

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

PADRÕES ESPACIAIS DA UMIDADE DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAPANEMA ENTRE 2015 E 2024

Maria Angélica Padovani Ederli¹; Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione²

Abstract: Soil moisture is a variable that is difficult to measure, with high spatial variability, and plays a key role in events such as wildfires, landslides, floods, and agricultural production. Through the use of satellites and remote sensing, it becomes possible to incorporate this information into land-use planning and water resource management. Over the past decade, the Paranapanema River Basin (PRB) has experienced successive water crises, mainly due to changes in precipitation patterns, which have led to imbalances in other components of the hydrological cycle. Therefore, understanding the spatial patterns of soil moisture helps identify not only where it is more or less intense, but also whether there are clusters or anomalous values (information essential for water monitoring and territorial planning). This study analyzed the spatial variability of soil moisture in the Paranapanema River Basin using Level 3 and Level 4 data products from the SMAP (Soil Moisture Active Passive) mission, applying Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) techniques to identify spatial clusters of high or low moisture values and detect possible anomalies. The results indicated that the L3 product contains more outliers, especially near water bodies, while the L4 product presents broader and more consistent groupings. A recurring spatial pattern of low moisture in the northern portion and high moisture in the southern portion of the basin was observed. Thus, this research aims to identify the Hydrographic Planning Units (HPUs) most vulnerable to extreme events and to support more efficient water resource management in the region.

Resumo: A umidade do solo é uma variável de difícil medição, com alta variabilidade espacial, e exerce papel fundamental em eventos como incêndios, deslizamentos, enchentes e na produção agrícola. Com o uso de satélites e sensores remotos, torna-se possível incorporar essas informações ao planejamento territorial e à gestão dos recursos hídricos. Na última década a Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema (BHRP) vem sofrendo com sucessivas crises hídricas principalmente devido a alterações nos padrões de precipitação, o que acarretou um desequilíbrio em outras variáveis do ciclo hidrológico. Assim, conhecer os padrões espaciais da umidade do solo permite saber não somente onde ela se manifesta com maior ou menor intensidade, mas também se possuem agrupamentos ou valores anômalos, sendo uma informação essencial para o monitoramento de recursos hídricos e planejamento territorial. Este estudo analisou a variabilidade espacial da umidade do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema por meio de dados dos produtos L3 e L4 da missão SMAP, aplicando técnicas de Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE), visando identificar

1) Universidade Estadual Paulista (UNESP), Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Av. 24 A - Bela Vista, Rio Claro - SP, 13506-900, (18) 998215524, angelica.ederli@unesp.br

2) Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Geografia e Planejamento, Av. Renato da Costa Lima, 451 - Ville de France, Ourinhos - SP, 19903-302, lilla.manzione@unesp.br

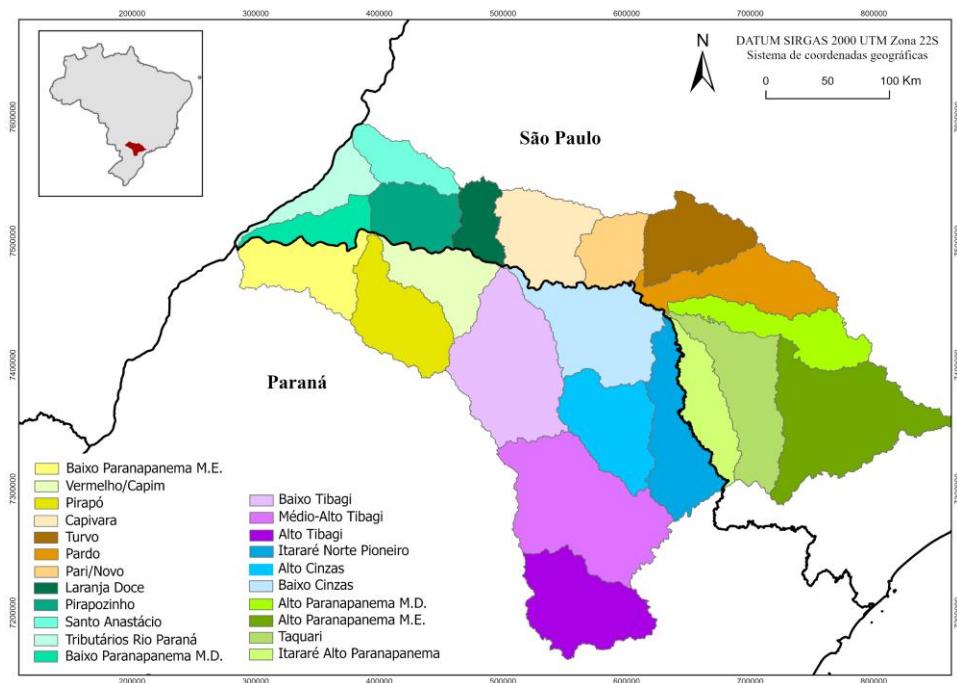
agrupamentos espaciais de valores mais altos ou baixos de umidade e detectar possíveis anomalias. Os resultados apontaram que os dados do produto L3 possui mais outliers, especialmente próximos a corpos d'água, enquanto o L4 exibe agrupamentos mais amplos. Observou-se um padrão espacial recorrente com baixa umidade na porção norte e alta umidade ao sul da bacia. Dessa forma, espera-se identificar as Unidades de Planejamento Hídrico (UPHs) mais vulneráveis a eventos extremos e apoiar a gestão eficiente da água na região.

