

ATRIBUIÇÃO HIDROLÓGICA BASEADA NA ABORDAGEM DE BUDYKO: SEPARAÇÃO ENTRE CONTROLES CLIMÁTICOS E ANTRÓPICOS EM UMA BACIA TROPICAL.

Rafael Henrique Hordones; Ivo Najm Neto; Emerson Ribeiro

RESUMO – A compreensão dos fatores que controlam a variabilidade da vazão é fundamental para a gestão de recursos hídricos em sistemas sujeitos à variabilidade climática e pressões antrópicas. Este estudo avaliou a contribuição relativa de fatores climáticos e não climáticos na bacia do rio das Mortes (MG), utilizando a abordagem de Budyko. Foram empregados dados públicos de precipitação, evapotranspiração potencial e vazão para o período de 2004 a 2024, permitindo a estimativa da vazão sob controle climático (Q_{clim}) e sua comparação com a vazão observada. A partir disso, a variação total foi decomposta em componentes climática (ΔQ_{clim}) e residual (ΔQ_{hum}). Adicionalmente, analisaram-se mudanças no uso do solo com base no MapBiomass. Os resultados indicaram que 72% da redução da vazão foi explicada pelo clima, enquanto 28% corresponderam à componente residual. Não foi observada relação significativa entre ΔQ_{hum} e o uso do solo, cujas mudanças foram de baixa magnitude e não coincidiram com os períodos de maior desvio hidrológico. Esses resultados indicam que a dinâmica da vazão não é explicada por relações lineares simples, sendo modulada por múltiplos processos não climáticos. A abordagem mostrou-se útil como ferramenta de diagnóstico hidrológico baseada em dados públicos

Palavras-Chave – Budyko; vazão; atribuição hidrológica

ABSTRACT– Understanding the factors controlling streamflow variability is essential for water resources management in systems subject to climatic variability and anthropogenic pressures. This study evaluated the relative contribution of climatic and non-climatic factors in the Rio das Mortes basin (MG, Brazil) using the Budyko framework. Public datasets of precipitation, potential evapotranspiration, and streamflow were used for the period 2004–2024, allowing the estimation of climate-driven streamflow (Q_{clim}) and its comparison with observed values. The total variation was then decomposed into climatic (ΔQ_{clim}) and residual (ΔQ_{hum}) components. Additionally, land use changes were analyzed based on MapBiomass data. Results indicated that 72% of the streamflow reduction was explained by climatic factors, while 28% corresponded to the residual component. No significant relationship was found between ΔQ_{hum} and land use changes, which were of low magnitude and did not coincide with periods of greatest hydrological deviation. These findings suggest that streamflow dynamics cannot be explained by simple linear relationships, being influenced by multiple non-climatic processes. The approach proved to be a useful hydrological diagnostic tool based on publicly available data.

Key-words – Budyko; streamflow variability; hydrological attribution

INTRODUÇÃO

As mudanças no regime hidrológico decorrem da interação temporal e espacial entre a variabilidade climática e as transformações no uso da terra (Kundzewicz et al., 2007; Foley et al., 2005). No sudeste do Brasil, a expansão agropecuária e a urbanização intensificaram esse processo, alterando a infiltração, a evapotranspiração e o escoamento, com impactos diretos na disponibilidade hídrica (Tucci, 2002; Costa et al., 2003). Distinguir as contribuições climáticas e antrópicas sobre a vazão é crucial para entender essas mudanças, especialmente em áreas urbanas e periurbanas, onde a impermeabilização e as alterações na drenagem podem agravar eventos extremos (Jiménez Cisneros et al., 2014).

A teoria de Budyko é amplamente utilizada para quantificar essas contribuições em longo prazo (Budyko, 1974; Zhang et al., 2001). Contudo, o método apresenta limitações: os efeitos climáticos e de uso do solo não são totalmente independentes, e o parâmetro representativo da bacia integra múltiplos processos, limitando sua interpretação mecanística direta (Piao et al., 2010; IPCC, 2021; Wang & Hejazi, 2011; Wang et al., 2016).

