INTRODUÇÃO

As Bacias PCJ abrangem uma área de aproximadamente 15.304 km², situando-se majoritariamente no estado de São Paulo (92,6%), com uma pequena porção em Minas Gerais (7,4%). A área compreende 76 municípios, dos quais 62 têm sede inserida na própria bacia. Esta região é caracterizada por forte urbanização, grande densidade populacional e intensa atividade agrícola e industrial, representando cerca de 7% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (COMITÊS PCJ, 2020).

Diante da elevada demanda hídrica, que em algumas sub-bacias supera a disponibilidade, e da relevância dos reservatórios para o abastecimento público, especialmente o Sistema Cantareira, faz-se necessário o estudo da intensidade de chuvas espacialmente e temporalmente. Chuvas intensas impactam diretamente a recarga hídrica, a qualidade da água, o controle de cheias e a operação de reservatórios, influenciando tanto a segurança no abastecimento quanto a gestão integrada dos recursos hídricos nas Bacias PCJ.

Nesse contexto, este estudo tem como objetivo realizar uma análise de dados de precipitação ao longo de um período de 10 anos na região das Bacias PCJ. Foram aplicados métodos estatísticos para identificar tendências e padrões regionais de intensidade das chuvas, a fim de verificar possíveis alterações no regime pluviométrico ao longo do tempo, como potencial contribuição ao Sistema de Previsão Hidrometeorológico das Bacias PCJ (SPHM-PJC), em operação desde janeiro de 2019 e mantido pelo Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR).

METODOLOGIA

Área de estudo

As Bacias PCJ localizam-se em uma região de clima subtropical úmido, apresentando quatro tipos climáticos segundo a classificação de Köppen. A maior parte da porção sudoeste da bacia é caracterizada pelo clima subtropical sem estação seca e com verão quente (Cfa), enquanto a porção sudeste é predominantemente de clima subtropical sem estação seca e com verão ameno (Cfb). O clima subtropical com inverno seco e verão ameno (Cwb) ocorre no extremo leste e em algumas áreas do norte, embora o clima dominante no norte seja o subtropical com inverno seco e verão quente (Cwa) (COMITÊS PCJ, 2020). A bacia apresenta uma sazonalidade pluviométrica bem definida, com estação chuvosa entre outubro e abril, período que concentra a maior parte da precipitação anual, e estação seca de maio a setembro, marcada por uma expressiva redução dos volumes de chuva. O regime de chuvas na bacia é fortemente influenciado pelo sistema de monção da América do Sul, que promove maior umidade durante o verão. Em contrapartida, o período seco no inverno está associado à atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (REBOITA et al., 2010). Esses sistemas atmosféricos desempenham um papel fundamental na variabilidade sazonal da disponibilidade hídrica ao longo do ano. A precipitação média anual na bacia varia entre 1.195 mm e 1.609 mm, sendo mais intensa no leste da bacia, como na região da Serra da Mantiqueira.

Dados utilizados

Os dados pluviométricos utilizados neste estudo foram obtidos a partir do banco de dados da Agência das Bacias PCJ, disponibilizado ao SIMEPAR, e da plataforma do CEMADEN e Hidroweb. Foram identificadas e utilizadas 165 estações pluviométricas no total, sendo 22 operadas

com apoio da Agência das Bacias PCJ, 119 do CEMADEN e 24 da ANA. Essas estações estão geograficamente distribuídas ao longo da área de estudo, conforme ilustrado na Figura 1.

As séries temporais da PCJ são mais recentes, com início predominante em 2018, enquanto as do CEMADEN e ANA iniciam em 2014 e 2015. Todas as estações utilizadas possuem dados com resolução temporal de 10 minutos.