Palavras-Chave – Umidade do Solo, Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema, Análise Exploratória de Dados Espaciais.

INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema (BHRP) desempenha um papel importante na economia e no meio ambiente, sustentando atividades diversas como agricultura, indústria e geração de energia. Abriga uma população de cerca de 4,7 milhões de habitantes, sendo que, de 60% residindo no lado paranaense. A Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRH) Paranapanema é formada por seis Unidades de Gestão Hídrica (UGHs), estabelecidas com base nas divisões hidrográficas reconhecidas pelos estados envolvidos: Alto Paranapanema, Médio Paranapanema e Pontal do Paranapanema, localizadas em São Paulo; e Norte Pioneiro, Tibagi e Pirapó, situadas no Paraná. Com base nessas UGHs, o Plano Integrado de Recursos Hídricos (PIRH) do Paranapanema definiu um conjunto de 22 subdivisões, chamadas Unidades de Planejamento Hídrico (UPHs), representadas na Figura 1, que são utilizadas como base para a análise e gestão no âmbito do plano (ANA, 2016).

Figura 1 – Mapa Unidades de Planejamento Hídrico da BHRP.



A umidade do solo é uma variável que influencia significativamente o balanço de energia e água do planeta, especialmente em um cenário de mudanças climáticas globais. Sensível a fatores como temperatura, precipitação e cobertura vegetal, a umidade do solo influencia processos eco-hidrológicos, circulação atmosférica e variações climáticas regionais. Mudanças climáticas e alterações no uso do solo afetam os processos hidrológicos, reduzindo a disponibilidade hídrica e comprometendo serviços ecossistêmicos. Dados de umidade do solo de alta resolução em tempo real podem aumentar significativamente a previsão de eventos extremos relacionados à precipitação, como inundações secas e incêndios florestais (Wakigari e Leconte, 2023; Pal e Eltahir, 2002; Eswaran *et al.*, 2021).

O SMAP (Soil Moisture Active Passive) é uma missão de sensoriamento remoto orbital projetada pela NASA para monitorar globalmente a umidade do solo e o estado de congelamento/descongelamento da água, contribuindo para estudos climáticos, agrícolas e de gestão hídrica. Essa missão utiliza um radar ativo e um radiômetro passivo, sendo capaz de mapear áreas de 1000 km de largura, proporcionando dados com resoluções variadas. Desde 2015, o radiômetro é o principal instrumento em operação, e seus produtos, processados em diferentes níveis, abrangem desde medições brutas até modelos avançados, sendo amplamente aplicados em previsões sazonais, segurança alimentar e mitigação dos impactos das mudanças climáticas (NASA, 2024).

Impulsionado pelas mudanças climáticas, explorar o dinamismo de variáveis do ciclo hidrológico em escalas espaciais e temporais pode fornecer informações úteis para gestores da água e usuários locais sobre cenários hídricos atuais e futuros com base em diferentes variáveis, como precipitação, armazenamento de água subterrânea, umidade do solo, evapotranspiração, escoamento superficial, entre outros (MANZIONE, 2023). Atualmente, séries com mais de 20 anos de dados orbitais começam a ser disponibilizadas para análise espacial e temporal, como no caso dos dados de precipitação, permitindo acessar informações sobre padrões espaciais e tendências temporais. No entanto, o tratamento desses dados, visando transformar dados em informações confiáveis, ainda é um ponto chave a ser abordado pela comunidade científica (Manzione e Castrignanò, 2019). O objetivo desse estudo foi aplicar técnicas de Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE) para identificar agrupamentos espaciais de valores mais altos ou baixos de umidade do solo e detectar possíveis anomalias a partir de dados da missão SMAP entre 2015 e 2024, produzindo informações que auxiliem no monitoramento de recursos hídricos e no planejamento territorial.

