EFEITO COMBINADO DA PRECIPITAÇÃO RECENTE E DA UMIDADE ANTECEDENTE DO SOLO SOBRE A RESPOSTA HIDROLÓGICA: ANÁLISE DA DEFASAGEM TEMPORAL E DA MAGNITUDE DA VAZÃO

Josiane Leci Vanin Barbieri [1]; Guilherme Garcia de Oliveira [2]& Juliana Carolino Reis [3]

Palavras-Chave – Relação chuva-vazão, Sensoriamento remoto, Modelagem hidrológica.

INTRODUÇÃO

Eventos hidrológicos extremos causam impactos crescentes em bacias hidrográficas, impulsionados pela ocorrência de chuvas intensas sobre solos previamente úmidos. Nessas situações, a magnitude e a velocidade da resposta da vazão dependem diretamente da condição antecedente de armazenamento hídrico no solo, que controla os processos de infiltração, tempo de propagação e geração de escoamento (Manoj *et al.*, 2023; Meißl *et al.*, 2023; Rong *et al.*, 2024). Embora a precipitação seja a variável central em sistemas de alerta de cheias, sua análise isolada limita a compreensão da dinâmica chuva–vazão. Por esse motivo, incorporar a umidade do solo em modelos de monitoramento aprimora a previsibilidade sob condições de saturação antecedente (Piadeh, Behzadian e Alani, 2021; Webb *et al.*, 2025). Diante dessa realidade, o produto SMAP Level 4 Soil Moisture surge como uma ferramenta de análise interessante ao combinar observações por micro-ondas e assimilação numérica, fornecendo dados de umidade do solo a cada 3 h com resolução de 9 km (Reichle *et al.*, 2019; NASA/JPL, 2026; Dashtian *et al.*, 2024; Ortenzi *et al.*, 2025).

Essa integração física depende do mapeamento preciso das áreas contribuintes, frequentemente derivado de modelos digitais de elevação como o Copernicus DEM GLO-30, cuja escolha influencia diretamente a representação das redes de drenagem (Copernicus, 2026; Moges *et al.*, 2023). Neste contexto, este estudo propõe uma metodologia automatizada para integrar a precipitação horária, a umidade do solo pelo SMAP L4 Root Zone e a vazão observada, tendo como estudo de caso o evento extremo de abril-maio de 2024 na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas. O objetivo é identificar o acumulado de precipitação que melhor explica a resposta hidrológica, estimar a defasagem temporal entre a precipitação e escoamento, avaliar o ganho explicativo gerado pela umidade antecedente e verificar a consistência dessas relações entre diferentes exutórios.

METODOLOGIA

A metodologia proposta consistiu em um fluxo automatizado para integrar umidade antecedente do solo, precipitação e vazão, visando identificar a chuva crítica, o tempo de resposta hidrológica e a contribuição da umidade da zona radicular (SMAP L4 Root Zone) para a explicação da resposta hidrológica em sub-bacias da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas no evento extremos de abril-maio/2024 (Figura 1). Os dados de precipitação e vazão foram extraídos do HidroWeb, Agência Nacional de Águas.

Para cada exutório foram realizadas duas análises independentes de correlação utilizando o coeficiente de Spearman (ρs), sempre adotando a vazão observada como variável resposta. Na primeira análise, foram correlacionados os acumulados móveis de precipitação (3 a 24 h) com a vazão, considerando diferentes defasagens temporais entre a ocorrência da chuva e a resposta hidrológica. Na segunda análise, a umidade antecedente do solo estimada pelo produto SMAP L4

1) Doutoranda, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail josiane.barbieri@ufrgs.br
2) Professor Adjunto, Departamento Interdisciplinar, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail g.g.oliveira10@gmail.com
3) Mestre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail julianacarolinoreis@gmail.com

Root Zone foi correlacionada com a vazão, também considerando defasagens temporais entre 0 e 48 h. As combinações de janela temporal e defasagem que produziram o maior valor absoluto de ρs foram selecionadas para cada exutório, permitindo comparar o poder explicativo da precipitação e da umidade antecedente do solo sobre a geração do escoamento.