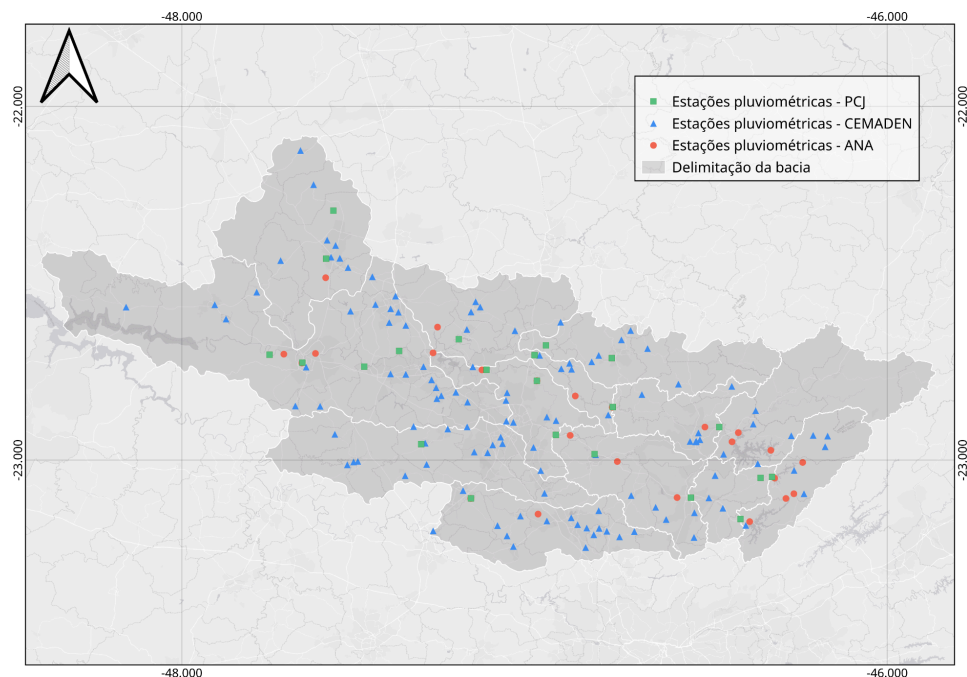


Figura 1 - Mapa da distribuição espacial das estações.

Os dados foram submetidos a uma verificação de consistência, que incluiu a remoção de valores negativos e de registros com precipitação superior a 50 mm no intervalo de medição quando a diferença em relação aos valores registrados nos 10 minutos anteriores e posteriores fosse superior a 20 mm. Em seguida, os dados foram agregados para a escala horária, sendo descartadas as horas em que houve qualquer falha no período de 1 hora.

Posteriormente foi realizada a espacialização dos dados sobre uma grade regular definida pelos limites de latitude: -23.371° a -22.046° e longitude: -48.417° a -45.836° , com resolução espacial de $0,1^{\circ}$. A interpolação dos dados foi realizada por meio da técnica ADW (Angular Distance Weighting), que utiliza a proximidade angular entre os pontos para estimar valores, atribuindo maior peso às estações mais próximas em termos de direção e distância. Esse método é especialmente eficaz para dados geoespaciais com distribuição irregular, sendo adequado para a espacialização de precipitação em áreas com topografia variada (HOFSTRA et al., 2008).

A partir da precipitação espacializada para o período de 2015 a 2024, foram calculadas as intensidades pluviométricas horárias e diárias em cada ponto da grade. Complementarmente, os dados espaciais interpolados foram utilizados para preencher lacunas nas séries das estações, adotou-se para isso o ponto de grade mais próximo de cada estação com falha.

Cálculo da intensidade

Diversas metodologias existem para calcular a intensidade da precipitação. Este estudo focou nas intensidades horária e diária. A intensidade diária é apurada considerando como dias chuvosos aqueles com precipitação igual ou superior a 1 mm.

A intensidade horária segue uma lógica semelhante, mas considera horas de chuva com precipitação igual ou maior que 1 mm. O resultado final, expresso em mm/h, que é convertido para mm/dia, multiplicando-o por 24. Segundo Cooley e Chang (2017), a análise horária é mais apropriada dependendo do estudo, pois a intensidade média diária tende a superestimar a duração da chuva (considerando-a como 24 horas) e, consequentemente, subestimar a intensidade da precipitação. O cálculo da intensidade média diária do mês j , é calculado pela razão entre o acumulado de precipitação nos dias chuvosos (P_j) e o número de dias chuvosos no mês (n_j), conforme a equação

$$I_j = \frac{P_j}{n_j} \quad (1)$$

Para a intensidade horária o cálculo é similar, com a mudança que P_j é o acumulado de precipitação nas horas chuvosas, n_j é a quantidade de horas chuvosas no mês.

Análise exploratória e estatística

Para analisar o comportamento da intensidade de precipitação na bacia ao longo dos anos, foram realizadas análises da distribuição das chuvas tanto no tempo quanto no espaço. Gráficos de boxplot mensais foram gerados com o objetivo de avaliar a variação sazonal das intensidades de precipitação.

Além disso, foi elaborada uma matriz que relaciona a média da precipitação horária da bacia com os horários do dia e os meses do ano, permitindo identificar os períodos do dia com maior tendência à ocorrência de chuvas ao longo do ano.