METODOLOGIA

Dados utilizados

A primeira etapa do estudo foi a obtenção de dados do satélite SMAP, utilizando a plataforma Google Earth Engine, que permite o processamento eficiente de grandes volumes de dados geoespaciais. A escolha do SMAP se deve à sua capacidade de fornecer medições globais de umidade do solo com alta precisão e frequência temporal, características essenciais para o monitoramento ambiental em escalas regionais. Esses dados foram utilizados para identificar padrões espaciais e temporais, além de clusters de alta ou baixa umidade do solo, fundamentais para o entendimento da dinâmica da umidade do solo na área de estudo. Foram utilizados os dados SMAP Nível 3 (SPL3SMP_E.006) e Nível 4 (SPL4SMGP.007) para análises. O L3 oferece composições diárias de umidade do solo superficial, enquanto o L4 disponibiliza dados de umidade do solo superficial e da zona radicular, além de variáveis adicionais, como evapotranspiração e temperatura do solo. As

análises contemplarão as especificidades de cada conjunto, incluindo períodos de interrupção dos dados L4. Para o produto L3, foram utilizadas as bandas *soil_moisture_am* e *soil_moisture_pm*, foi calculada a média entre elas e, em seguida, a média anual. Para os dados do produto L4, foi utilizada a banda *sm_surface*. Foram analisadas médias anuais dos dados de umidade do solo em m³/m³ do ano de 2015 a 2024.

Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE)

A análise dos agrupamentos e valores espúrios foi conduzida utilizando técnicas de Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE) com o objetivo de identificar áreas com diferentes padrões de umidade e detectar anomalias que possam indicar áreas vulneráveis a eventos climáticos extremos, como secas ou inundações. A AEDE permite verificar padrões espaciais e detectar *outliers*, contribuindo para a definição de estratégias de mitigação e gestão de recursos hídricos.

A análise espacial foi focada na identificação de pontos quentes (*hot spots*) e frios (*cold spots*), bem como na detecção de outliers que possam indicar áreas atípicas em relação à média global. Foram utilizadas as estatísticas locais *Gi** de Getis-Ord e *I* de Moran Local (Anselin, 1995) para medir a associação espacial entre variáveis de interesse. A estatística *Gi** de Getis-Ord foi utilizada para identificar agrupamentos significativos de altos e baixos valores, enquanto a estatística *I* de Moran Local ajudou a identificar a presença de *clusters* e *outliers*. A significância estatística foi avaliada utilizando os escores padronizados (Z-scores), com aplicação de uma correção da Taxa de Falsas Descobertas (FDR) para ajustar os limiares de significância dos valores-p. As análises espaciais foram realizadas com base em distâncias euclidianas, e as estatísticas espaciais serão calculadas para cada unidade de planejamento hidrográfico utilizando software geoespacial.

*Gi** de Getis-Ord

A estatística local *Gi** de Getis-Ord é utilizada para identificar áreas onde valores altos ou baixos se concentram espacialmente. Para verificar se uma localização específica *i* e suas regiões vizinhas apresentam valores maiores que a média em uma variável *x* de interesse, a estatística local *Gi** expressa pela Equação 1.

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j}x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\left[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2 \right] / (n-1)}} \quad (1)$$

Onde *x_j*, é o valor do atributo para a característica *j*, *w_{i,j}* é o peso espacial entre as características *i* e *j*, *n* é igual ao número total de características, e \bar{X} e *S* são dados pelas equações 2 e 3, respectivamente.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (3)$$

Conforme descrito por Rogerson (2019), o numerador da equação 2 reflete, para a região i , a diferença entre o valor ponderado de x na vizinhança de i e o valor esperado caso a vizinhança tivesse uma média nas características de x . Em outras palavras, a estatística Gi^* funciona como um escore Z, com valores de p correspondentes, que indicam se um ponto específico está estatisticamente agrupado em comparação com um ponto vizinho dentro do domínio do estudo. Os escores Z medem o grau de variabilidade, expressando quantos desvios padrão uma observação está da média (Rogerson, 2019). Quando Gi^* é positivo, isso indica que a soma dos valores na vizinhança é elevada em relação à média global; quando é negativo, a soma dos valores na vizinhança é menor em relação à média global. A intensidade dos processos de agrupamento é indicada pela magnitude e significância do escore Z. Escores Z positivos e elevados apontam para agrupamentos intensos de valores altos (*hot spots*), enquanto escores Z negativos e baixos indicam agrupamentos intensos de valores baixos (*cold spots*).