Em bacias tropicais brasileiras marcadas por forte sazonalidade e solos profundos, ainda há lacunas na aplicação dessa teoria. Nesses cenários, métodos simplificados baseados em dados públicos surgem como alternativas consistentes para estimar os controles do sistema (Budyko, 1974; Roderick & Farquhar, 2011). A bacia do rio das Mortes (MG) destaca-se como um caso relevante por apresentar dados hidrometeorológicos disponíveis, ausência de grandes regulações artificiais e histórico de mudanças no uso do solo.

Embora a bacia do rio das Mortes apresente predominância de usos agropecuários, ela engloba importantes centros urbanos, como São João del-Rei e Barbacena, cuja segurança hídrica depende diretamente da disponibilidade de água na bacia. Nesse contexto, compreender se as alterações de vazão decorrem predominantemente da variabilidade climática ou de mudanças antrópicas constitui informação relevante para o planejamento urbano, a gestão dos recursos hídricos e a definição de estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

Assim, este estudo tem como objetivo quantificar a contribuição relativa da variabilidade climática e das alterações antrópicas nas variações de vazão da bacia do rio das Mortes (MG), utilizando uma abordagem simplificada baseada na teoria de Budyko para fins de diagnóstico hidrológico.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio das Mortes integra a bacia do rio Grande, localiza-se na mesorregião do Campo das Vertentes (MG) e abrange cerca de 10.500 km², englobando municípios como São João del-Rei, Barbacena e Tiradentes (Fig. 1). O clima é tropical de altitude, com precipitação média anual de 1.400 a 1.600 mm e sazonalidade marcante, dividida entre uma estação chuvosa (outubro a abril) e outra seca (maio a setembro) (Alvares et al., 2013). A região constitui uma zona de transição ambientalmente heterogênea entre o Cerrado e a Mata Atlântica.

O relevo varia de ondulado a montanhoso, com altitudes de 800 a 1.400 m, sendo a infiltração e o armazenamento hídrico condicionados pelo predomínio de latossolos e cambissolos (IBGE, 2019). A paisagem apresenta um gradiente de uso do solo dominado por atividades agropecuárias e expansão urbana. Por fim, a ausência de grandes reservatórios permite que a vazão reflita diretamente a interação entre o clima e a bacia, tornando a área ideal para estudos de atribuição hidrológica.