A precipitação também foi classificada em faixas de intensidade (0–2 mm/h, 2,5–5 mm/h, 5–10 mm/h e >10 mm/h) para avaliar a frequência de ocorrência em cada intervalo ao longo dos anos. Essa análise considerou todas as estações da bacia, incluindo tanto a frequência total como o número de estações que registraram essas ocorrências.

Por fim, para investigar a existência de tendência no aumento da intensidade das chuvas, foi empregada a estatística Tau de Kendall, para avaliar a correlação entre a variável de interesse (neste caso, a intensidade da precipitação) e o tempo (anos). Adotou-se um nível de significância de 5% ($p\text{-valor} \leq 0,05$), com a hipótese nula sendo a ausência de tendência. O teste de Kendall foi escolhido por ser apropriado para séries temporais curtas, sendo recomendado para amostras com pelo menos 10 pares de dados, o que coincide com a quantidade disponível para esse estudo (HELSEL et al., 2020).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Distribuição temporal de intensidade

A Figura 2 apresenta a distribuição da precipitação horária ao longo dos meses e da hora do dia considerando $P \geq 1$ mm. A Figura 2 revela um padrão sazonal e diário bem definido, característico de climas subtropicais com estação seca. Observa-se que as maiores precipitações ocorrem entre os meses de novembro e março, especialmente no final da tarde e início da noite (entre 15h e 22h), evidenciando a predominância de chuvas convectivas típicas do verão. Esse comportamento está fortemente associado ao ciclo térmico diário, em que o aquecimento da superfície durante o dia favorece a formação de nuvens e tempestades à tarde (GILES et al., 2020). Por outro lado, os meses de junho a agosto apresentam precipitação média inferiores, com destaque para agosto, indicando um período seco bem marcado.

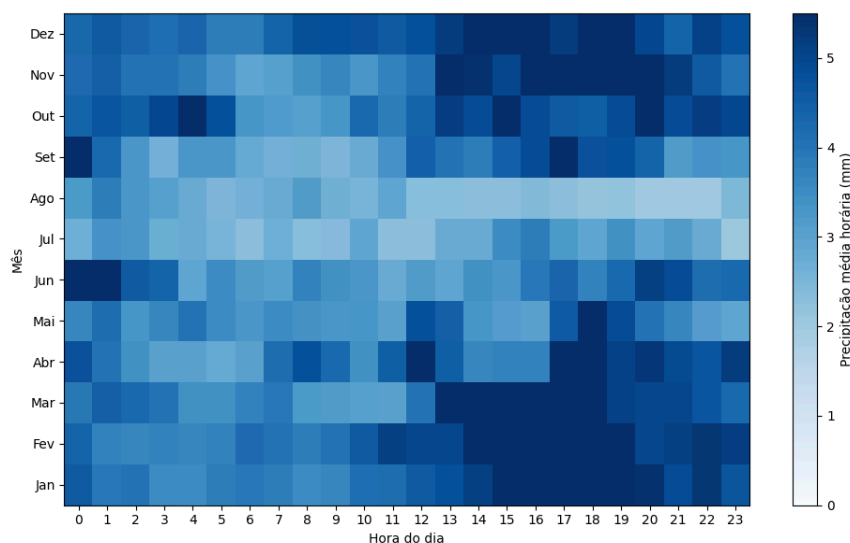


Figura 2 - Distribuição horária de precipitação média mensal em períodos chuvosos.

A distribuição da intensidade média de todas as estações, calculada pelos métodos diário e horário, apresenta sazonalidade acentuada, com redução no inverno e aumento no verão (Figura 3). A intensidade diária exibiu maior variação nos dados em comparação com a intensidade horária, que mostrou distribuição menos ampla e sazonalidade mais marcada. Contudo, em ambas as análises, o mês de junho destacou-se com a maior variabilidade entre os anos, mostrando que em alguns anos ocorreram eventos de chuva muito mais intensos do que em outros, mesmo sendo um mês tipicamente seco nas Bacias PCJ.

