

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÓDICOS

CORRELAÇÃO MULTIDIMENSIONAL ENTRE PRECIPITAÇÃO E O ARMAZENAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAPANEMA

Carolina Souza Brizotti¹; Rodrigo Lilla Manzione^{1,2}

Abstract: Considering the importance of analyzing the interactions of the hydrological cycle and the interference between its elements to deepen the analysis of water conditions in the Paranapanema River Basin (BHRP), given its growing context of groundwater demand due to water supplementation and for a greater detailing of its recharge patterns and possible interferences caused by the rainfall regime, it is necessary to use statistical analysis methodologies to evaluate the possibilities of planning for water resources management. For this study, groundwater storage data from the Global Land Data Assimilation System (GLDAS) model and precipitation from the Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) were used, from 2003 to 2023, with observation made through their annual average; both variables were used to create two multidimensional rasters to be compared through the Pearson correlation method, to evaluate the direct influence of precipitation on groundwater recharge in the different contexts of the basin extension. The patterns presented by the association of groundwater and precipitation data for the 20-year period showed an average positive correlation, indicating regular influence between the data sets.

Resumo: Considerando a importância de análise das interações do ciclo hidrológico e da interferência entre seus elementos para aprofundar a análise das condições hídricas na Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema (BHRP), dado ao seu crescente contexto de demanda de águas subterrâneas em função de suplementação hídrica e para uma maior detalhamento de seus padrões de recarga e possíveis interferências provocadas pelo regime de chuvas, faz-se necessária utilização de metodologias de análise estatística para avaliação das possibilidades de planejamento para a gestão de recursos hídricos. Para este estudo foram utilizados dados de armazenamento de águas subterrâneas provenientes do modelo Global Land Data Assimilation System (GLDAS) e de precipitação do Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG), do período de 2003 a 2023, com observação feita através de sua média anual; ambas as variáveis foram utilizadas para a criação de dois rasters multidimensionais para serem comparadas através do método de correlação de Pearson, para avaliar a influência direta da precipitação sobre a recarga subterrânea nos diferentes contextos da extensão da bacia. Os padrões apresentados pela associação dos dados de águas subterrâneas e precipitação para o período de 20 anos apresentaram média de correlação positiva, indicando influência regular entre os conjuntos de dados.

Palavras-Chave – águas subterrâneas; precipitação; correlação.

1) Programa de Pós Graduação em Geografia - Mestrado Profissional, Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP, Presidente Prudente (SP). carolina.brizotti@unesp.br

2) Departamento de Geografia e Planejamento, Faculdade de Ciências, Tecnologia e Educação, UNESP, Ourinhos (SP). illia.manzione@unesp.br

INTRODUÇÃO

Considerando a importância de preservação e manejo das águas, e dada a influência dos eventos meteorológicos em processos hidrológicos que se manifestam em bacias hidrográficas, faz-se essencial explorar o funcionamento de fenômenos hidráticos. As dinâmicas de fluxo e reserva em uma bacia, considerando a precipitação como fonte de entrada de água, sendo em seu escoamento responsável por abastecer o sistema hidrográfico, dentre rios lagos e aquíferos, este último sendo responsável pelo armazenamento, caracterizando parte possível da saída da água precipitada considerando sua rede de drenagem e o fluxo hidráulico (Tucci, 2007).

A Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema (BHRP) é uma bacia interestadual com elevada relevância econômica para São Paulo e Paraná, e está em crescente desenvolvimento (Manzione, 2024). A BHRP apresenta ampla diversidade de características físicas devido a sua extensão territorial de 106,5 mil km², com temperatura média aproximada inferior a 18°C na região centro-sul e superior a 21°C nas regiões norte e nordeste (PIRH Paranapanema, 2016). Na região incide uma precipitação média corresponde a 1.450 mm com variação espacial semelhante chegando até 1.800 mm no centro-sul e próximo a 1.300 mm nas regiões norte e nordeste. A BHRP contempla formações hidrogeológicas dos aquíferos Bauru, Serra Geral e Guarani e devido a seu contexto de grande demanda hídrica a bacia é amplamente abastecida por águas subterrâneas (ANA, 2014).