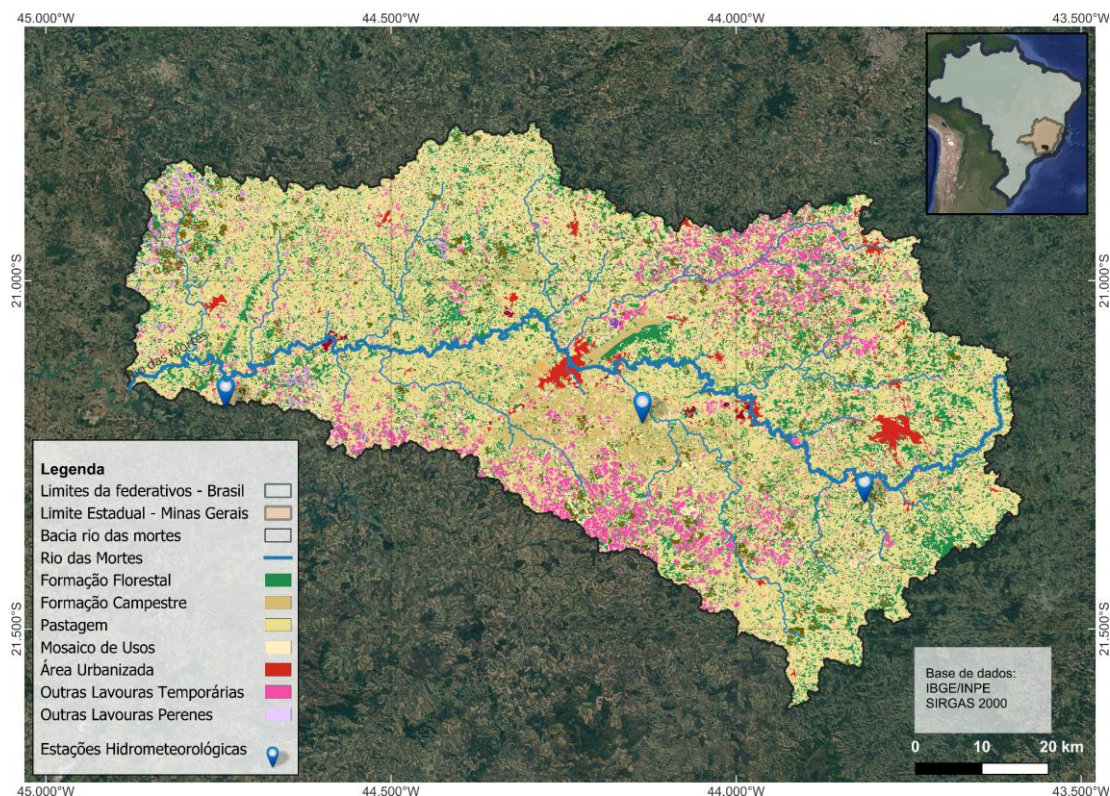


Figura 1. O mapa mostra onde fica a bacia do rio das Mortes (MG) e a área estudada no sudeste do Brasil. O rio das mortes está destacado em azul..

MÉTODOS

Dados e fontes

O estudo foi desenvolvido com base em dados públicos hidrometeorológicos e de uso e cobertura da terra. As séries de precipitação (P) e vazão (Q) foram obtidas no sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA), sendo selecionadas estações com séries longas e baixa porcentagem de falhas.

A evapotranspiração potencial (PET), definida como a quantidade máxima de água que poderia ser transferida da superfície para a atmosfera caso houvesse disponibilidade ilimitada de água, foi obtida a partir do produto TerraClimate, com dados mensais agregados para escala anual (Abatzoglou et al., 2018). As informações de uso e cobertura da terra foram extraídas do MapBiomas, considerando séries anuais no período de 2004 a 2024.

As séries foram agregadas em escala anual, assumindo condição de equilíbrio de longo prazo ($\Delta S \approx 0$), conforme a abordagem de Budyko. A vazão foi convertida de $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ para mm ano^{-1} , garantindo consistência com as variáveis climáticas.

A identificação de mudanças no regime hidrológico foi realizada por meio do teste de Pettitt, enquanto o teste de Mann-Kendall foi aplicado para avaliar tendências monotônicas, adotando nível de significância de 5%.

Aplicação da teoria de Budyko

A hipótese de Budyko estabelece que, em condições de equilíbrio hidrológico de longo prazo, a partição da precipitação entre evapotranspiração e vazão depende principalmente do balanço entre disponibilidade de água (precipitação) e disponibilidade de energia para evaporação (evapotranspiração potencial). Essa relação é representada por curvas empíricas que descrevem o comportamento hidrológico médio das bacias hidrográficas. A análise baseia-se na relação entre índice de aridez ($AI = PET/P$) e razão evaporativa (ET/P), conforme a hipótese de Budyko (Budyko, 1974; Zhang et al., 2001). A curva foi ajustada por parametrização do tipo Fu, com estimativa do parâmetro ω por regressão não linear (Fu, 2005).

A função de Fu introduz o parâmetro adimensional de bacia (ω), que funciona como um fator de ajuste para identificar a heterogeneidade espacial e as propriedades biofísicas específicas da área de estudo que desviam a bacia da curva teórica ideal de Budyko. Matematicamente, a equação de Fu é expressa por:

$$\frac{ET}{P} = 1 + \frac{PET}{P} - \left[1 + \left(\frac{PET}{P} \right)^\omega \right]^{\frac{1}{\omega}}$$

Onde o parâmetro ω sintetiza a influência combinada de múltiplos fatores não-climáticos de longo prazo, tais como as propriedades físicas e hidráulicas do solo (capacidade de infiltração e retenção), a declividade do relevo e as características da cobertura vegetal. Valores maiores de ω indicam uma bacia com maior eficiência em reter água e transformá-la em evapotranspiração, enquanto valores menores sugerem um sistema que favorece a geração de escoamento.