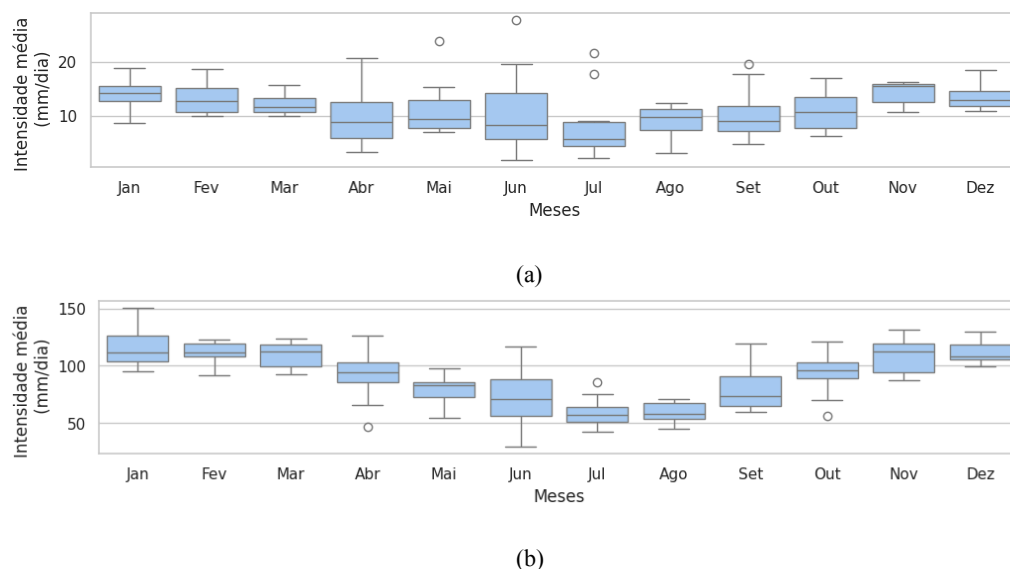


Figura 3 - Distribuição mensal de intensidades de precipitação média das estações de 2015 a 2024, em escala a) diária e b) horária.

A análise dos intervalos de intensidade de precipitação (Figura 4) revela padrões distintos na frequência de ocorrência de chuvas por diferentes intervalos de intensidade (mm/h) entre os anos de 2015 e 2024. As chuvas leves (0–5 mm/h) representam a maioria dos eventos, com destaque para o intervalo de 2,5–5 mm/h, que apresentou em média cerca de 850 ocorrências por ano, sendo o intervalo mais recorrente ao longo do período. Por outro lado, chuvas de intensidade moderada (5–10 mm/h) mostraram uma tendência de crescimento, com aumento de aproximadamente 65% na frequência entre 2017 e 2023. Já as chuvas intensas (>10 mm/h) foram raras, com média inferior a

15 ocorrências por ano, demonstrando que eventos dessa magnitude continuam pouco frequentes. A quantidade de estações variou ao longo do tempo, influenciando diretamente a frequência registrada, especialmente nos intervalos de menor ocorrência. Esses resultados sugerem uma distribuição de chuvas ainda concentrada em baixos volumes, mas com sinais de crescimento nas faixas intermediárias de intensidade.