Atualmente os estudos hidrológicos em bacias hidrográficas contam com uma grande variedade de dados oriundo de sensores remotos que possibilitam sua análise de forma individual ou integrada. Para a análise de componentes hidrológicos, a análise exploratória de dados espaciais (AEDE) é indicada para a interpretação de padrões espaciais, tendências e anomalias nos dados, explorando relações de dependência espacial. Por sua vez, a análise exploratória de dados espaço-temporais (AEDET), permite uma análise integrada, considerando as variações dos padrões espaciais através do tempo, permitindo identificar, persistência, sazonalidade e relações entre elementos espaço-temporais. Neste contexto a correlação espacial, atua como ferramenta na avaliação do grau de similaridade entre valores de uma variável em pontos geograficamente próximos, enquanto a correlação espaço-temporal, capta interações complexas, como mudanças nas condições ambientais em determinados padrões ou períodos (Anselin, 2000).

Esta detecção de relações espaço-temporais permite mais profunda compreensão dos dados observados, sendo, portanto, uma importante aliada do planejamento para gestão de recursos hídricos considerando maior aprofundamento na análise de comportamentos hidrológicos para eficaz tomada de decisão. A gestão integrada dos recursos hídricos deve considerar os comportamentos superficiais e subterrâneos do ciclo hidrológico. Deste modo, o presente trabalho se justifica pela necessidade de análise integrada entre relevantes componentes do ciclo hidrológico como precipitação e águas subterrâneas para melhor compreensão da influência de sua interação e de sua relação espacial e temporal. A hipótese de interdependência entre estes elementos influência diretamente na disponibilidade hídrica da bacia, considerando variabilidade climática e pressão antrópica. Assim, esse estudo aplicou técnicas de AEDET para verificar a correlação entre a precipitação e o armazenamento de água subterrânea na BHRP para um período de 20 anos a partir de dados de monitoramento obtidos por sensores remotos e algoritmos de assimilação de dados terrestres.

MATERIAIS E MÉTODOS

A correlação entre a precipitação e o armazenamento de água subterrânea foi analisada para um período compreendido entre os anos de 2003 e 2023. Os dados de armazenamento de águas subterrâneas são provenientes do modelo de captação da superfície terrestre (CLSM) incluídos no “Sistema de Assimilação de Dados de Land Data Global” (GLDAS) da NASA. Os valores de águas

subterrâneas nesse modelo são obtidos decompondo os valores de Armazenamento Total de Água Terrestre (ATAT) provenientes das missões GRACE e GRACE-FO através do cálculo da diferença entre as variáveis simuladas de umidade do solo (US), o equivalente de água em neve (EAN) e interceptação pelo dossel (ID) (Li et al. 2020).

Por sua vez, os de precipitação foram obtidos de algoritmo de estimativas de precipitação Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) da missão internacional de Medição Global de Precipitação (GPM) composta por uma constelação de satélites que estima valores de chuva e neve (Huffman et. al. 2023).