Método de atribuição

A variação da vazão foi decomposta em componentes climática e não climática:

$$\Delta Q = \Delta Q_{clim} + \Delta Q_{hum}$$

A vazão sob controle climático (Q_{clim}) foi estimada a partir da curva de Budyko ajustada, sendo ΔQ_{clim} associado às variações em P e PET, e ΔQ_{hum} obtido como termo residual.

O método de atribuição baseia-se na premissa de decomposição elástica ou por diferenciação total da curva. A componente ΔQ_{clim} isola o impacto da variabilidade do clima (flutuações de chuva e temperatura/demanda evaporativa) ao calcular a mudança na vazão mantendo o parâmetro estrutural da bacia (ω) fixo no valor do período inicial de referência. Por outro lado, a componente humana ou antrópica (ΔQ_{hum}) absorve as mudanças que alteram diretamente a trajetória física da bacia no espaço de Budyko, sendo quantificada a partir do deslocamento vertical entre as curvas ajustadas para os diferentes períodos (Wang & Hejazi, 2011).

As mudanças no uso do solo foram analisadas com base em dados do MapBiomas, considerando classes agregadas e anos representativos (2004, 2014 e 2024). A componente ΔQ_{hum} foi interpretada como indicador integrado de processos não climáticos, não sendo atribuída diretamente a impactos antrópicos isolados.

RESULTADOS

Dinâmica da vazão e mudança de regime

A série temporal da vazão anual evidenciou alteração significativa no regime hidrológico da bacia ao longo do período analisado (Fig. 2). Entre 2004 e 2012, as vazões apresentaram valores mais elevados e relativamente estáveis, frequentemente acima de 500 mm, com pico próximo a 700 mm por volta de 2010. A partir de 2013, identificado como ponto de mudança pelo teste de Pettitt, observa-se redução acentuada, com valores entre 200 e 300 mm até aproximadamente 2018, seguida de recuperação parcial nos anos mais recentes. Esse padrão indica uma ruptura no comportamento hidrológico da bacia.

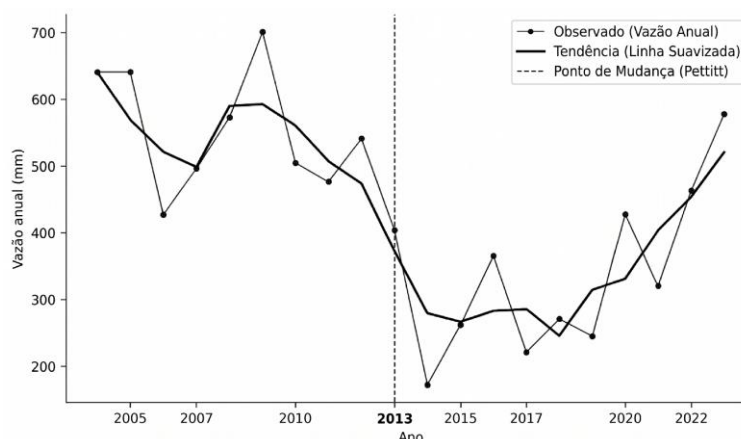


FIGURA 2: Série temporal da vazão anual da bacia do rio das Mortes no período de 2004 a 2023.

Relação climática e comportamento hidrológico

O diagrama de Budyko mostrou que os dados anuais se distribuíram próximos à curva teórica ($\omega \approx 3,81$), indicando predominância do controle climático sobre o balanço hídrico (Fig. 3). O índice de aridez (PET/P) variou entre aproximadamente 0,60 e 0,98, enquanto a razão evaporativa (ET/P) situou-se entre 0,62 e 0,83.

Apesar do alinhamento geral, observou-se dispersão dos pontos, especialmente em valores intermediários de aridez ($AI \approx 0,8-1,0$). Após 2013, os dados apresentaram leve deslocamento para maiores valores de ET/P sob condições similares de aridez, sugerindo alteração no regime hidrológico.