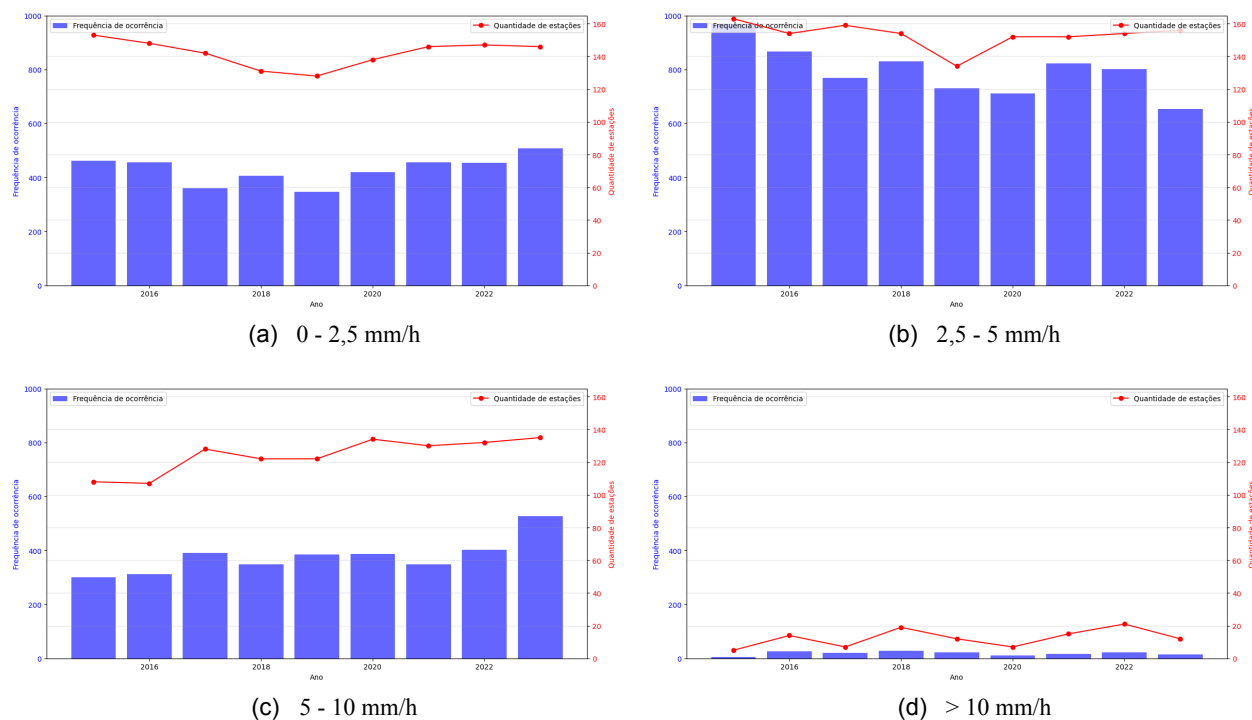


Figura 4 - Frequência de ocorrência de chuvas em diferentes intervalos de intensidade, por ano.

O intervalo de intensidade de 5 a 10 mm/h apresenta uma leve tendência de aumento ao longo dos anos. A Figura 5 ilustra a análise da frequência de ocorrência desse intervalo por mês e revela maior concentração nos meses de janeiro e dezembro, com destaque para janeiro de 2021, que registrou um pico de 92 ocorrências. Em contraste, os meses de julho e agosto apresentam as menores frequências, sendo agosto o mês com o menor valor, atingindo no máximo 8 ocorrências em 2021. Observou-se também que junho teve número elevado de ocorrências em 2020 e 2016, seguido de frequência moderada em 2012, 2018 e 2019, enquanto nos demais anos o número de registros em junho foi próximo de zero. Esse comportamento reforça a variabilidade observada na Figura 3.

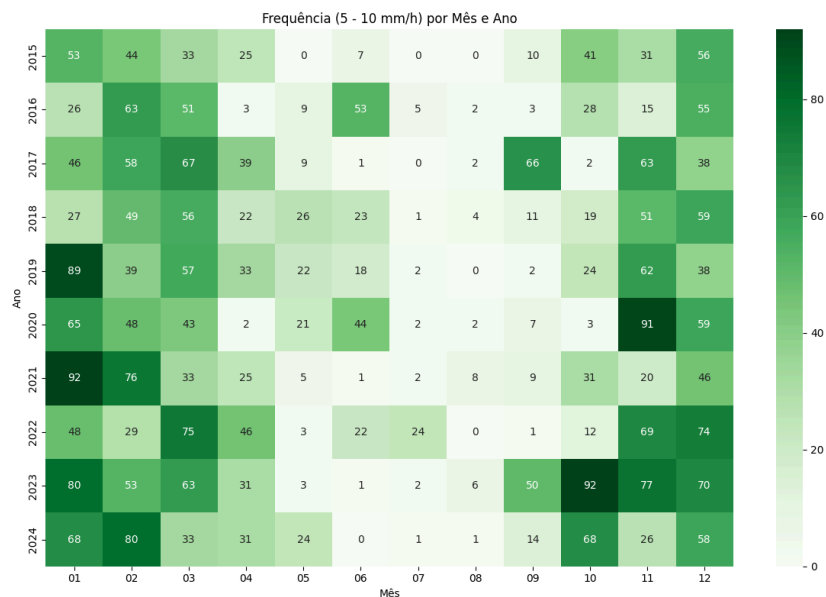


Figura 5 - Distribuição mensal das frequência de intensidade de 5 - 10mm/h

Distribuição espacial e análise de tendência

A análise de tendência utilizando o teste de Kendall's Tau revelou tanto tendências positivas quanto negativas na maioria dos meses (Figura 6). Observa-se, porém, que a intensidade horária apresentou predominantemente correlações positivas ao longo dos anos, especialmente nos meses chuvosos, sugerindo uma tendência de aumento na intensidade das chuvas. A figura também destaca os casos em que o p-valor se encontra entre 0,4 e 0,5, o que pode indicar uma possível falsa rejeição da hipótese nula ou a presença de uma correlação aparente, mas com poucos dados para confirmá-la estatisticamente. Nesses casos, os valores de Tau tendem a se aproximar de $\pm 0,5$, sinalizando uma associação moderada, porém estatisticamente inconclusiva.