I de Moran Local

A estatística de associação espacial do Índice Local de Moran l_i (Anselin, 1995) é apresentada na equação 4, onde x_i representa o valor do atributo para a característica i , \bar{X} é a média do atributo correspondente, $w_{i,j}$ indica o peso espacial entre as características i e j . S^2_i é calculado conforme a equação 5, sendo n o número total de características.

$$l_i = \frac{x_j - \bar{X}}{S^2_j} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j} (x_j - \bar{X}) \quad (4)$$

$$S^2_j = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (x_j - \bar{X})^2}{n-1} \quad (5)$$

O cálculo do Índice Local de Moran l_i funciona removendo um valor de sua vizinhança e verificando se essa vizinhança é significativamente diferente da área de estudo. Em seguida, analisa-se se cada valor difere significativamente de sua vizinhança, o que ajuda a identificar possíveis *outliers* dentro de *clusters* (como pontos com valores muito baixos em áreas de *hot spots* ou valores muito altos em áreas de *cold spots*). Um valor positivo de l_i indica que uma característica tem vizinhos com valores semelhantes, sendo assim considerada parte de um *cluster*. Já um valor negativo de l_i sugere que uma característica possui vizinhos com valores distintos, sendo então considerada um *outlier*. O índice l_i só pode ser interpretado no contexto de seu escore Z ou valor p , pois se trata de uma medida relativa. Para que um *cluster* ou *outlier* seja detectado, o valor p associado deve ser suficientemente pequeno para ser considerado estatisticamente significativo. As estatísticas Getis-Ord Gi^* e o Índice Local de Moran l_i trabalham com as localizações e valores observados dos dados espaciais e são calculadas para cada característica (ponto ou polígono). Ao aplicar as estatísticas Gi^* ou l_i , as localizações das observações são tratadas como fixas, enquanto os valores associados são considerados variáveis aleatórias. Como explicado por (Anselin, 1995), a estatística Gi^* representa um tipo ligeiramente diferente de Indicador Local de Associação Espacial (LISA) em comparação com o índice l_i , pois os componentes individuais de Gi^* não estão relacionados a uma estatística global de associação espacial. Embora essa exigência não seja necessária para a identificação de clusters espaciais locais significativos usando a estatística Gi^* , ela é importante para o índice l_i , que permite diagnosticar a instabilidade local nas medições de associação espacial global, identificando

a presença de *outliers*. Como a estatística Gi^* não identifica *outliers*, ela pode ser usada em conjunto com o índice l_i para uma compreensão mais completa dos padrões espaciais.

Software

Para realizar a análise espacial detalhada, os dados temporais serão interpolados utilizando o método de ponderação de distância inversa. As análises espaciais serão realizadas no software ArcGIS, com a extensão *Spatial Analyst*, incluindo ferramentas como *Hot Spot Analysis* para a identificação de padrões espaciais significativos (*hot spots* e *cold spots*). Os mapas resultantes fornecem informações importantes para a gestão dos recursos hídricos e a formulação de estratégias de mitigação de riscos climáticos, além de apoiar decisões em áreas agrícolas e ambientais, já que mostram áreas onde os valores de umidade mais baixos ou mais altos se agrupam, possibilitando a realização de soluções direcionadas à segurança hídrica de cada UPH da bacia.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise espacial da umidade do solo na BHRP, foram elaborados mapas de agrupamentos e *outliers* espaciais da umidade do solo na BHRP por meio das estatísticas locais I de Moran Local e Gi^* de *Getis-Ord*, aplicadas aos dados do satélite SMAP nos Níveis 3 (SPL3SMP_E.006), conforme ilustrado nas Figuras 2 e 3, e Nível 4 (SPL4SMGP.007), representado nas Figuras 4 e 5. As análises permitiram identificar as regiões com os maiores e menores valores de umidade, além de revelar áreas com padrões espaciais discrepantes, como valores elevados cercados por baixos, e vice-versa.

Figura 2 - I de Moran Local aplicado aos dados SMAP L3 (2015–2024).