A decomposição da variação da vazão indicou redução total de $-159,94 \text{ mm ano}^{-1}$, sendo aproximadamente 72% atribuída a fatores climáticos ($-115,28 \text{ mm ano}^{-1}$) e 28% a componentes não climáticos ($-44,66 \text{ mm ano}^{-1}$).

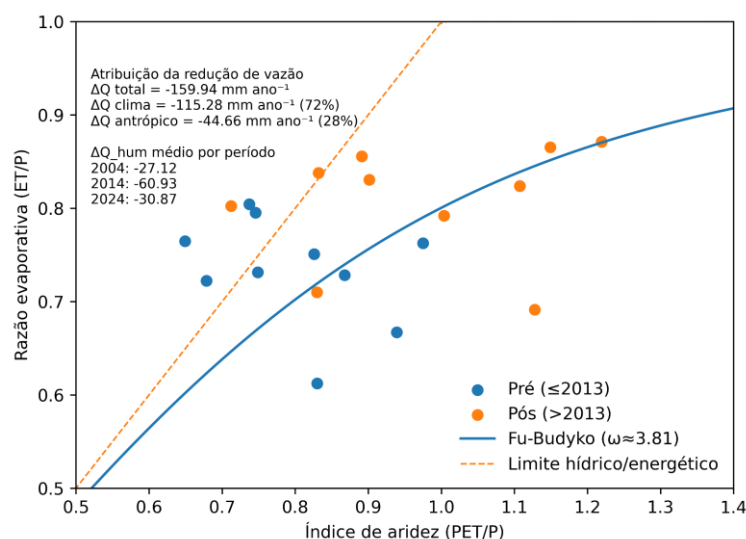


FIGURA 3: Diagrama de Budyko da bacia do rio das Mortes (2003–2023)

5.3 Dinâmica da componente ΔQ_{hum}

A componente ΔQ_{hum} apresentou valores predominantemente negativos, com média de $-38,03 \text{ mm ano}^{-1}$ e elevada variabilidade interanual, variando entre $-264,34 \text{ mm ano}^{-1}$ e $+284,05 \text{ mm ano}^{-1}$.

A análise temporal indicou comportamento não linear, com intensificação do desvio hidrológico até 2014 ($-60,93 \text{ mm ano}^{-1}$), seguida de recuperação parcial até 2023 ($-30,87 \text{ mm ano}^{-1}$) (Fig. 4). O teste de Mann-Kendall não indicou tendência monotônica significativa ($p > 0,05$).

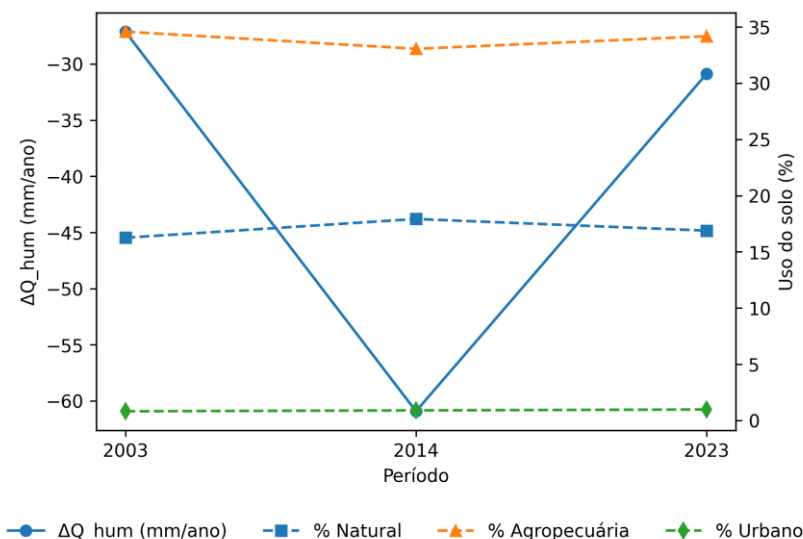


Figura 4. Variação da componente ΔQ_{hum} e das principais classes de uso do solo ao longo dos períodos.