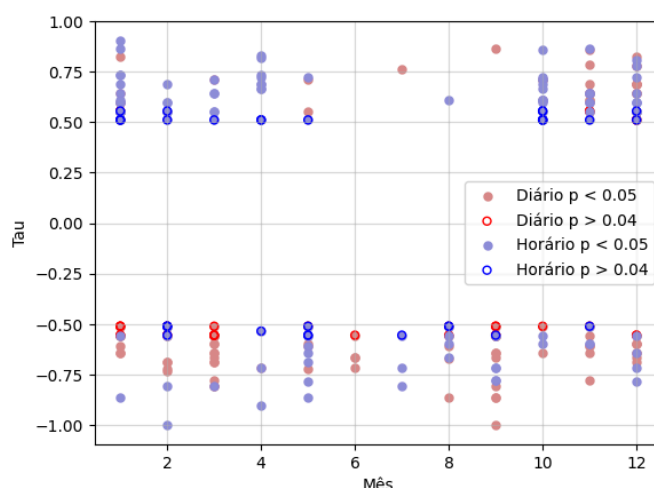


Figura 6 - Estatística Tau significativa de todas as estações, por meses do ano.

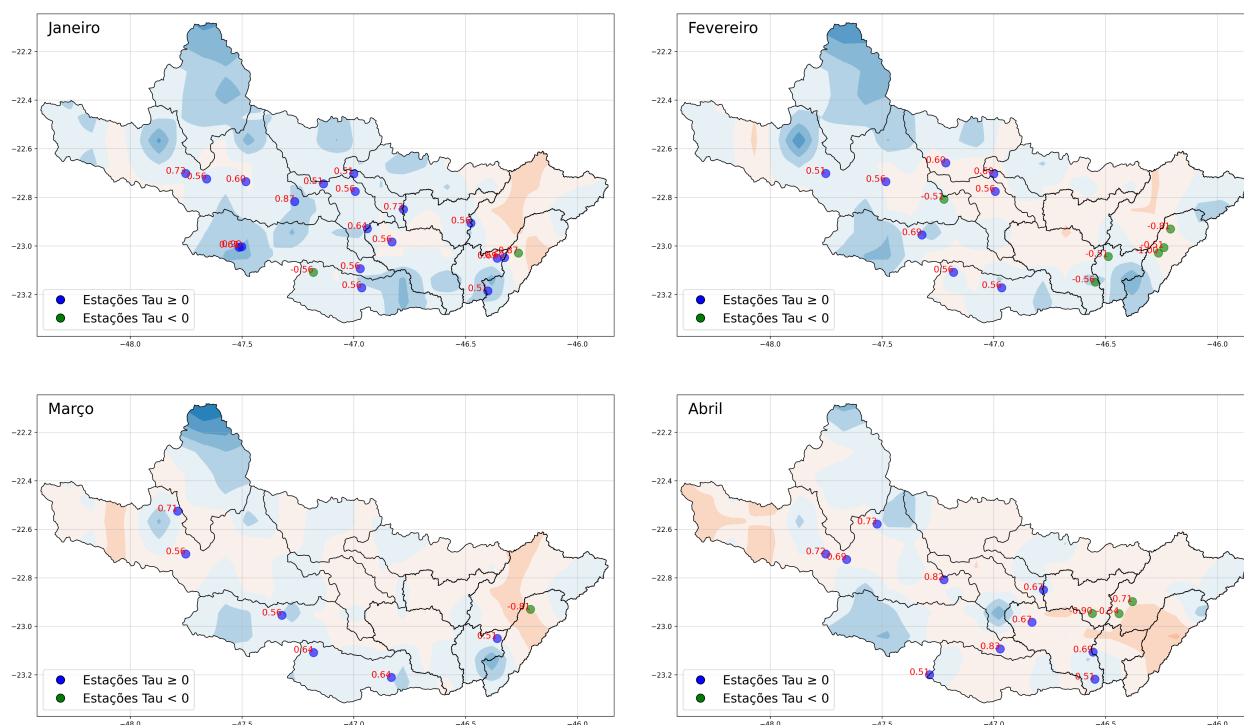
Na análise das tendências de intensidade horária de precipitação nas Bacias PCJ, considerando apenas as estações com p-valor $< 0,5$ no teste de Kendall's Tau, observou-se um padrão espacial distinto entre diferentes regiões da bacia (Figura 7). No setor sudeste, as correlações significativas identificadas foram predominantemente negativas, com exceção de algumas estações,

com correlações positivas e valor de Tau muito próximo do limite inferior da significância estatística. Essa predominância de correlações negativas coincide com a localização das bacias Atibaia, Jundiá e o extremo oeste de Piracicaba, situadas nas bordas da bacia principal, mais especificamente nas regiões sudeste, noroeste e oeste.