Figura 1. Fluxograma da metodologia: precipitação acumulada, umidade do solo antecedente controlando o tempo e a intensidade da resposta da vazão. Fonte: autoria própria.

RESULTADOS

No total 15 exutórios foram avaliados. Destes, apenas 3 apresentaram cobertura de vazão superior a 96% da série, elevado número de pares válidos (148) e variabilidade suficiente da vazão. Os demais foram automaticamente descartados devido à baixa cobertura temporal ou à reduzida variabilidade das séries, impossibilitando a obtenção de correlações estatisticamente representativas.

Em todos os exutórios aprovados, a magnitude absoluta do coeficiente de Spearman obtido para a umidade antecedente do solo foi superior à observada para a precipitação acumulada isoladamente (Tabela 1), deixando claro que a condição antecedente de umidade constitui um fator de controle adicional sobre a geração do escoamento.

Tabela 1 – Síntese dos principais resultados da relação entre precipitação acumulada, umidade antecedente do solo estimada pelo SMAP L4 (Root Zone) e resposta hidrológica nos exutórios da Bacia do Taquari-Antas.

Exutório	Área (km²)	Chuva crítica	Lag chuva →Q	ρs chuva →Q	Lag SMAP →Q	ρs SMAP →Q	N pares válidos	Cobertura da vazão	|ρs SMAP| > |ρs chuva|
PCH Sta. Carolina Jusante	1.128	21 h	48 h	0,27	36 h	-0,41	148	96,73%	Sim
PCH Jardim Jusante	1.056	6 h	12 h	0,34	36 h	-0,40	148	96,73%	Sim
Muçum	15.392	9 h	15 h	0,37	48 h	-0,58	148	96,73%	Sim

* ρs – coeficiente de correlação de Spearman entre as variáveis analisadas (precipitação acumulada e vazão).

A resposta hidrológica variou entre as sub-bacias analisadas, evidenciando que uma única janela temporal de precipitação não representa adequadamente toda a bacia, em concordância com Berghuijs *et al.* (2022). A PCH Jardim jusante apresentou maior associação com o acumulado de 6 h e tempo de resposta de 12 h, Muçum respondeu melhor ao acumulado de 9 h, com lag de 15 h, enquanto a PCH Santa Carolina jusante apresentou maior associação com o acumulado de 21 h e tempo de resposta de 48 h. Além disso, a umidade do solo estimada pelo SMAP L4 apresentou correlações de

maior magnitude absoluta que a precipitação isolada, indicando a influência das condições antecedentes na resposta hidrológica, conforme discutido por Rong *et al.* (2024) e Ortenzi *et al.* (2025).

No exutório de Muçum (Figura 2), o acumulado de precipitação em 9 h apresentou a maior associação com a resposta hidrológica (ρs = 0,372), com tempo de resposta da chuva crítica de 15 h até o pico de vazão, evidenciando o papel das chuvas concentradas no escoamento. O aumento progressivo da umidade do solo antecedeu o pico de vazão, indicando o armazenamento hídrico como fator complementar à precipitação. Os resultados também sugerem que a resposta hidrológica resulta da interação entre características fisiográficas, distribuição espacial da chuva e condição antecedente de umidade do solo, não sendo explicada por uma única variável (Rong *et al.*, 2024; Ortenzi *et al.*, 2025; Reichle *et al.*, 2019).

