Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

ÍNDICE DE CONECTIVIDADE HIDROLÓGICA FUNCIONAL (ICHF) E EFEITOS DE ESCALA NA DETECÇÃO DE IMPACTOS HIDROAMBIENTAIS: APLICAÇÃO NA BACIA DO RIO DOCE

Functional hydrological connectivity index (FHCI) and scale effects on the detection of hydro-environmental impacts: application to the Doce river basin

Índice de conectividad hidrológica funcional (ICHF) y efectos de escala en la detección de impactos hidroambientales: aplicación en la cuenca del río Doce

Édson Avelar Guimarães
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Macaé, RJ, Brasil
edsonavelar@gmail.com

Maurício Mussi Molisani
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Macaé, RJ, Brasil
molisanimm@yahoo.com.br

Resumo: A conectividade hidrológica constitui elemento fundamental para a compreensão do funcionamento integrado de bacias hidrográficas, especialmente em contextos sujeitos à variabilidade climática e a perturbações ambientais. Este estudo analisa a variabilidade hidroclimática da bacia hidrográfica do rio Doce com o objetivo de propor um Índice de Conectividade Hidrológica Funcional (ICHF), baseado na relação entre disponibilidade hídrica e resposta hidrológica, e avaliar a influência da escala na detecção de alterações ambientais. Parte-se da hipótese de que a variabilidade climática regional exerce controle predominante sobre o sistema hidrológico, reduzindo a capacidade de detecção de impactos localizados em métricas agregadas. Foram utilizados dados do sistema FLDAS referentes ao período de 2000 a 2024 para quatro sub-bacias distribuídas ao longo do gradiente

longitudinal da bacia. A metodologia integrou variáveis do balanço hídrico, indicadores hidrológicos derivados e análises estatísticas, incluindo os testes de Mann-Kendall, correlação cruzada e curva de massa dupla. Os resultados evidenciaram forte acoplamento funcional entre disponibilidade hídrica e geração de escoamento (R^2 entre 0,934 e 0,954), com valores de ICHF variando entre 0,154 e 0,222 e maiores níveis de conectividade funcional nas porções a montante. Não foram identificadas tendências estatisticamente significativas nas variáveis analisadas, embora tenham sido observados sinais consistentes de redução associados à variabilidade climática. A resposta hidrológica apresentou baixa defasagem temporal entre precipitação e escoamento. Conclui-se que o ICHF constitui uma ferramenta promissora para análises comparativas em grandes bacias hidrográficas e que a escala exerce papel decisivo na interpretação de impactos hidroambientais e da conectividade funcional.
Palavras-chave: Variabilidade hidroclimática. Resposta hidrológica. Efeitos de escala.

Abstract: Hydrological connectivity is a fundamental component for understanding the integrated functioning of river basins, particularly in environments affected by climate variability and environmental disturbances. This study analyzes the hydroclimatic variability of the Doce River Basin to propose a Functional Hydrological Connectivity Index (FHCI), based on the relationship between water availability and hydrological response, and to evaluate the influence of scale on the detection of environmental changes. The study is based on the hypothesis that regional climate variability exerts a dominant control over the hydrological system, limiting the detection of localized impacts through aggregated hydrological metrics. FLDAS data from 2000 to 2024 were used for four sub-basins distributed along the longitudinal gradient of the Doce River Basin. The methodology integrated water balance variables, derived hydrological indicators, and statistical analyses, including the Mann–Kendall test, cross-correlation analysis, and double mass curve assessment. Results revealed a strong functional coupling between water availability and runoff generation (R^2 ranging from 0.934 to 0.954), with FHCI values varying from 0.154 to 0.222 and higher levels of functional connectivity observed in upstream areas. No statistically significant trends were detected in the analyzed variables, although consistent signals of reduction associated with climate variability were observed. Hydrological response exhibited low temporal lag between precipitation and runoff generation. The findings indicate that FHCI is a promising tool for comparative analyses of large river basins and that scale plays a critical role in the interpretation of hydro-environmental impacts and functional hydrological connectivity.
Keywords: Hydroclimatic variability. Hydrological Response. Scale effects.

Resumen: La conectividad hidrológica constituye un elemento fundamental para comprender el funcionamiento integrado de las cuencas hidrográficas, especialmente en contextos sujetos a variabilidad climática y perturbaciones ambientales. Este estudio analiza la variabilidad hidroclimática de la cuenca hidrográfica del río Doce con el objetivo de proponer un Índice de Conectividad Hidrológica Funcional (ICHF), basado en la relación entre disponibilidad hídrica y respuesta hidrológica, así como evaluar la influencia de la escala en la detección de alteraciones ambientales. Se parte de la hipótesis de que la variabilidad climática regional ejerce un control predominante sobre el sistema hidrológico, limitando la detección de impactos localizados mediante métricas hidrológicas agregadas. Se utilizaron datos del sistema FLDAS correspondientes al período 2000–2024 para cuatro subcuencas distribuidas a lo largo del gradiente longitudinal de la cuenca del río Doce. La metodología integró variables del balance hídrico, indicadores hidrológicos derivados y análisis estadísticos, incluyendo la prueba de Mann-Kendall, el análisis de correlación cruzada y la curva de masa doble. Los resultados evidenciaron un fuerte acoplamiento funcional entre la disponibilidad hídrica y la generación de escorrentía (R^2 entre 0,934 y 0,954), con valores de ICHF entre 0,154 y 0,222 y mayores niveles de conectividad funcional en los sectores de cabecera. No se identificaron tendencias estadísticamente significativas en las variables analizadas, aunque se observaron señales consistentes de disminución

asociadas a la variabilidad climática. La respuesta hidrológica presentó baja desfase temporal entre precipitación y escorrentía. Se concluye que el ICHF constituye una herramienta prometedora para análisis comparativos en grandes cuencas hidrográficas y que la escala desempeña un papel decisivo en la interpretación de los impactos hidroambientales y de la conectividad hidrológica funcional.
Palabras clave: Variabilidad hidroclimática. Respuesta Hidrológica. Efectos de escala.

Submetido em: 05/06/2026
Aceito para publicação em: 25/08/2026
Publicado em: 15/11/2026

1. INTRODUÇÃO

A intensificação de eventos hidroclimáticos extremos, associada ao avanço das pressões antrópicas sobre os sistemas naturais, tem ampliado o interesse na compreensão dos processos hidrológicos em escala de bacia, especialmente no contexto das mudanças climáticas. Alterações na variabilidade climática, combinadas a transformações no uso e cobertura da terra, têm promovido modificações nos regimes hidrológicos, afetando a disponibilidade hídrica, o transporte de sedimentos e a integridade de sistemas aquáticos (IPCC, 2021; GUDMUNDSSON *et al*., 2021; LIU *et al*., 2024). Nesse cenário, a conectividade hidrológica tem se consolidado como um conceito central para a compreensão do funcionamento integrado das bacias hidrográficas, ao descrever o grau de acoplamento entre encostas, zonas ripárias e canais fluviais, controlando o transporte de água, sedimentos e solutos (BRACKEN *et al*., 2013; WOHL *et al*., 2019). Alterações nessa conectividade podem modificar significativamente a dinâmica de escoamento, armazenamento e transferência de massa ao longo da bacia (DWIVEDI et al., 2025). O avanço de sistemas de assimilação de dados, como o FLDAS (*Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System*), tem possibilitado novas abordagens para a análise hidroclimática em escala regional, especialmente em regiões com baixa densidade de dados observacionais. Esses sistemas integram informações de sensoriamento remoto e modelagem hidrológica, fornecendo variáveis fundamentais do balanço hídrico e permitindo a análise consistente de padrões espaço-temporais (McNALLY *et al.,* 2017; KUMAR *et al.,* 2022).