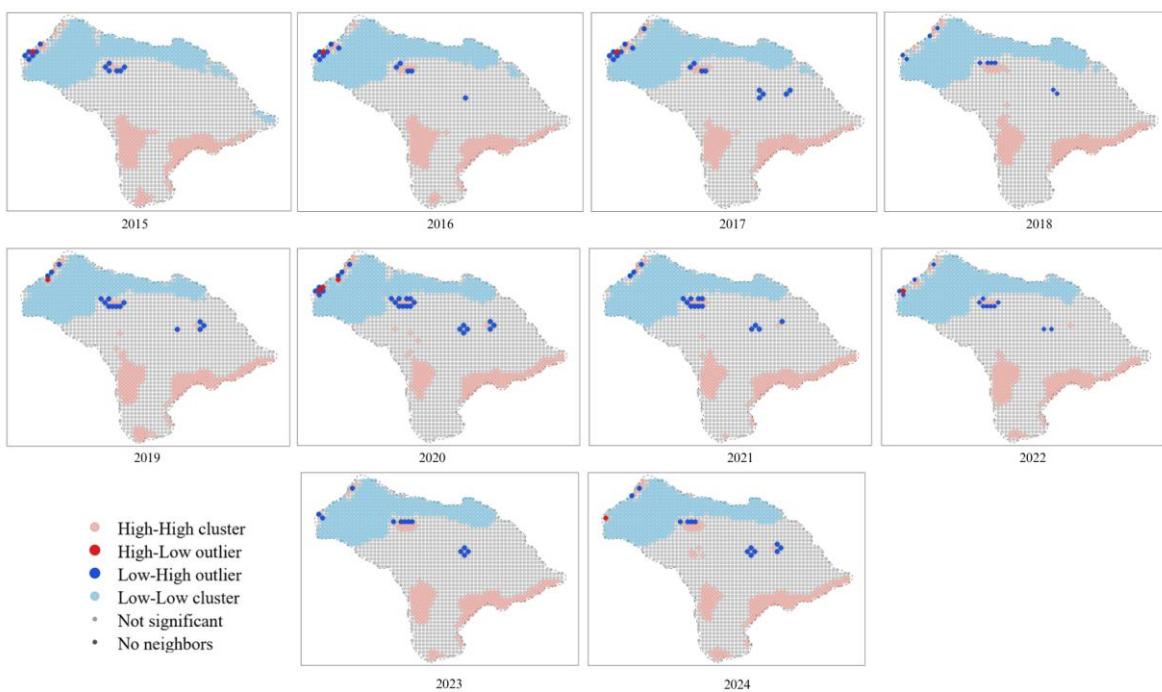


Figura 3 - Gi^* de Getis-Ord aplicado aos dados SMAP L3 (2015–2024).

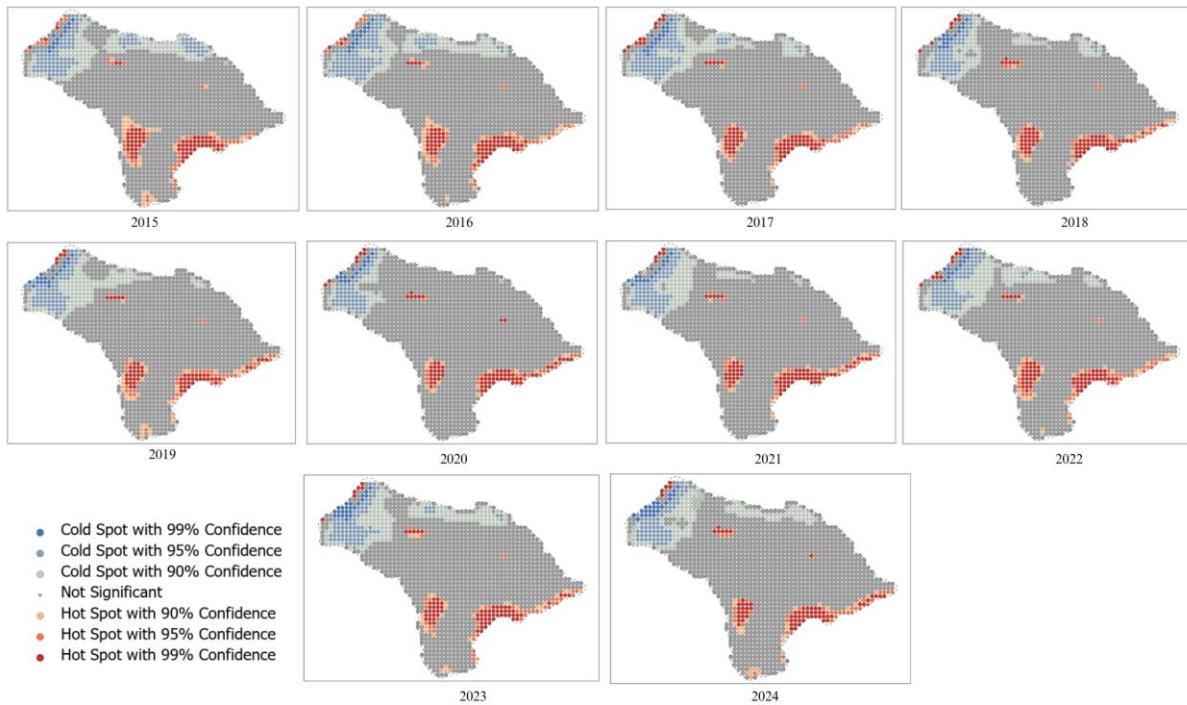


Figura 4 - I de Moran Local aplicado aos dados SMAP L4 (2015–2024).