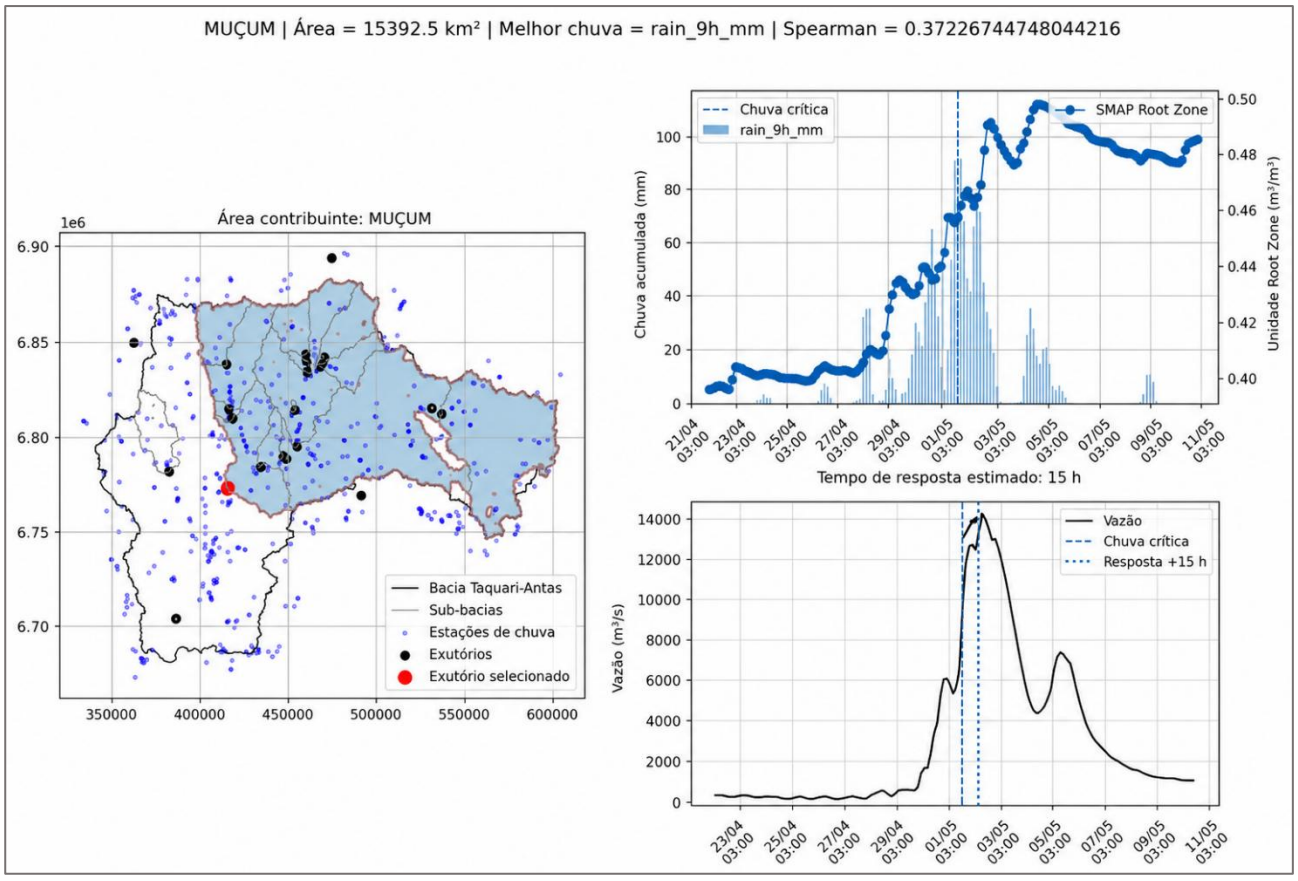


Figura 2. Mapa da sub-bacia contribuinte do exutório Muçum, destacando sua área de drenagem e a distribuição das estações pluviométricas utilizadas no estudo. Série temporal da chuva acumulada crítica (9 h) juntamente com a umidade do solo. Hidrograma observado no exutório, indicando o instante da chuva crítica e o tempo de resposta hidrológica estimado (15 h). Fonte: autoria própria.

CONCLUSÕES

O algoritmo, ao integrar automaticamente dados de precipitação, umidade do solo e vazão, permitiu avaliar a resposta hidrológica em diferentes janelas críticas de precipitação (6, 9 e 21 h), evidenciando que o tempo de integração da chuva varia entre as sub-bacias. Os tempos de resposta entre chuva e vazão variaram de 12 a 48 h, refletindo diferenças nas características hidrológicas das áreas contribuintes.

A umidade antecedente do solo aumentou a capacidade de explicar a resposta hidrológica em comparação ao uso isolado da precipitação. Os resultados indicam que a resposta hidrológica depende da interação entre a chuva antecedente e a umidade do solo, e não apenas da magnitude da

precipitação. A principal limitação está na disponibilidade das séries hidrológicas e na resolução temporal do produto SMAP L4.