Paralelamente, desastres ambientais associados à atividade mineradora têm se destacado como importantes fontes de perturbação em sistemas hidroambientais. O rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em 2015 no município de Mariana (MG), representa um dos maiores desastres socioambientais do Brasil, com impactos significativos na geomorfologia fluvial, qualidade da água e dinâmica hidrossedimentológica (FERNANDES *et al*., 2016; CARMO *et al*., 2017; ROSA; MAGALHÃES Jr., 2024; VALLE *et al*., 2025). Embora diversos estudos tenham avaliado os impactos imediatos do rompimento da barragem de Fundão, análises em escala de bacia voltadas às respostas hidrológicas de médio e longo prazo ainda são limitadas, em grande parte pela necessidade de séries temporais extensas no período pós-evento.

Nesse contexto, séries mais longas permitem avaliar a persistência de possíveis alterações estruturais no sistema. No entanto, tais efeitos nem sempre são detectáveis em métricas agregadas, pois tendem a se concentrar ao longo da rede de drenagem. Assim, alterações estruturais podem não se refletir em variáveis médias, sendo mais evidentes na organização funcional e na dinâmica de resposta do sistema (DWIVEDI et al., 2025). Para a avaliação de mudanças em sistemas ambientais complexos e extensos, abordagens baseadas em desenhos quase-experimentais e monitoramento de longo prazo têm se mostrado fundamentais (STEWART-OATEN *et al*., 1986; UNDERWOOD, 1994). Neste estudo, adota-se uma abordagem comparativa e temporal fundamentada na análise de múltiplas sub-bacias distribuídas ao longo de um gradiente longitudinal, permitindo avaliar a evolução dos padrões espaciais e funcionais do sistema hidroclimático antes e após o evento de 2015. Essa estratégia metodológica prioriza a identificação de mudanças consistentes na organização hidrológica em escala regional, contornando as limitações de generalização impostas por análises pontuais e evitando o estabelecimento de relações causais diretas e lineares entre a perturbação e as respostas macro-hidrológicas observadas.

Diante desse contexto, este estudo propõe um modelo integrado para avaliar a variabilidade hidroclimática e a conectividade hidrológica na bacia do rio Doce, a partir da relação entre disponibilidade hídrica e resposta hidrológica. É proposto um índice de conectividade hidrológica funcional (ICHF), derivado dessa relação, com o objetivo de quantificar a eficiência do sistema na conversão de água disponível em escoamento ao longo de diferentes sub-bacias. Parte-se da hipótese de que a variabilidade climática regional constitui o principal fator de controle do sistema, de modo que perturbações localizadas não se traduzem necessariamente em alterações estruturais detectáveis em escala de sub-bacia, uma vez que processos hidrológicos observados localmente tendem a ser progressivamente integrados e suavizados em escalas espaciais maiores (SIVAPALAN, 2003; DWIVEDI et al., 2025). Adicionalmente, assume-se que diferenças entre sub-bacias refletem predominantemente sua posição ao longo do gradiente longitudinal e características estruturais, e que eventuais alterações são mais evidentes em métricas dinâmicas do que em indicadores médios agregados.

1.1 Área de Estudo

A área de estudo corresponde à Bacia Hidrográfica do Rio Doce, localizada na região Sudeste do Brasil, abrangendo os estados de Minas Gerais (≈86%) e Espírito Santo (≈14%), com área entre 84.000 e 86.700 km². Trata-se de uma bacia de elevada relevância socioambiental, devido à sua importância hídrica, econômica e ecológica. O clima predominante é tropical sazonal, com temperaturas médias entre 18 °C e 25 °C, estação chuvosa de novembro a abril (800–1300 mm) e estação seca de maio a outubro (150–250 mm), condicionando a dinâmica hidrológica regional (VALLE *et al*., 2025). A bacia foi diretamente impactada pelo rompimento da barragem de Fundão, liberando cerca de 44 milhões de m³ de rejeitos, inicialmente no rio Gualaxo do Norte, propagando-se pelos rios do Carmo e Doce até o Oceano Atlântico, afetando extensivamente a rede de drenagem (FELIPPE *et al*., 2016; SÁNCHEZ *et al*., 2018).

Para a análise, foram selecionadas quatro sub-bacias delimitadas a partir da base hidrográfica ottocodificada da ANA (BHO/ANA). A escolha considerou o gradiente longitudinal e diferentes condições de conectividade hidrológica, permitindo análise comparativa do comportamento hidroclimático. As unidades incluem: (i) sub-bacia 786 (alto rio Doce – 10.465 km²), adotada como referência por não sofrer influência direta do evento; (ii) sub-bacia 789 (rio Piranga – 17.986 km²), com conectividade intermediária; (iii) sub-bacia 782 (médio rio Doce – 8.842 km²), representando condição de transição; e (iv) sub-bacia 781 (baixo rio Doce – 11.081 km²), próxima à foz, potencialmente mais sensível aos efeitos propagados ao longo do sistema.

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do Rio Doce, com destaque para a rede de drenagem principal, sub-bacias e a localização da barragem de Fundão. As sub-bacias foram identificadas e denominadas, para fins de simplificação, como Alto, Médio, Baixo e Piranga, correspondendo, respectivamente, às unidades hidrológicas delimitadas pelo método de Ottobacias (nível 3).



Fonte: Autor (2026).

Essa configuração permite analisar a variabilidade hidroclimática ao longo de um gradiente contínuo, comparando sub-bacias com diferentes características estruturais. A abordagem evita relações causais diretas com o evento de 2015, priorizando a organização espacial e a dinâmica funcional em escala de bacia.

2 METODOLOGIA

2.1 Dados e estrutura temporal

Foram utilizados dados do sistema FLDAS, disponíveis gratuitamente (*https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni*), com resolução temporal mensal e resolução espacial de 0,1° (~10 km), abrangendo o período de 2000 a 2024. As variáveis selecionadas incluem precipitação (P), evapotranspiração (E), umidade do solo (U), escoamento superficial (Qs) e escoamento subsuperficial (Qsb), representando os principais componentes do balanço hídrico. Os dados foram obtidos em formato raster e processados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software ArcGIS, incluindo a conversão de unidades

e padronização espacial. Posteriormente, foram agregados para cada sub-bacia por meio de médias zonais, garantindo a representatividade hidrológica das unidades de análise. A série temporal foi organizada em janelas móveis de três anos, com o objetivo de reduzir a variabilidade interanual e evidenciar padrões de médio prazo. Foram definidos três períodos principais: pré-evento (2000–2014), transição (2015–2017) e pós-evento (2018–2024). O período de transição foi excluído das análises comparativas, sendo considerado um intervalo de ajuste do sistema.