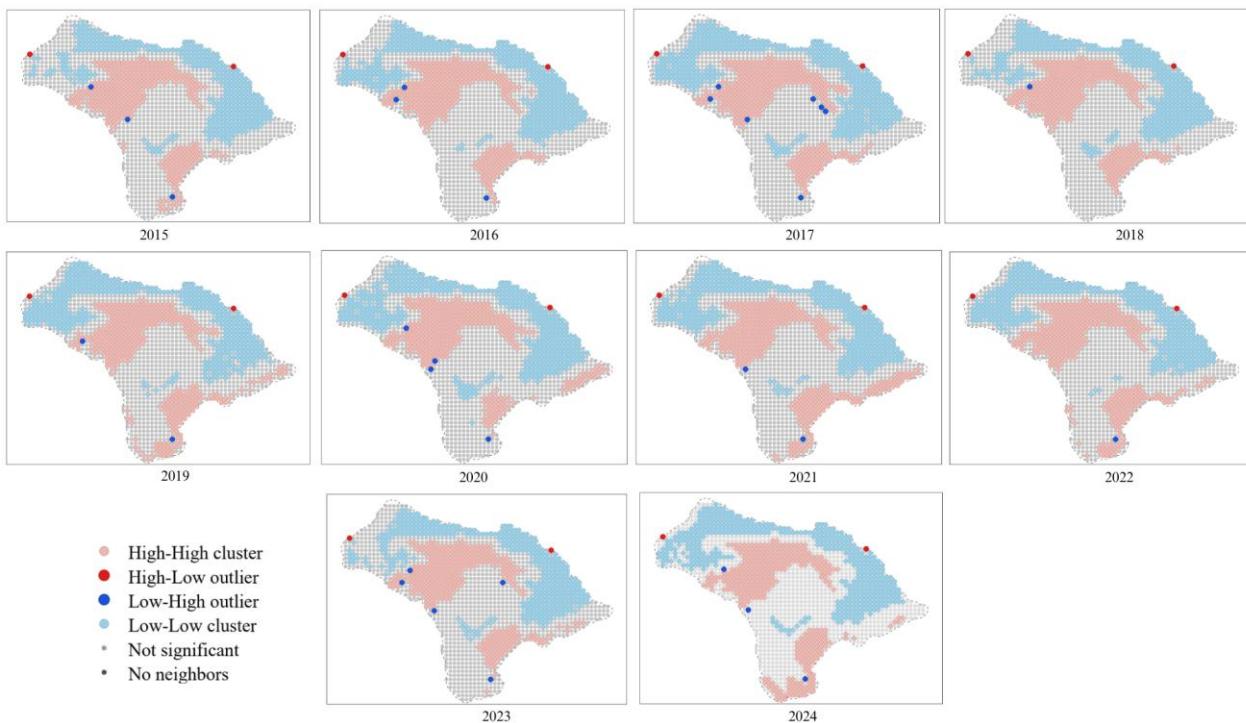
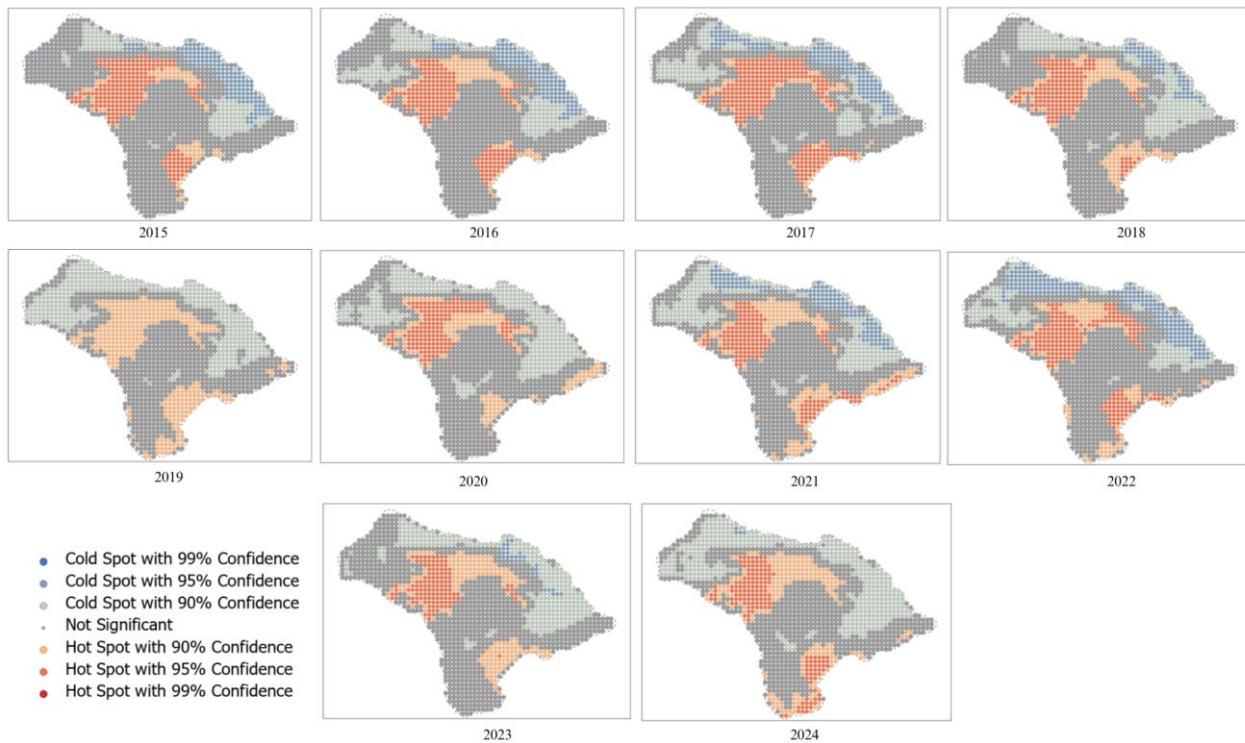


Figura 5 - Gi^* de Getis-Ord aplicado aos dados SMAP L4 (2015–2024).