Por outro lado, a região central da bacia destacou-se pela maior concentração de estações com correlação positiva significativa, sobretudo nos meses mais quentes (como janeiro, fevereiro e dezembro), sugerindo uma tendência de aumento da intensidade das chuvas nesse setor. Essa área central, marcada por maior urbanização e concentração populacional (Agência das Bacias PCJ, 2010; SANTAROSA et al., 2023), pode estar sofrendo efeitos locais associados à ilha de calor urbana e alterações no uso e ocupação do solo, que potencializam eventos de chuva intensa.

Em contrapartida, os meses de inverno apresentaram menor ocorrência de correlações significativas, com ausência total de significância em junho, o que reforça a menor variabilidade e frequência de chuvas nesse período na região. Essa estabilidade pluviométrica em meses secos limita a capacidade de detecção de tendências, uma vez que os eventos de precipitação são esparsos e de baixa intensidade.

Ao observar espacialmente as médias de intensidade de chuva, destaca-se a porção norte da bacia, que apresentou os maiores valores nos meses chuvosos. No entanto, essa região não demonstrou tendência significativa de aumento ao longo dos anos, indicando uma relativa constância na ocorrência de eventos intensos. Em contraste, o extremo oeste da bacia apresentou os menores valores de intensidade média durante grande parte do ano, além de indicar uma tendência de redução de intensidade nos meses de setembro, dezembro e maio.