A metodologia automatizada com controle de seleção de exutórios com séries confiáveis, é adequada para apoiar o monitoramento hidrológico, sistemas de alerta e futuras aplicações em outras bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS

BERGHUIJS, W. R.; LUIJENDIJK, E.; MOECK, C.; VELDE, Y.; ALLEN, S. T. (2022). *"Global Recharge Data Set Indicates Strengthened Groundwater Connection to Surface Fluxes"*. Geophysical Research Letters. v. 49.

COPERNICUS DEM - Global and European Digital Elevation Model. (2026).

DASHTIAN, H.; YOUNG, M. H.; YOUNG, B. E.; MCKINNEY, T.; RATEB, A. M.; NIYOGI, D.; KUMAR, S. V. (2024). "*A framework to nowcast soil moisture with NASA SMAP level 4 data using in-situ measurements and deep learning*". Journal of Hydrology: Regional Studies. v. 56, p. 102020.

MANOJ, J. A.; CIRIA, T. P.; CHIOGNA, G.; SALZMANN, N.; AGARWAL, A. (2023). *"Characterising the coincidence of soil moisture – precipitation extremes as a possible precursor to European floods"*. Journal of Hydrology, v. 620, p. 129445.

MEIßL, G.; KLEBINDER, K.; ZIEHER, T.; LECHNER, V.; KOHL, B.; MARKART, G. (2023). *"Influence of antecedent soil moisture content and land use on the surface runoff response to heavy rainfall simulation experiments investigated in Alpine catchments"*. Heliyon. v. 9(8):e18597.

MOGES, D. M.; VIRRO, H.; KMOCH, A.; CIBIN, R.; ROHITH, A. N.; SALVADOR, A. M.; CONESA-GARCÍA, C.; UUEMAA, E. (2023). *"How does the choice of DEMs affect catchment hydrological modeling?"*. Science of The Total Environment. v.892, p. 164627.

NASA/JPL - SMAP Soil Moisture Active Passive. Data Products. (2026).

ORTENZI, S.; MASSARI, C.; CIABATTA, L.; CENCETTI, C.; DIONIGI, M.; MARCHESINI, I.; STELLUTI, M.; DI MATTEO, L. (2025). *"Leveraging SMAP-Based Soil Moisture to Identify Runoff Thresholds on Flash Flood–Prone Basins in the Mediterranean Region"*. Journal of Hydrometeorology. v. 26, p. 975-990.

PIADEH, F.; BEHZADIAN, K.; ALANI, A. M. (2022). *"A critical review of real-time modelling of flood forecasting in urban drainage systems"*. Journal of Hydrology, v. 607, p. 127476.

REICHLE, R. H.; LIU, Q.; KOSTER, R. D.; CROW, W. T.; DE LANNOY, G. J. M.; KIMBALL, J. S.; ARDIZZONE, J. V.; BOSCH, D.; COLLIANDER, A.; COSH, M.; KOLASSA, J.; MAHANAMA, S. P.; PRUEGER, J.; STARKS, P.; WALKER, J. P. (2019). *"Version 4 of the SMAP Level-4 Soil Moisture Algorithm and Data Product"*. Journal of Advances in Modeling Earth Systems. v.11, p. 3106-3340.

RONG, Y.; BATES, P.; NEAL, J.; ARCHER, L.; HATCHARD, S.; KENDON, E. (2024). *"Impact of Soil Moisture Dynamics and Precipitation Pattern on UK Urban Pluvial Flood Hazards Under Climate Change"*. Earth's Future, v. 12.

WEBB, M. J.; ALBANO, C. M.; HARPOLD, A. A.; WAGNER, D. M.; WILSON, A. M. (2025). *"Wet Antecedent Soil Moisture Increases Atmospheric River Streamflow Magnitudes Nonlinearly"*. Journal of Hydrometeorology. v. 26, p. 741-758.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), Termo de outorga: 24/2551-0002124-8.