De modo geral, o produto L3 apresenta uma quantidade maior de *outliers* em comparação com o produto L4. A Figura 2 mostra a distribuição espacial desses *outliers* ao longo dos anos analisados, evidenciando que sua concentração ocorre, predominantemente, em áreas próximas a corpos d'água, como o Rio Paraná e as represas de Xavantes, Jurumirim e Capivara. Essa distribuição pode estar relacionada à influência hidrológica dessas massas d'água nas medições, interferindo na detecção da umidade do solo por sensoriamento remoto. A Figura 3 revela que os agrupamentos de baixa umidade, com níveis de confiança de 99% e 95%, concentram-se na porção norte da bacia, especialmente nas UPHs Baixo Paranapanema M.D., Baixo Paranapanema M.E., Tributários do Rio Paraná, Santo Anastácio, Pirapozinho, Capivara, Pari/Novo e Turvo. Por outro lado, os agrupamentos de alta umidade ocorrem, majoritariamente, na região sul da bacia, destacando-se as UPHs Médio-Alto Tibagi, Itararé Norte Pioneiro, Itararé Alto Paranapanema, Taquari e Alto Tibagi. De forma geral, esse padrão espacial se mantém consistente ao longo de todos os anos analisados.

O produto L4, apresenta agrupamentos maiores em comparação com o L3, além disso, a partir da Figura 5 é possível observar que não houve *Cold Spots* e *Hot Spots* com 99% de confiança, ou seja, os dados variam entre 95% e 90% de confiança, o que indica que há 5% ou 10% de chance de o agrupamento ter ocorrido aleatoriamente, como é o caso do ano de 2019, que houve apenas dados com 90% de confiança. Em relação aos *outliers* do produto L4, mostrado na Figura 4, os *outliers* do tipo *High-Low* permanecem relativamente estáveis ao longo dos anos nas bordas norte da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema, o que pode indicar a presença de influências locais permanentes. Por outro lado, os *Low-High* outliers ocorrem com maior frequência e dispersão ao longo de toda a série temporal, destacando-se principalmente nos anos de 2017, 2020 e 2024, com concentração na

região central da bacia. Esses padrões estão sendo investigados, e nas próximas etapas do estudo serão cruzadas informações sobre uso e cobertura da terra, tipos de solo e variáveis climáticas, com o objetivo de compreender os fatores que contribuem para a ocorrência dessas anomalias.

As Figuras apresentadas evidenciam diferenças significativas entre os dados de umidade do solo dos Níveis 3 (SPL3SMP_E.006) e 4 (SPL4SMGP.007), tanto para a estatística de Gi^* de *Getis-Ord* quanto para I de Moran Local, tais divergências são esperadas considerando a natureza distinta de cada produto. O Nível 3 fornece um mosaico diário das condições da superfície terrestre a partir de dados observados diretamente pelo radiômetro *L-band* da missão SMAP. Esses dados são coletados duas vezes ao dia, durante as passagens descendente (por volta das 6h da manhã) e ascendente (por volta das 18h) (Google Earth Engine; NSIDC, 2015), refletindo, portanto, as condições reais e momentâneas da umidade do solo superficial. Como se trata de dados observacionais, podem estar mais sujeitos à variabilidade pontual, efeitos atmosféricos e ruídos de medição, o que pode gerar maior número de valores discrepantes (*outliers*) e padrões espaciais mais fragmentados. Já os dados de Nível 4 são baseados em simulações de modelos terrestres, que fornecem estimativas contínuas e integradas de umidade do solo, tanto na camada superficial (0–5 cm) quanto na zona radicular (0–100 cm), além de outras variáveis ambientais (Google Earth Engine; NSIDC, 2015). Como esse produto é modelado e suavizado por algoritmos, tende a apresentar maior consistência espacial e temporal, o que pode reduzir a ocorrência de outliers e resultar em clusters mais amplos e regulares.