Os dados de águas subterrâneas possuem resolução espacial de 0,25° e temporal de 1 dia com valores do armazenado de água em mm, enquanto os de precipitação tem resolução espacial de 0,1° e temporal de 1 mês com o precipitado em mm. Para o sucesso do processamento da correlação de rasters multidimensionais é essencial que os dados apresentem as mesmas dimensões espaciais e temporais para serem devidamente associados. Deste modo, a resolução temporal foi igualada para que ambos os intervalos de dados extraídos terem os mesmos períodos de correspondência anual, e a resolução espacial precisou de um pré-processamento para que fosse estabelecida a correspondência entre as camadas. De acordo com Zhang, et. al. (2014), para adequar diferentes modelos de dados espaciais como os de dado em grade existem manipulações estatísticas que servem técnicas como “upscaling” ou “downscaling”, que tem a finalidade de padronizar variáveis para análise através de sua agregação ou refinamento, respectivamente. Neste contexto, como um dos dados apresenta menor resolução com relação ao outro, optou-se por degradar a resolução para redução de ruídos no processo de interpolação. Nesse procedimento, utilizou-se o método bilinear de interpolação espacial, que considera os quatro pontos vizinhos mais próximos que formam um retângulo ao redor do ponto a ser estimado e os interpola linearmente nas direções x e y, resultando em um valor representativo da média ponderada com base na distância entre o ponto de interesse e seus vizinhos. Essa técnica foi adotada por produzir uma transição mais suave entre os valores no contexto de upscaling, para que não haja descontinuidade ou diferenças bruscas entre os valores da nova grade. A função matemática do método pode ser representada da seguinte forma (Li et. al. 2004):

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \quad (1)$$

Para a execução do pré-processamento, foi utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado Visual Studio Code, onde foram inseridas as bibliotecas Pandas para processamento de dados, Rasterio para manipulação de arquivos do tipo raster e a função RegularGridInterpolator da biblioteca SciPy para interpolação de dados multidimensionais em grade retilínea. Os dados de precipitação foram transformados de 0,1°, inseridos em arquivo tipo raster contendo as médias anuais, para uma interpolação correspondente a grade de 0,25° com os pontos de interesse. Obtendo-se a correspondência espaço-temporal dos dados, os pontos são inseridos no ArcGIS Pro v.3.4.3 para a criação de uma camada de dados raster multidimensional no formato Cloud Raster Format (CRF) da Esri para cada variável. Esta camada multidimensional produzida após a agregação temporal dos dados pode armazenar informações em diferentes intervalos de tempo, ou em diferentes profundidades e alturas (ESRI, 2024). Esta camada multidimensional é o que vai possibilitar a análise espaço-temporal de correlação entre os dados, através da ferramenta “Multidimensional Raster Correlation”, que tem como entrada os arquivos CRF produzidos no passo anterior, e gera como saída um raster de correlação, com base no método estatístico selecionado, tendo como opções Pearson, Spearman e Kendall, retornando a representação da análise para todo o período do conjunto de dados (ESRI, 2023).

Para a presente análise foi utilizada a correlação de Pearson, considerando a linearidade dos dados observados. A correlação de Pearson mensura a intensidade da associação entre duas variáveis qualitativas contínuas, o coeficiente de correlação varia entre -1 e +1, onde os valores próximos de 1 possuem maior intensidade de relação, sendo $r = 1$ uma associação perfeita, $r = -1$ uma associação perfeita inversamente proporcional e $r = 0$ associação nula (Ferreira, 2005).

A correlação espaço temporal pode ser representada pela expressão matemática:

$$r_{xy} = \frac{\sum_s \sum_t (x(s,t) - \bar{x})(y(s,t) - \bar{y})}{\sqrt{\sum_s \sum_t (x(s,t) - \bar{x})^2 \sum_s \sum_t (y(s,t) - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Onde \bar{x} e \bar{y} representam a média e x e y os valores das variáveis ao longo do espaço-tempo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da análise de correlação indicou uma correlação positiva entre os valores de águas subterrâneas e precipitação variando entre 0,35 e 0,72 (Figura 1). No geral, a correlação teve média de $r = 0,57$, considerando toda a área da bacia (Figura 2). Esses valores podem ser considerados de intensidade moderada à forte, segundo a classificação de Andriotti (2013). Quanto ao resultado de p-valor para a média da área de estudo foi de 0,11 (Figura 3), indicando correlação estatisticamente significativa.