2.2 Construção das variáveis hidrológicas e conectividade

A disponibilidade hídrica foi definida como:

$$X = P - E + U \quad (1)$$

Onde: P representa a precipitação (mm/mês), E a evapotranspiração (mm/mês) e U a umidade do solo (mm/mês), representando a água potencialmente disponível no sistema.

Neste estudo, a umidade do solo (U) é incorporada como um indicador das condições antecedentes de armazenamento hídrico, atuando como representação da memória hidrológica do sistema e de sua influência sobre os processos subsequentes de geração de escoamento. Sob a ótica da física hidrológica clássica, reconhece-se que a variável (X) não constitui um balanço hídrico conservativo em sentido estrito (ou fechamento de massa), uma vez que integra variáveis de fluxo acumulado (precipitação e evapotranspiração, expressas em mm/mês) com uma variável de estado do sistema (umidade integrada da coluna de solo, extraída em base mensal equivalente em mm). A inclusão de (U) na formulação possui caráter estritamente funcional e conceitual. Baseia-se no entendimento de que a resposta hidrológica (Y) em grandes bacias não é controlada apenas pelas entradas e saídas verticais do mês corrente, mas sim condicionada pela quantidade de água retida na matriz do solo no início do intervalo de análise, a qual dita o potencial de saturação e a partição do escoamento. Portanto, assume-se a variável (X) não como um somatório de massas independentes, mas como um índice adimensionalizado de disponibilidade potencial efetiva, mitigando o efeito de defasagens temporais intrínsecas ao armazenamento subterrâneo em análises agregadas

A resposta hidrológica foi definida como:

$$Y = Q_s + Q_{sb} \quad (2)$$

Onde: Qs corresponde ao escoamento superficial (mm/mês) e Qsb ao escoamento subsuperficial (mm/mês), representando a geração total de escoamento.

A partir dessas variáveis, foram definidos indicadores hidrológicos derivados, incluindo o coeficiente de escoamento:

$$C = \frac{Y}{P} \quad (3)$$

e o índice de baseflow:

$$BFI = \frac{Q_{sb}}{Y} \quad (4)$$

Esses indicadores permitem avaliar, respectivamente, a eficiência de conversão da disponibilidade hídrica em escoamento e a contribuição relativa do fluxo subsuperficial.

A conectividade hidrológica funcional foi estimada por meio de um índice proposto neste estudo, baseado na relação entre a disponibilidade hídrica (X) e a resposta hidrológica (Y):

$$Y = \beta X \quad (5)$$

O coeficiente angular (β) representa a eficiência do sistema em converter a água disponível em escoamento. Para permitir comparações entre sub-bacias, foi aplicada uma transformação angular:

$$ICHF = \frac{2}{\pi} \cdot \arctan(\beta) \quad (6)$$

onde ICHF corresponde a um índice adimensional de conectividade hidrológica, variando entre 0 e 1, sendo que valores mais elevados indicam maior conectividade funcional.

O índice proposto deve ser interpretado como uma medida de conectividade hidrológica funcional, expressando a eficiência com que a disponibilidade hídrica do sistema é convertida em resposta hidrológica. Diferentemente de métricas estruturais de conectividade, baseadas na configuração espacial dos caminhos de fluxo, da rede de

drenagem ou da transferência física de sedimentos e solutos, o ICHF representa uma propriedade emergente do comportamento hidrológico integrado da bacia. Dessa forma, o índice não quantifica diretamente a conectividade estrutural da paisagem, mas o grau de acoplamento funcional entre entrada hídrica e geração de escoamento em escala de sub-bacia.

2.3 Análises hidroclimáticas

A análise hidroclimática foi conduzida de forma integrada, considerando tanto a evolução temporal quanto a dinâmica de resposta e o regime hidrológico das sub-bacias. A evolução temporal das variáveis foi avaliada por meio do teste não paramétrico de Mann–Kendall, associado à estimativa da inclinação de Sen, permitindo identificar tendências monotônicas sem pressupor normalidade dos dados (COLLAUD COEN *et al*., 2020).

A dinâmica de resposta hidrológica foi investigada a partir da relação temporal entre precipitação (P) e escoamento total (Y), por meio da função de correlação cruzada (*Cross-Correlation Function* – CCF), com o objetivo de identificar possíveis defasagens entre entrada e resposta do sistema (BOX *et al*., 2015). Considerando a resolução mensal dos dados e sua agregação em janelas de três anos, essa análise permite identificar respostas em escala mensal, não sendo adequada para detectar processos de resposta rápida (horas a dias).

O regime hidrológico foi caracterizado por meio de curvas de permanência (*Flow Duration Curves*), obtidas a partir da ordenação dos valores de escoamento total (Y) em ordem decrescente e sua associação à probabilidade de excedência (SMAKHTIN, 2001). Essa abordagem permite avaliar o comportamento de vazões extremas, a variabilidade do sistema e a contribuição relativa do fluxo de base.

2.4 Consistência hidrológica e limitações de escala

A consistência da relação hidrológica entre sub-bacias foi avaliada por meio da análise de curva de massa dupla, comparando o escoamento acumulado da sub-bacia do Baixo com o escoamento médio acumulado das sub-bacias de controle (Alto e Médio). Variações na inclinação da curva são interpretadas como indicativas de possíveis alterações estruturais no comportamento hidrológico relativo entre as unidades analisadas. Adicionalmente, considera-

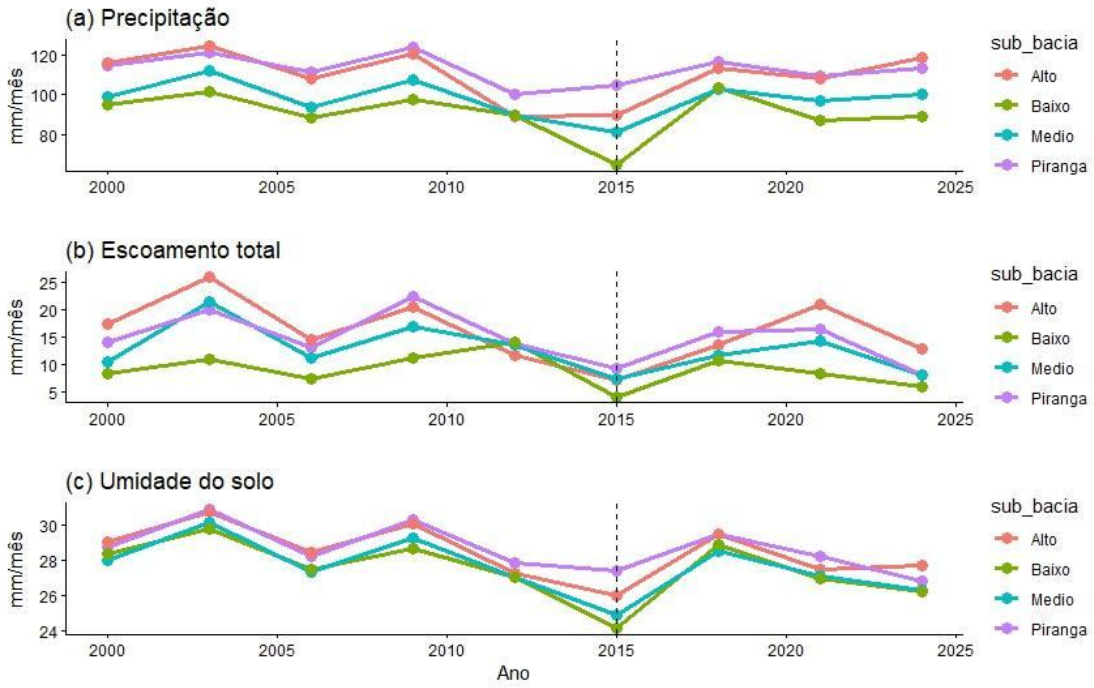
se que impactos físicos associados a perturbações ambientais tendem a ocorrer de forma espacialmente concentrada ao longo da rede de drenagem, enquanto as análises são realizadas em escala de sub-bacia (~10.000 km²). Como consequência, alterações localizadas podem ser diluídas em variáveis agregadas, reduzindo sua detectabilidade em métricas integradas. Essa limitação é explicitamente considerada na interpretação dos resultados, especialmente nas análises de tendência e conectividade hidrológica, sendo tratada como um aspecto inerente à escala de análise adotada (DWIVEDI *et al*. 2025).