5.4 Mudanças no uso do solo

As principais classes de uso do solo apresentaram variações de baixa magnitude ao longo do período. A vegetação natural variou entre 16,25% e 17,92%, a área agropecuária entre 33,06% e 34,59%, e a área urbana aumentou de 0,81% para 0,97%.

Tabela 1. Distribuição percentual das classes de uso e cobertura do solo na bacia do rio das Mortes.

Land use class	2004 (%)	2014 (%)	2024 (%)	Δ % (2004–2024)
Forest vegetation	11	10.8	8.92	-18.90%
Grassland	5.25	7.12	7.96	51.6
Pasture	21.42	22.21	26.21	22.4
Agriculture	4.47	2.16	1.36	-69.60%
Mosaic of uses	8.7	8.69	6.61	-24.00%
Urban area	0.81	0.89	0.97	19.8
Other	0.23	0.2	0.19	-17.40%
Water bodies	0.11	0.1	0.14	27.3

5.5 Integração entre ΔQ_{hum} e uso do solo

A comparação entre ΔQ_{hum} e as mudanças no uso do solo não evidenciou relação significativa entre as variáveis ($p > 0,05$). O maior desvio hidrológico ocorreu em 2014, sem coincidência com alterações expressivas na cobertura da terra, indicando desacoplamento entre a dinâmica da paisagem e a resposta hidrológica.

DISCUSSÃO

Os resultados indicam que a variabilidade da vazão na bacia do rio das Mortes é controlada majoritariamente por fatores climáticos, que respondem por cerca de 72% da redução observada. O padrão alinha-se à literatura, que aponta o clima como principal forçante hidrológica anual em regiões tropicais

sazonais (Zhang et al., 2001; Gudmundsson et al., 2019), evidenciando a sensibilidade do sistema às flutuações de precipitação e evapotranspiração potencial.

A componente residual (ΔQ_{hum}), embora menor ($\approx 28\%$), apresentou valores predominantemente negativos e forte variação interanual. Isso mostra que a vazão real foi inferior à esperada sob controle climático, sugerindo maior evapotranspiração real ou retenção de água por processos não modelados. Assim, o resíduo deve ser interpretado como um integrador de múltiplos processos físicos e antrópicos, e não como impacto humano isolado (Wang et al., 2016; Greve et al., 2016).

A análise não revelou correspondência direta entre o uso do solo e a variabilidade residual. As mudanças na cobertura da terra foram pequenas e não coincidiram com o maior desvio hidrológico (2014). Esse desacoplamento indica que a resposta hidrológica não segue relações lineares simples, sendo modulada por interações complexas entre clima, propriedades do solo, armazenamento e conectividade da bacia (Berghuijs et al., 2014; Peel & Blöschl, 2011).

Esse comportamento reforça o conceito da bacia como um sistema sociohidrológico, onde fatores naturais e antrópicos atuam de forma interdependente e não linear (Sivapalan et al., 2012; Blair & Buytaert, 2016). A ausência de relação direta com o uso do solo não anula a influência humana, mas destaca controles indiretos, heterogeneidade espacial e efeitos de memória do sistema.

Do ponto de vista aplicado, intervenções focadas apenas no manejo da terra têm efeito limitado na vazão anual em sistemas dominados pelo clima. Em contextos urbano-periurbanos, os dados reforçam a necessidade de abordagens integradas que combinem a variabilidade climática ao planejamento territorial, utilizando soluções baseadas na natureza para elevar a resiliência hidrológica.

LIMITAÇÕES

A abordagem baseada na teoria de Budyko apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. O método assume condição de equilíbrio hidrológico de longo prazo ($\Delta S \approx 0$), o que pode não ser plenamente atendido em bacias tropicais com alta variabilidade interanual e ocorrência de eventos extremos (Budyko, 1974; Zhang et al., 2001; Melo et al., 2024).

O parâmetro ω representa um integrador de múltiplos processos, incluindo características do solo, vegetação e interações clima-superfície, o que limita sua interpretação mecanística direta (Wang et al., 2016). Dessa forma, a componente ΔQ_{hum} deve ser entendida como um indicador integrado de alterações no sistema hidrológico, não sendo possível atribuí-la a processos específicos.