Figura 1 – Gráfico de distribuição da correlação

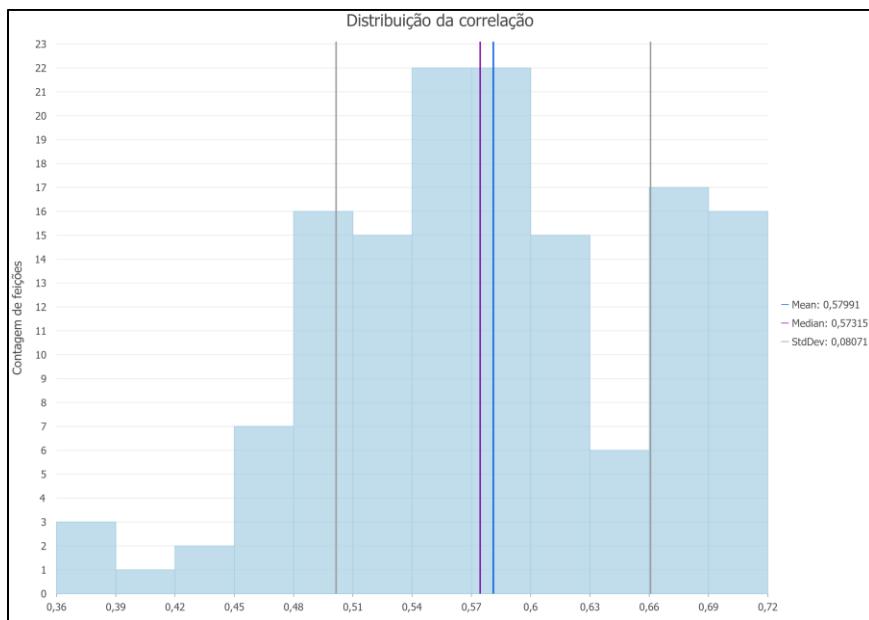


Figura 2 – Mapa de correlação multidimensional entre águas subterrâneas e precipitação na bacia hidrográfica do Paranapanema considerando o período de 2003 a 2023