3 RESULTADOS

A análise das variáveis hidroclimáticas revelou padrões espaciais e temporais consistentes ao longo da bacia do rio Doce, evidenciando forte controle climático regional e organização estrutural bem definida do sistema. Observa-se um gradiente espacial claro, com maiores valores de precipitação, evapotranspiração, umidade do solo e escoamento nas sub-bacias a montante (Alto e Piranga), valores intermediários na sub-bacia do Médio e menores magnitudes na sub-bacia do Baixo. Esse padrão reflete a organização longitudinal da bacia e indica coerência entre disponibilidade hídrica e resposta hidrológica.

No domínio temporal, verifica-se variabilidade interanual, com períodos de maior disponibilidade hídrica entre 2003–2005 e 2009–2011, seguidos por uma redução progressiva entre 2012–2014 e uma diminuição mais acentuada no intervalo de 2015–2017, quando todas as variáveis analisadas atingem seus menores valores. Essa redução ocorreu de forma consistente em todas as sub-bacias, indicando predominância de controle climático regional. A partir de 2018, observa-se recuperação parcial das variáveis, com retorno a padrões comparáveis aos períodos anteriores, sem evidência de mudanças abruptas ou persistentes no comportamento hidrológico.

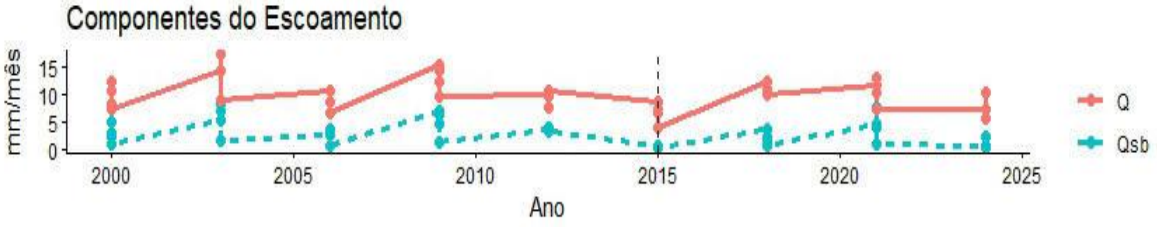
Figura 02 - Variabilidade temporal da precipitação (P), escoamento total (Q) e umidade do solo (U) nas sub-bacias analisadas. Linha tracejada indica 2015, ano do rompimento da barragem.



Fonte: Autor (2026).

De forma geral, os resultados indicam que a variabilidade hidroclimática constitui o principal fator controlador do sistema, sem evidência de alterações estruturais detectáveis na escala de análise adotada.

Figura 03 - Evolução temporal dos componentes do escoamento (Qs e Qsb) nas sub-bacias analisadas. Linha tracejada indica 2015, ano do rompimento da barragem.



Fonte: Autor (2026).

Os padrões observados nas séries temporais são consistentes com a distribuição espacial das variáveis entre as sub-bacias conforme as estatísticas descritivas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas das variáveis hidroclimáticas nas sub-bacias analisadas, expressas como média ± desvio padrão (mm/mês), para o período de 2000 a 2024.

Sub-bacia	P	E	U	Q	Qsb
Piranga	112,65 ± 7,52	97,76 ± 3,56	28,65 ± 1,35	11,28 ± 2,58	3,39 ± 2,08
Alto	109,73 ± 12,84	93,47 ± 7,18	28,48 ± 1,52	11,55 ± 3,28	4,44 ± 2,61
Médio	98,13 ± 9,13	85,36 ± 6,15	27,62 ± 1,58	9,72 ± 2,34	2,94 ± 2,14
Baixo	90,66 ± 11,40	81,83 ± 9,56	27,51 ± 1,70	7,82 ± 2,28	1,05 ± 0,92

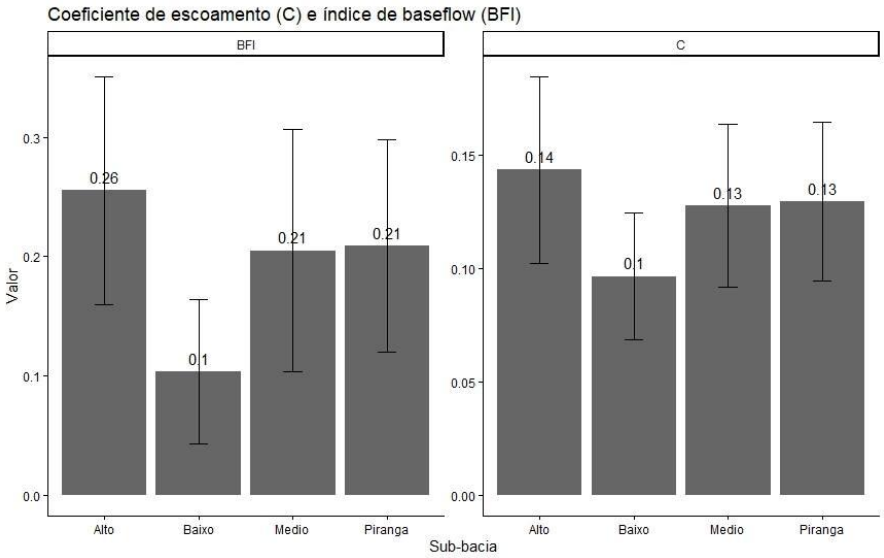
Fonte: Elaborada pelo Autor (2026)

3.1 Variáveis hidrológicas derivadas e conectividade

As variáveis hidrológicas derivadas e o índice de conectividade hidrológica funcional apresentaram padrões consistentes entre as sub-bacias, permitindo caracterizar de forma integrada a eficiência do sistema na conversão da disponibilidade hídrica em escoamento.

O coeficiente de escoamento (C) apresentou valores relativamente homogêneos, variando entre 0,10 ± 0,03 (Baixo) e 0,14 ± 0,04 (Alto), com valores intermediários nas sub-bacias do Médio e Piranga (0,13 ± 0,03). A sobreposição dos desvios padrão indica ausência de diferenças estruturais significativas na eficiência de conversão da disponibilidade hídrica em escoamento.