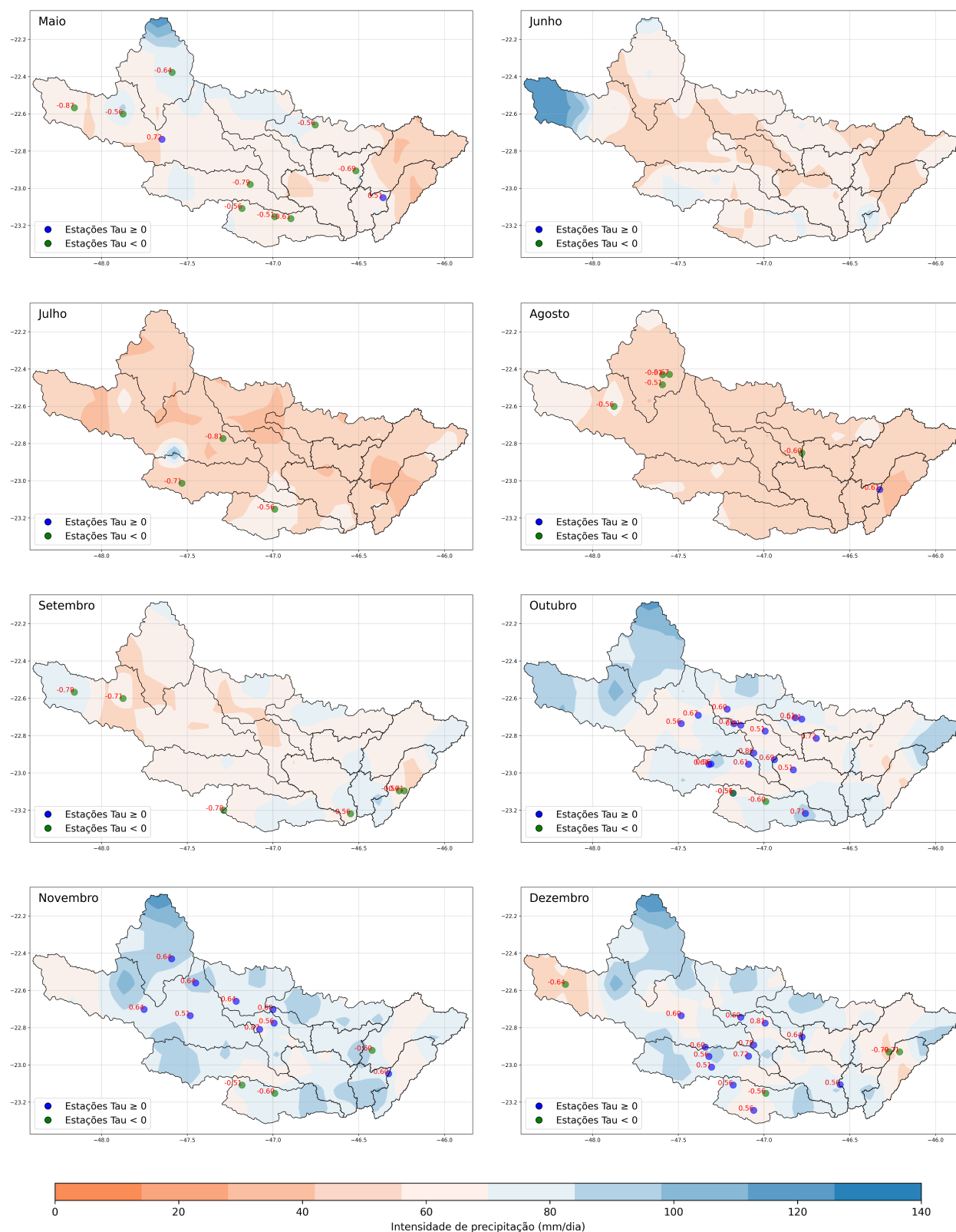


Figura 7 - Mapas da intensidade média de precipitação e localização das estações com tendência estatisticamente significativa de alteração na intensidade das chuvas.

CONCLUSÃO

O estudo evidenciou variações sazonais bem definidas na intensidade de chuvas nas Bacias PCJ, com predomínio de eventos intensos nos meses de verão e durante a tarde, o que reforça a influência do ciclo térmico diário e da atuação de sistemas convectivos. Os resultados mostraram um aumento na frequência de chuvas moderadas (5–10 mm/h), enquanto eventos intensos (>10 mm/h) continuam raros. A análise de tendência revelou um aumento da intensidade horária nas áreas mais urbanizadas da bacia, o que sugere uma possível influência de fatores antrópicos, como a urbanização e mudanças no uso do solo. Contudo, não houve uma tendência uniforme de aumento na intensidade das chuvas em toda a bacia, com algumas áreas mantendo valores constantes ou apresentando redução. As regiões centrais apresentaram maior número de estações com tendência de aumento da intensidade, ao passo que bordas da bacia revelaram correlações negativas.

Os resultados ressaltam a importância de monitoramento contínuo e da inclusão dessas tendências em sistemas de previsão e planejamento hídrico, visando maior resiliência frente às mudanças climáticas e à crescente demanda por água na região. Sugere-se, por fim, o aprofundamento da abordagem proposta, de modo a explorar mais estações e séries de dados mais extensas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. *Mapa 07 – Uso do Solo*. Plano das Bacias PCJ 2010–2020. Disponível em: https://agencia.baciaspcj.org.br/docs/plano-bacias-2010-2020/PCJ_PB-2010-2020_Mapas-07.pdf. Acesso em: 20 mai. 2025.
- ALMEIDA, A. S. et al. Previsão hidrometeorológica na operação do Sistema Cantareira nas Bacias PCJ. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS – XXIV SBRH, 2021, Belo Horizonte.
- COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ; FUNDAÇÃO AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. *Relatório final – Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2020 a 2035*. Elab. Consórcio Profill-Rhama – Profill Engenharia e Ambiente S.A. e Rhama Consultoria, Pesquisa e Treinamento. Piracicaba: Comitês PCJ, set. 2020. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/plano-de-recursos-hidricos/>. Acesso em: 20 mai. 2025.
- COOLEY, A.; CHANG, H.. *Precipitation intensity trend detection using hourly and daily observations in Portland, Oregon*. Climate, v. 5, n. 1, p. 10, 2017.
- GILES, J. A.; RUSCICA, Romina C.; MENÉNDEZ, Claudio G. *The diurnal cycle of precipitation over South America represented by five gridded datasets*. International Journal of Climatology, v. 40, n. 2, p. 668-686, 2020.
- HOFSTRA, N. et al. *Comparison of six methods for the interpolation of daily, European climate data*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 113, n. D21, 2008.
- HELSEL, D., H., R., RYBERG, K., ARCHFIELD, S., and GILROY, E.: Statistical methods in water resources, U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Elsevier, book 4, chapter A3, version 1.1, Reston, VA, USA, 2020.
- REBOITA, M. S. et al. *Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica*. Revista brasileira de meteorologia, v. 25, p. 185-204, 2010.
- SANTAROSA, L. V. et al. *Baseflow and water resilience variability in two water management units in southeastern Brazil*. International Journal of River Basin Management, v. 21, n. 3, p. 387-400, 2023.

AGRADECIMENTOS

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