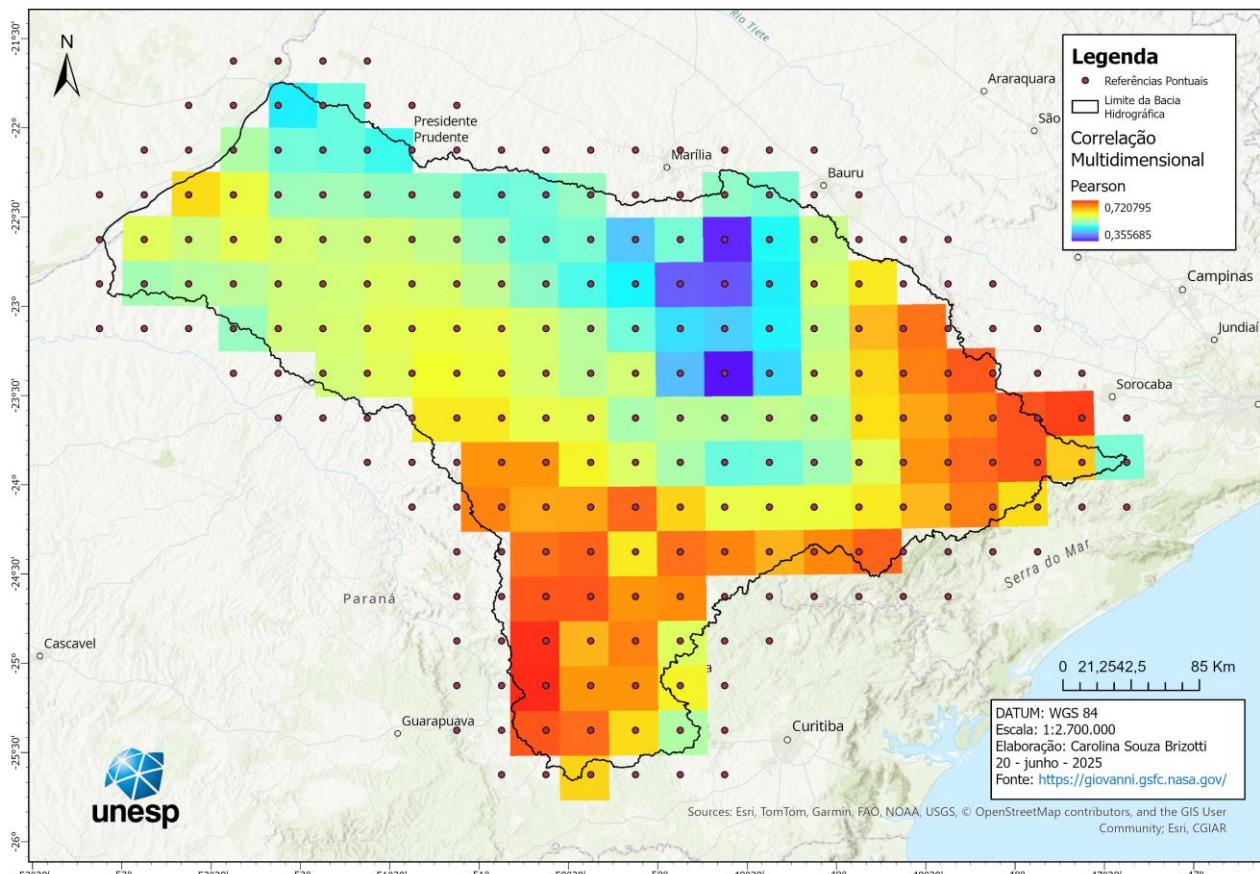
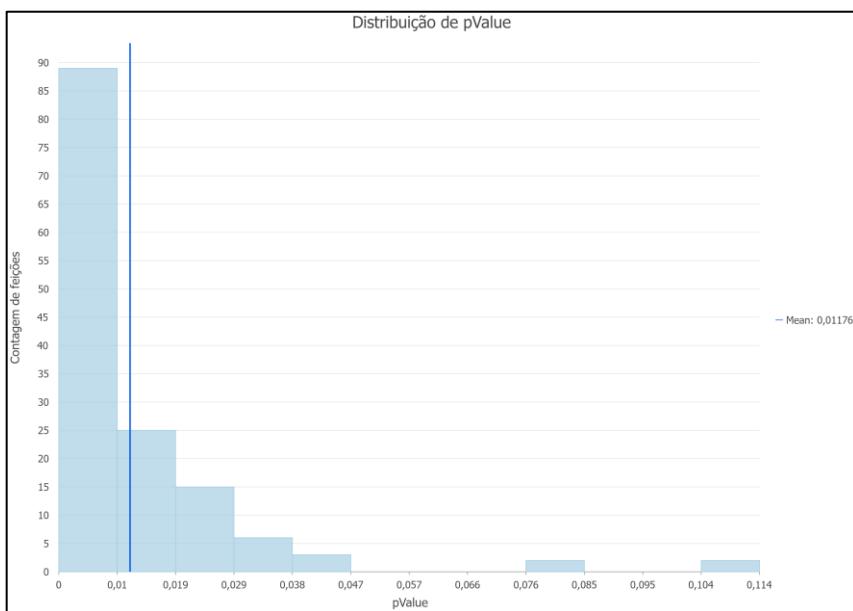


Figura 3 - Gráfico de distribuição de p-valor



Deste modo podemos considerar que o aumento da precipitação está associado ao aumento da recarga do aquífero, sugerindo um comportamento hidrologicamente consistente. Apresentando maior correlação na região sul da bacia hidrográfica, que em conjunto apresenta valores mais altos de precipitação e de armazenamento de águas subterrâneas ao longo do período analisado. As áreas que apresentaram maiores correlações também apresentam agrupamentos espaciais de valores de maior armazenamento de água subterrânea na BHRP (Manzione e Brizotti, 2025). Nessas áreas, pode-se esperar uma maior reserva em anos chuvosos e uma menor reserva em anos secos, fornecendo assim informações para o planejamento dos recursos hídricos em momentos de crise e garantir a segurança hídrica da região.