CONCLUSÕES

Com base nas análises dos produtos SMAP de Nível 3 (L3) e Nível 4 (L4), foram observados agrupamentos espaciais (*clusters*) e *outliers* relacionados à umidade do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema. Nos dados L3, os clusters de baixa umidade, aparecem com consistência ao longo dos anos na porção norte da bacia, enquanto os agrupamentos de alta umidade concentram-se, majoritariamente, na porção sul. Já os outliers do tipo *High-Low* aparecem predominantemente nas proximidades ao Rio Paraná, com localização relativamente constante, por outro lado, os *outliers Low-High* mostram maior dispersão e frequência ao longo do tempo, apresentando maior quantidade nos anos de 2017, 2019, 2020 e 2021. A respeito dos dados L4, os agrupamentos também seguem uma distribuição relativamente estável ao longo dos anos, com *clusters* de baixa umidade predominantemente na parte norte, nas Unidades de Planejamento Baixo Paranapanema M.E., Baixo Paranapanema M.D, Tributários Rio Paraná, Alto Paranapanema M.D., Pardo e Turvo e os de alta umidade, predominantemente em Baixo Tibagi, Baixo Cinzas, Vermelho/Capim. No entanto, os outliers são menos numerosos e aparecem de forma mais pontual e distribuídos no centro da bacia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de mestrado concedida a primeira autora (Processo nº 2024/23290-9) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida ao segundo autor (Processo nº 305116/2024-0).

REFERÊNCIAS

- ANA (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO). “*A indústria na bacia do rio Paranapanema: uso da água e boas práticas*”. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/>. Acesso em: 4 nov. 2024.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). “*Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema: Produto 9 – Programa de Ações*”. Brasília: ANA, 2016. Disponível em: https://metadados.snh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/45d66f15-0605-4167-ac08-b24a6cdc2879/attachments/Produto9_PIRHParanapanema.pdf. Acesso em: 19 jun. 2025.
- ANSELIN, L. “*Local indicators of spatial association (LISA)*”. Geographical Analysis, v. 27, n. 2, p. 93–115, 1995.
- BARTELS, R. “*The Rank Version of von Neumann’s Ratio Test for Randomness*”. Journal of the American Statistical Association, v. 77, n. 377, p. 40–46, 1982.
- EESWARAN, R.; NEJADHASHEMI, A. P.; ALVES, F. C.; SARAVI, B. “*Evaluating the applicability of soil moisture-based metrics for gauging the resiliency of rainfed agricultural systems in the midwestern United States*”. Soil and Tillage Research, v. 205, p. 104818, 2021. NASA. SMAP Observatory: Overview. Disponível em: <https://smap.jpl.nasa.gov/observatory/overview/>. Acesso em: 27 nov. 2024.
- ENTEKHABI, D., NJOKU, E.G., O’NEILL, P.E., KELLOGG, K.H., CROW, W.T., EDELSTEIN, W.N., ENTIN, J.K., GOODMAN, S.D., JACKSON, T.J., JOHNSON, J., 2010. “*The soil moisture active passive (SMAP) mission*”. Proc. IEEE 98, 704–716.
- GOOGLE EARTH ENGINE; NSIDC. “*SPL3SMP_E.006 SMAP L3 Radiometer Global Daily 9 km Soil Moisture*”. Disponível em: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_SMAP_SPL4SMGP_007?hl=pt-br. Acesso em: 17 jun. 2025.
- GOOGLE EARTH ENGINE; NSIDC. “*SPL4SMGP.007 SMAP L4 Global 3-hourly 9-km Surface and Root Zone Soil Moisture*”. Disponível em: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_SMAP_SPL3SMP_E_006?hl=pt-br. Acesso em: 17 jun. 2025.
- MANZIONE, R. L., CASTRIGNANÒ, A. “*A geostatistical approach for multi-source data fusion to predict water table depth*”. Science of the Total Environment, v. 696: 133763, 2019.
- MANZIONE, R. L. “*Detection of spatial and temporal precipitation patterns using remotely sensed data in the Paranapanema River Basin, Brazil from 2000 to 2021*”. Discovery Water, v. 3:, 11, 2023.
- MENDEZ VALLEJO, C. A.; MANZIONE, R. L. “*Multidimensional forecasting of precipitation and potential evapotranspiration in the Paranapanema river basin using neural network time series*”. Journal of South American Earth Sciences, v. 142, p. 104961, 2024.
- PAL, J. S.; ELTAHIR, E. A. “*Teleconnections of soil moisture and rainfall during the 1993 Midwest summer flood*”. Geophysical Research Letters, v. 29, n. 18, p. 12–21, 2002.
- PETTITT, A. N. “*A non-parametric approach to the change-point detection*”. Applied Statistics, v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979.
- ROGERSON, P. A. “*Statistical methods for geography: a student’s guide*”. 5. ed. London: SAGE Publication Ltd., 2019
- WAKIGARI, S. A.; LECONTE, R. “*Exploring the utility of the downscaled SMAP soil moisture products in improving streamflow simulation*”. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 47, p. 101380, 2023.