Adicionalmente, a análise em escala anual implica simplificações relevantes em regiões tropicais, onde a sazonalidade pode gerar dinâmicas intra-anuais não capturadas pelo modelo (Ji et al., 2021). Ainda assim, a abordagem se mostra adequada como ferramenta de primeira ordem para diagnóstico hidrológico em contextos com disponibilidade limitada de dados.

CONCLUSÃO

A aplicação da abordagem de Budyko permitiu quantificar a contribuição relativa de fatores climáticos e não climáticos na dinâmica da vazão da bacia do rio das Mortes, evidenciando a predominância do controle climático, responsável por aproximadamente 72% da redução observada.

A componente residual (ΔQ_{hum}), embora secundária, apresentou elevada variabilidade e ausência de relação direta com o uso do solo, indicando que a resposta hidrológica não pode ser explicada por relações lineares simples. Esse padrão reforça a interpretação da bacia como um sistema complexo, no qual múltiplos processos atuam de forma integrada e não linear.

Do ponto de vista aplicado, os resultados indicam que intervenções baseadas exclusivamente no uso do solo tendem a ter efeito limitado sobre a vazão em escala anual, destacando a importância de abordagens integradas que considerem a variabilidade climática e o funcionamento hidrológico da bacia.

Adicionalmente, o uso de dados públicos mostrou-se uma vantagem relevante, permitindo a aplicação da abordagem com baixo custo e alta reprodutibilidade, ampliando seu potencial como ferramenta de diagnóstico hidrológico.

REFERÊNCIAS

ABATZOGLOU, J.T.; DOBROWSKI, S.Z.; PARKS, S.A.; HEGEWISCH, K.C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5, 170191.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), pp. 711–728.

BLAIR, P.; BUYTAERT, W. (2016). Socio-hydrological modelling: A review. *Earth-Science Reviews*, 162, pp. 84–100.

BUDYKO, M.I. (1974). *Climate and Life*. Academic Press.

COSTA, M.H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J.A. (2003). Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River. *Journal of Hydrology*, 283, pp. 206–217.

FOLEY, J.A.; DEFRIES, R.; ASNER, G.P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S.R. et al. (2005). Global consequences of land use. *Science*, 309, pp. 570–574.

GREVE, P.; GUDMUNDSSON, L.; SENEVIRATNE, S.I. (2016). Regional scaling of annual mean precipitation and water balance. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, pp. 1077–1090.

IBGE (2019). *Manual técnico de pedologia*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

JI, X. et al. (2021). Seasonal hydrological processes in tropical basins. *Journal of Hydrology*, 603, 126879.

JIMÉNEZ CISNEROS, B.E. et al. (2014). Freshwater resources. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. IPCC.

KUNDZEWICZ, Z.W. et al. (2007). Freshwater resources and their management. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC.

MAPBIOMAS (2024). Projeto MapBiomass – Coleção mais recente.

MELO, D.C.D. et al. (2024). Hydrological impacts of drought in tropical basins. *Hydrological Processes*.

PEEL, M.C.; BLÖSCHL, G. (2011). Hydrological modelling in a changing world. *Hydrological Processes*, 25, pp. 192–202.

PIAO, S. et al. (2010). The impacts of climate change on water resources. *Nature*, 467, pp. 43–51.

RODERICK, M.L.; FARQUHAR, G.D. (2011). A simple framework for relating variations in runoff. *Water Resources Research*, 47, W00G07.

SIVAPALAN, M.; SAVENIJE, H.H.G.; BLÖSCHL, G. (2012). Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, pp. 1273–1296.

WANG, D.; HEJAZI, M. (2011). Quantifying the relative contribution of climate and human impacts. *Journal of Hydrology*, 404, pp. 127–137.

WANG, D.; TANG, Y.; HEJAZI, M. (2016). Climate and human contributions to streamflow change. *Journal of Hydrology*, 540, pp. 243–252.

ZHANG, L.; DAWES, W.R.; WALKER, G.R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, 37, pp. 701–708.