CONCLUSÃO

A análise revelou associações satisfatórias entre os padrões de armazenamento de água subterrâneas e precipitação na bacia do Paranapanema durante o período analisado, permitindo-se considerar influência na linearidade de correlação entre aumento e diminuição do regime de chuvas e o seu impacto na recarga de aquíferos. Esses resultados reforçam a importância da utilização de análises estatísticas aplicadas a dados ambientais como ferramentas de planeamento e gestão das águas na região.

REFERÊNCIAS

- ANDRIOTTI, J. L. S. (2013). Fundamentos de estatística e geoestatística. Editora Unisinos.
- ANSELIN, L. (2000). Spatial Econometrics: Methods and Models. Kluwer Academic Publishers.
- CHENG, T. et al. (2021). “Spatio-temporal data mining”, in Handbook of regional science. Org. por Fisher, M. M.; Nijkamp, P., [S.l.: s.n.], pp. 1691–1709.

ESRI. (2023). Multidimensional raster correlation. ArcGIS Pro 3.3 documentation. [S.l.], disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.3/tool-reference/image-analyst/multidimensional-raster-correlation.htm>. Acesso em: 10 mai. 2025.

ESRI. (2024). An overview of multidimensional raster data. ArcGIS Pro 3.4 documentation. Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/3.4/tool-reference/image-analyst/an-overview-of-multidimensional-raster-data.htm>. Acesso em: 10 mai. 2025.

FERREIRA, D. F. (2005). Estatística básica. Lavras: Editora UFLA.

GILLIES, S. (2023). Rasterio: access to geospatial raster data. Disponível em: <https://rasterio.readthedocs.io/>. Acesso em: 20 abr. 2025.

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

LI, B.; BEAUDIOING, H.; RODELL, M. (2020). GLDAS Catchment Land Surface Model L4 daily 0.25 x 0.25 degree GRACE-DA1 V2.2. Greenbelt, Maryland, USA: NASA/GSFC/HSL, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). DOI: 10.5067/TXBMLX370XX8. Acesso em: 19 mar. 2025.

LI, B. et al. (2019). “Global GRACE data assimilation for groundwater and drought monitoring: Advances and challenges”. Water Resources Research, v. 55, p. 7564–7586. DOI: 10.1029/2018wr024618.

LI, Z.; ZHU, C.; GOLD, C. (2004). Digital terrain modeling: principles and methodology. CRC Press.

MANZIONE, R. L. (2024). *“Interpretation of land use and land cover changes at different classification levels: The Paranapanema River Basin–Brazil case”*, Org. por Silva-Fuzzo, D. et al. Elsevier, Amsterdam, pp. 367-401

MANZIONE, R. L.; BRIZOTTI, C. S. (2025). *“Spatial clusters and temporal trends of groundwater storage in the Paranapanema River Basin, Brazil”*. Groundwater for Sustainable Development 30, 101453.

MCKINNEY, W. (2010). “Data structures for statistical computing in Python”. Proceedings of the 9th Python in Science Conference, v. 445, p. 51–56. DOI: 10.25080/Majora-92bf1922-00a.

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

SCIPY. `scipy.interpolate.RegularGridInterpolator` — SciPy v1.13.0 Manual. Disponível em: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.RegularGridInterpolator.html>. Acesso em: 23 abr. 2025.

TUCCI, C. E. M. et al. (2007). Hidrologia: ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH.

ZHANG, J.; ATKINSON, P.; GOODCHILD, M. F. (2014). Scale in spatial information and analysis. CRC Press.