Figura 4 - Média ± desvio padrão do coeficiente de escoamento (C) e do índice de baseflow (BFI) nas sub-bacias analisadas.

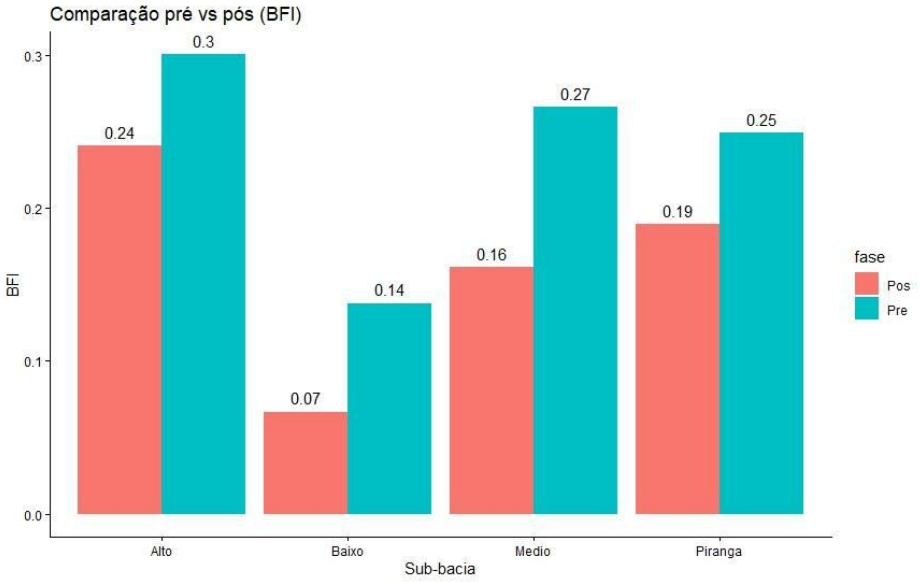


Fonte: Autor (2026).

Em contraste, o índice de baseflow (BFI) apresentou maior variabilidade espacial, com valores mais elevados nas sub-bacias do Alto (0,25 ± 0,10), Médio (0,20 ± 0,10) e Piranga (0,21 ± 0,09), e redução significativa na sub-bacia do Baixo (0,10 ± 0,06). Esse padrão indica menor contribuição do fluxo subsuperficial na porção jusante, sugerindo menor capacidade de armazenamento hídrico. A análise temporal revelou redução consistente do BFI entre os períodos pré (2000–2014) e pós-evento (2018–2024) em todas as sub-bacias, incluindo aquelas não diretamente impactadas, indicando controle climático regional.

A relação entre disponibilidade hídrica (X) e resposta hidrológica (Y) apresentou forte ajuste em todas as sub-bacias (R^2 entre 0,934 e 0,954; $p < 0,001$), evidenciando elevado grau de acoplamento funcional entre as variáveis. Os coeficientes angulares (β) variaram entre 0,247 (Baixo) e 0,363 (Alto), refletindo diferenças na eficiência de conversão da água disponível em escoamento. A transformação desses coeficientes resultou em valores do índice de conectividade hidrológica funcional (ICHF) entre 0,154 e 0,222.

Figura 5 - Comparação do índice de baseflow (BFI) entre os períodos pré (2000–2014) e pós-evento (2018–2024) nas sub-bacias analisadas.



Fonte: Autor (2026).

As sub-bacias do Alto (ICHF = 0,222) e Piranga (ICHF = 0,209) apresentaram os maiores níveis de conectividade, seguidas pela sub-bacia do Médio (ICHF = 0,196), enquanto a sub-bacia do Baixo apresentou o menor valor (ICHF = 0,154). Esse padrão evidencia um gradiente espacial de conectividade hidrológica, com redução progressiva em direção à jusante. A partir

da caracterização estrutural do sistema, a análise temporal permite avaliar possíveis mudanças ao longo do período de estudo.

3.2 Análise de tendência temporal

O teste de Mann–Kendall indicou ausência de tendências estatisticamente significativas para todas as variáveis hidroclimáticas ($p > 0,05$). Ainda assim, observou-se predominância de tendências negativas, especialmente para a umidade do solo (Tau entre −0,33 e −0,48), com valores próximos ao limiar de significância. O escoamento subsuperficial e o índice de baseflow também apresentaram tendências negativas consistentes, com destaque para a sub-bacia do Baixo. A inclinação de Sen confirmou esse comportamento, indicando redução sistemática das variáveis ao longo do período.

De forma geral, os resultados indicam tendência de diminuição da disponibilidade e da resposta hidrológica, porém dentro da variabilidade climática natural.

3.3 Resposta hidrológica

A análise de correlação cruzada entre precipitação (P) e escoamento total (Y) revelou resposta predominantemente imediata do sistema hidrológico. As sub-bacias do Piranga, Alto e Médio apresentaram lag dominante igual a zero, com coeficientes de correlação entre 0,66 e 0,73, indicando forte acoplamento entre entrada e resposta na mesma escala temporal. A sub-bacia do Baixo apresentou lag dominante igual a 1 mês e correlação máxima de 0,80, sugerindo leve defasagem temporal.

Tabela 2 - Lag dominante e correlação máxima entre precipitação e escoamento

Sub-bacia	Lag dominante	Correlação
Piranga	0	0.66
Alto	0	0.73
Médio	0	0.70
Baixo	1	0.80

Fonte: Elaborada pelo Autor (2026)

De modo geral, os resultados indicam resposta rápida do sistema às variações de precipitação, sem evidência de alterações relevantes na dinâmica temporal entre as sub-bacias.

3.4 Regime hidrológico

As curvas de permanência evidenciam diferenças consistentes no regime hidrológico entre as sub-bacias. Os valores de Q10 variaram de 5,42 mm/mês (Baixo) a 10,7 mm/mês (Alto), enquanto Q50 variou de 8,26 a 14,5 mm/mês e Q90 de 11,6 a 21,9 mm/mês. Esse padrão reforça o gradiente espacial observado, com maiores valores de escoamento nas sub-bacias a montante. As diferenças são mais pronunciadas nas vazões de baixa permanência (Q90), indicando menor contribuição de fluxo de base na sub-bacia do Baixo e menor capacidade de armazenamento hídrico.

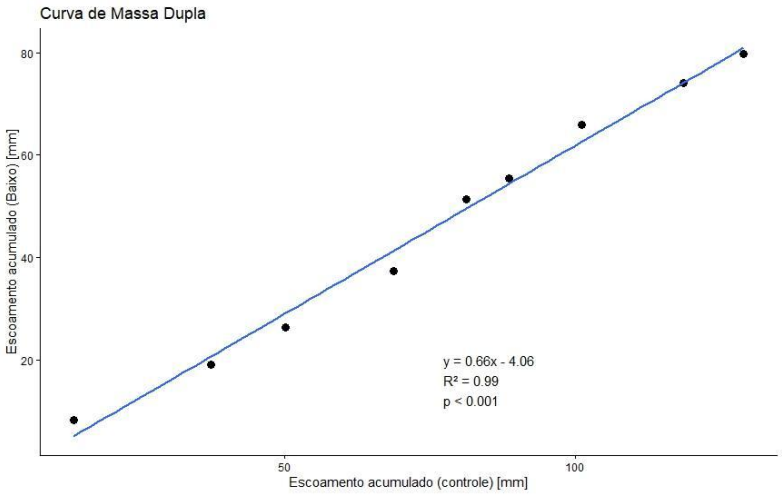
3.5 Consistência hidrológica

A análise de curva de massa dupla revelou forte relação linear entre o escoamento acumulado da sub-bacia do Baixo e o escoamento médio das sub-bacias de controle (R^2 = 0,990; $p < 0,001$), descrita pela equação:

$$y = 0{,}660x - 4{,}06 \quad (7)$$

A inclinação da reta indica que o escoamento da sub-bacia do Baixo corresponde, em média, a 66% do escoamento das sub-bacias de controle. A ausência de mudanças na inclinação da curva ao longo do período indica estabilidade na relação hidrológica entre as sub-bacias, sem evidência de alterações estruturais associadas ao evento de 2015. Esse comportamento reforça a predominância do controle climático regional sobre o sistema.

Figura 6 - Curva de massa dupla entre o escoamento acumulado da sub-bacia do Baixo e o escoamento acumulado médio das sub-bacias de controle (Alto e Médio).



Fonte: Autor (2026).

4 DISCUSSÃO

A análise do índice de conectividade hidrológica funcional (ICHF) proposto neste estudo evidencia que a relação funcional entre disponibilidade hídrica (X) e resposta hidrológica (Y) constitui uma métrica robusta para caracterizar o comportamento integrado do sistema em escala de bacia. Nesse contexto, o ICHF deve ser interpretado como um indicador funcional da eficiência do sistema, e não como uma representação direta da conectividade hidrológica estrutural. Os valores obtidos, variando entre aproximadamente 0,15 e 0,22, indicam um regime de conectividade relativamente baixo a moderado, no qual a geração de escoamento reflete um equilíbrio entre processos de armazenamento, liberação e dissipação de água no sistema.

Embora o termo conectividade hidrológico seja tradicionalmente associado à continuidade física dos caminhos de fluxo e à transferência de água, sedimentos e solutos ao longo da paisagem (BRACKEN *et al*., 2013; WOHL *et al*., 2019), a abordagem adotada neste estudo possui natureza funcional. Nesse contexto, a conectividade é interpretada como a eficiência com que a disponibilidade hídrica do sistema é convertida em resposta hidrológica observável, representada pelo escoamento. Assim, o Índice de Conectividade Hidrológica Funcional (ICHF) não pretende quantificar diretamente a conectividade estrutural da paisagem, da rede de drenagem ou dos caminhos preferenciais de fluxo, mas sim representar o grau de acoplamento funcional entre os componentes do balanço hídrico. Essa

interpretação aproxima-se do conceito de conectividade emergente, no qual a resposta integrada do sistema reflete a interação entre fatores climáticos, geomorfológicos e hidrológicos atuando em diferentes escalas espaciais e temporais.

Para fins de interpretação, propõe-se uma classificação preliminar do ICHF baseada na relação funcional entre o índice e o coeficiente β, que representa a eficiência de conversão da disponibilidade hídrica em escoamento. Nessa perspectiva, valores mais baixos do ICHF indicam sistemas com menor eficiência hidrológica relativa, enquanto valores mais elevados refletem maior capacidade de transferência da disponibilidade hídrica para a geração de escoamento. Os intervalos aqui discutidos devem ser interpretados como referências exploratórias derivadas do comportamento observado nas sub-bacias analisadas, não constituindo limiares universais de conectividade hidrológica funcional. A aplicação do índice em diferentes contextos hidroclimáticos permitirá, em estudos futuros, avaliar a consistência desses intervalos e estabelecer critérios de classificação mais robustos. A forte relação linear entre disponibilidade hídrica e resposta hidrológica ($R^2 > 0,93$) indica elevado grau de acoplamento funcional, corroborando a hipótese de controle climático predominante. Sob essa perspectiva, o ICHF pode ser interpretado como uma métrica complementar às abordagens clássicas de partição hidrológica. Enquanto a estrutura conceitual de Budyko (1974) descreve como a disponibilidade de água e energia controla a repartição de longo prazo entre evapotranspiração e escoamento, o índice proposto busca representar a eficiência funcional com que a água potencialmente disponível no sistema é convertida em resposta hidrológica. Dessa forma, o ICHF não substitui métricas tradicionais de balanço hídrico, mas fornece uma medida sintética do grau de acoplamento entre disponibilidade hídrica e geração de escoamento, permitindo comparações entre sub-bacias submetidas a diferentes condições climáticas e estruturais.

Os elevados coeficientes de determinação observados devem ser interpretados também à luz da escala temporal e espacial adotada neste estudo. A utilização de médias zonais em grandes unidades hidrográficas, associada à agregação temporal em janelas móveis de três anos, reduz a influência de flutuações de curto prazo e tende a evidenciar relações dominadas por controles climáticos de maior escala (ADDOR *et al*. 2018; DWIVEDI *et al*. 2025). Além disso, as variáveis analisadas são derivadas de um mesmo sistema de assimilação de dados, compartilhando consistência física e metodológica. Nesse contexto, os elevados

valores de R^2 refletem não apenas o forte acoplamento funcional entre disponibilidade hídrica e resposta hidrológica, mas também a natureza integrada das variáveis e a escala de observação considerada. A interpretação do ICHF também apresenta convergência conceitual com a abordagem *storage–discharge relationship* (KIRCHNER, 2009) amplamente utilizada em hidrologia de bacias. Estudos clássicos demonstram que a geração de escoamento está fortemente condicionada ao estado de armazenamento hídrico do sistema, sendo a descarga uma resposta emergente da interação entre disponibilidade de água e capacidade de retenção da bacia. Sob essa perspectiva, o ICHF pode ser interpretado como uma expressão sintética da eficiência com que o armazenamento hídrico disponível é convertido em escoamento observável.

Esse comportamento está em consonância com a estrutura conceitual de partição hidrológica proposta por Budyko (1974) e expandida por Zhang *et al*. (2001), segundo a qual a relação entre precipitação, evapotranspiração e escoamento em escala de bacia é fortemente condicionada pelo balanço energético e hídrico. Em termos mais recentes, Beck *et al*. (2017) reforçam que, em grandes bacias, a variabilidade do escoamento é amplamente explicada por controles climáticos, com menor sensibilidade a alterações locais.

Por outro lado, a variabilidade espacial observada no índice de *baseflow* (BFI) evidencia diferenças importantes nos mecanismos de armazenamento e liberação de água entre as sub-bacias. Smakhtin (2001) demonstrou que o BFI é um indicador direto da contribuição do fluxo subterrâneo e da capacidade de armazenamento do sistema, sendo sensível a características geológicas e pedológicas. Estudos mais recentes, como Woldesenbet *et al*. (2023), reforçam que bacias com menor capacidade de armazenamento tendem a apresentar valores reduzidos de BFI e maior variabilidade hidrológica. Nesse sentido, a redução do BFI observada na sub-bacia do Baixo indica menor contribuição do fluxo subsuperficial e menor resiliência hidrológica, o que é coerente com as curvas de permanência, que evidenciam menor sustentação de vazões em condições de baixa disponibilidade hídrica (BLOOMFIELD *et al*. 2021; LONGOBARDI; VILLANI, 2023). Sob a perspectiva ecohidrológica, a capacidade de armazenamento e liberação gradual de água constitui um dos principais mecanismos de resiliência dos sistemas fluviais frente à variabilidade climática. Conforme destacado por Falkenmark e Rockström (2004), a água armazenada no solo atua como elemento regulador da estabilidade hidrológica e ecológica, reduzindo a vulnerabilidade dos sistemas a períodos

de déficit hídrico. Nesse contexto, os menores valores de BFI observados na sub-bacia do Baixo sugerem menor capacidade de amortecimento hidrológico e, consequentemente, menor resiliência funcional diante de flutuações climáticas.

A organização espacial do ICHF, com maiores valores nas sub-bacias a montante e redução progressiva em direção à jusante, reflete a estrutura longitudinal da bacia e está alinhada com o conceito de conectividade hidrológica como propriedade emergente de sistemas geomorfológicos complexos. Wohl *et al*. (2019) destacam que a conectividade resulta da interação entre topografia, uso da terra e configuração da rede de drenagem, enquanto Bracken *et al*. (2013) enfatizam a importância dos caminhos de fluxo e da organização espacial na definição da transferência de água e sedimentos. Os padrões observados neste estudo são consistentes com essa abordagem, indicando que a conectividade hidrológica é fortemente condicionada por fatores estruturais e climáticos.

No domínio temporal, a ausência de tendências estatisticamente significativas, associada à predominância de sinais negativos, sugere uma possível redução gradual da disponibilidade hídrica e da resposta hidrológica, ainda inserida na variabilidade climática natural. Esse resultado está em consonância com Gudmundsson *et al*. (2021), que demonstram que a variabilidade hidrológica em escala global pode mascarar mudanças estruturais quando analisada em períodos relativamente curtos.

A resposta hidrológica rápida observada, com predominância de lag zero entre precipitação e escoamento, indica forte acoplamento entre entrada e resposta do sistema. Esse comportamento é compatível com os mecanismos descritos por Ali *et al.* (2009), que demonstram que em bacias com elevada conectividade funcional, a transferência de água entre encostas e canais ocorre de forma quase imediata durante eventos de precipitação; no presente estudo, essa dinâmica se traduz na ausência de defasagem temporal mesmo quando agregada em escala mensal. Apesar da estabilidade funcional observada em escala de sub-bacia, a literatura recente documenta impactos ambientais significativos e persistentes decorrentes do rompimento da barragem de Fundão. Quadra *et al*. (2026) demonstram que, mesmo após uma década, a bacia do rio Doce ainda apresenta alterações na qualidade da água, incluindo aumento de turbidez e presença de metais, indicando efeitos de longo prazo. Valle *et al*. (2025), em uma revisão sistemática, evidenciam que o desastre provocou impactos abrangentes sobre a qualidade da água, a biota aquática e as populações humanas.

No campo ecológico, Pereira *et al.* (2024) mostram que os efeitos do desastre persistem na estrutura das comunidades biológicas, enquanto Almeida *et al.* (2025) identificam alterações significativas na composição de comunidades microbianas, indicando impactos duradouros no funcionamento ecológico do sistema. Garcia *et al.* (2024) demonstram que o sistema apresentou um padrão típico de impacto agudo seguido de estabilização parcial, porém com manutenção de efeitos crônicos. De forma complementar, Oehrig *et al*. (2024) identificam assinaturas químicas persistentes associadas ao desastre, evidenciando que seus efeitos ainda são detectáveis anos após o evento. Esses resultados são consistentes com estudos anteriores que documentaram alterações geomorfológicas e hidrossedimentológicas significativas ao longo da rede de drenagem, como relatado por Carmo *et al*. (2017) e Fernandes *et al*. (2016), incluindo deposição de rejeitos, assoreamento e modificação da morfologia fluvial. No entanto, tais impactos apresentam forte heterogeneidade espacial, concentrando-se principalmente nos canais e zonas ripárias diretamente afetadas.

Nesse contexto, a ausência de alterações detectáveis nas métricas hidroclimáticas analisadas neste estudo não implica ausência de impacto, mas reflete a limitação inerente à escala de análise adotada. Os resultados obtidos reforçam a importância da escala como elemento central na interpretação de sistemas hidroambientais complexos. Enquanto diversos estudos documentam alterações persistentes na qualidade da água, na dinâmica sedimentar, na geomorfologia fluvial e nos ecossistemas aquáticos da bacia do rio Doce, a presente análise indica que tais efeitos não se manifestam necessariamente em métricas hidroclimáticas agregadas em escala de sub-bacia. Essa aparente divergência não representa uma contradição entre estudos, mas evidencia que diferentes processos possuem escalas características distintas de observação e resposta. Assim, a detectabilidade de impactos ambientais depende não apenas de sua magnitude, mas também da compatibilidade entre a escala do processo analisado e a escala da métrica utilizada para sua avaliação. Conforme discutido por Blöschl e Sivapalan (1995), processos hidrológicos são fortemente dependentes da escala, e alterações localizadas tendem a ser diluídas em métricas agregadas quando analisadas em grandes unidades espaciais.

De forma integrada, os resultados indicam que a conectividade hidrológica, conforme representada pelo ICHF, reflete predominantemente a organização estrutural da bacia e o

regime climático, enquanto perturbações localizadas, mesmo quando intensas, tendem a não se manifestar de forma significativa em indicadores hidrológicos agregados. Essa distinção entre resposta estrutural (morfologia, sedimentos, qualidade da água e ecossistemas) e resposta funcional (balanço hídrico e geração de escoamento) é fundamental para a interpretação de sistemas hidroambientais complexos. O índice de conectividade hidrológica funcional proposto apresenta potencial de aplicação em diferentes bacias hidrográficas, uma vez que se baseia em variáveis fundamentais do balanço hídrico. No entanto, sua interpretação deve considerar o contexto hidroclimático, a escala de análise e as características estruturais da bacia, especialmente em ambientes fortemente regulados ou sob condições climáticas extremas. Adicionalmente, os limiares de classificação propostos devem ser entendidos como dependentes do sistema analisado, sendo mais adequados para análises comparativas do que para generalizações universais.

Por fim, o índice de conectividade hidrológica funcional proposto mostrou-se eficaz na identificação de padrões espaciais coerentes e na quantificação da eficiência hidrológica do sistema. Embora sua formulação envolva simplificações, especialmente a linearidade assumida entre disponibilidade e resposta, o ICHF se apresenta como uma ferramenta promissora para análises comparativas em grandes bacias, especialmente em contextos com limitação de dados observacionais e necessidade de análises em escala regional.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos indicam que a variabilidade hidroclimática na bacia do rio Doce é predominantemente controlada por forçantes climáticas regionais, apresentando um padrão espacial coerente ao longo do gradiente longitudinal da bacia. O Índice de Conectividade Hidrológica Funcional (ICHF) proposto mostrou-se capaz de representar a eficiência da transferência hidrológica entre precipitação, armazenamento e escoamento, apresentando valores entre 0,15 e 0,22. Esses valores caracterizam um regime de conectividade funcional de baixa a moderada, no qual a resposta hidrológica permanece fortemente condicionada ao estado de armazenamento do sistema, conforme evidenciado pela variabilidade observada no Índice de Baseflow (BFI).

A forte associação entre disponibilidade hídrica e resposta hidrológica, aliada à ausência de tendências estatisticamente significativas nas séries analisadas, sugere que o comportamento hidrológico da bacia se manteve relativamente estável ao longo do período de estudo, dentro dos limites da variabilidade climática observada. Embora a literatura documente impactos ambientais expressivos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, não foram identificadas alterações estruturais detectáveis nas variáveis hidrológicas avaliadas na escala de sub-bacia adotada neste trabalho (~10.000 km²).

Esse resultado não implica ausência de impactos ambientais, mas evidencia a influência da escala de análise na detectabilidade de mudanças hidroambientais. Processos geofísicos, geomorfológicos e geoquímicos localizados podem permanecer pouco perceptíveis quando avaliados por métricas hidrológicas espacialmente agregadas. Assim, a estabilidade observada nos fluxos hidrológicos não deve ser interpretada como evidência de recuperação integral do sistema fluvial, mas como indicação de que determinados impactos podem manifestar-se em escalas espaciais e temporais distintas daquelas investigadas neste estudo.

Além da proposição do ICHF, o trabalho reforça a importância de abordagens multiescalares para a compreensão de sistemas hidroambientais complexos e para a avaliação de impactos associados a grandes perturbações antrópicas. Os resultados sugerem que o ICHF possui potencial para aplicações em estudos comparativos entre bacias e no monitoramento hidroclimático de regiões com disponibilidade limitada de dados observacionais. Investigações futuras poderão avaliar o desempenho do índice em escalas espaciais mais detalhadas, contribuindo para a compreensão dos limiares de detecção de alterações antrópicas sobre a conectividade hidrológica funcional em ambientes tropicais.

REFERÊNCIAS

ADDOR, N.; NEARING, G.; PRIETO, C., et al. **A ranking of hydrological signatures based on their predictability in space**. Water Resources Research, 54, 2018. https://doi.org/10.1029/2018WR022606

ALI, G. A.; ROY, A. G. **Revisiting hydrologic sampling strategies for an accurate assessment of hydrologic connectivity in humid temperate systems**. Geography Compass, [s.l.], v. 3, n. 1, p. 350-374, 2009. DOI: 10.1111/j.1749-8198.2008.00180. x.

ALMEIDA, P.; TORRES, A. GOMES, M. et al. "**Long-Term Impact of the Largest Environmental Disaster in Latin America (Fundão Dam Failure) on Microbial Communities in Lakes of the Doce River Basin, Brazil**." 2025. Environmental Microbiology, no. 9: e70171. https://doi.org/10.1111/1462-2920.70171.

BECK, H. E.; VAN DIJK, A. I. J. M.; DE ROO, A.; DUTRA, E. et al. **Global evaluation of runoff from 10 state-of-the-art hydrological models**. Hydrology and Earth System Sciences, [s.l.], v. 21, p. 2881–2903, 2017. DOI: 10.5194/hess-21-2881-2017.

BLOOMFIELD, J. P.; GONG, M.; MARCHANT, B. P. et al. **How is Baseflow Index (BFI) impacted by water resource management practices?** 2021. Hydrology and Earth System Sciences. 25, 5355–5379, https://doi.org/10.5194/hess-25-5355-2021

BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M. **Scale issues in hydrological modelling: a review.** 1995. Hydrological Processes, [s.l.], v. 9, p. 251–290. DOI: 10.1002/hyp.3360090305.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C.; LJUNG, G. M. 2015. **Time series analysis: forecasting and control**. 5. ed. Hoboken: Wiley.

BRACKEN, L. J.; WAINWRIGHT, J.; ALI, G. A.; TETZLAFF, D. et al. **Concepts of hydrological connectivity: research approaches, pathways and future agendas**. 2013. Earth-Science Reviews, [s.l.], v. 119, p. 17–34. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.02.001.

BUDYKO, M. I. **Climate and life**. 1974. Amsterdam: Elsevier.

CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; TOBIAS JUNIOR, R.; CAMPOS, I. C. et al. **Fundão tailings dam failures: the environmental tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context**. 2017. Perspectives in Ecology and Conservation, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 145–151, 2017. DOI: 10.1016/j.pecon.2017.06.002.

COLLAUD COEN, M.; ANDREWS, E.; BIGI, A. et al. **Effects of the prewhitening method, the time granularity, and the time segmentation on the Mann–Kendall trend detection and the associated Sen's slope**. 2020. Atmospheric Measurement Techniques, 13, 2020. https://doi.org/10.5194/amt-13-6945-2020

DWIVEDI, D.; POEPPL, R. E.; WOHL, E. **Hydrological connectivity: a review and emerging strategies for integrating measurement, modeling, and management**. 2025. Frontiers in Water, 7, 1496199. 2025. DOI: 10.3389/frwa.2025.1496199.

FALKENMARK, M.; ROCKSTRÖM, J. **Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology**. 2004. London: Earthscan.

FELIPPE, M. F. et al. **Acabou-se o que era doce: notas geográficas sobre a construção de um desastre ambiental**. In: MILANEZ, B.; LOSEKANN, C. (Org.). Desastre no Vale do Rio Doce: antecedentes, impactos e ações sobre a destruição. Rio de Janeiro: Folio, 2016. p. 125-159.

FERNANDES, G. W.; GOULART, F. F.; RANIERI, B. D.; COELHO, M. S. et al. **Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil**. 2016. Natureza & Conservação, v. 14, n. 2, p. 35–45. DOI: 10.1016/j.ncon.2016.10.003.

GARCIA, A. R. M.; PUJONI, D. G. F.; BEZERRA-NETO, J. F. **Resilience or Collapse? Reconstructing the Water Quality Time Series of a Tropical River Impacted by a Mine Tailings Dam Failure**. 2024. Limnological Review. 24, 637-652. https://doi.org/10.3390/limnolrev24040037

GUDMUNDSSON, L. et al. **Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change**. 2021. Science, v. 371, n. 6534, p. 1159–1162. DOI: 10.1126/science.aba3996.

IPCC. **Climate change 2021: the physical science basis**. 2021. Cambridge: Cambridge University Press.

KIRCHNER, J. W. **Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward**. 2009. Water Resources Research, v. 45, W02429. DOI: 10.1029/2008WR006912

KUMAR, S.; KOLASSA, J.; REICHLE, R.; CROW, W. et al. **An agenda for land data assimilation priorities: realizing the promise of terrestrial water, energy, and vegetation observations from space**. 2022. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, [s.l.], v. 14, n. 9. DOI: 10.1029/2022MS003259.

LIU, C.; CHEN, Y.; HUANG, W. et al. **Climate warming positively affects hydrological connectivity of typical inland river in arid Central Asia**. 2024. npj Climate and Atmospheric Science 7, 250. https://doi.org/10.1038/s41612-024-00800-4

LONGOBARDI, A.; VILLANI, P. **Baseflow index characterization in typical temperate to dry climates: conceptual analysis and simulation experiment to assess the relative role of climate forcing features and catchment geological settings**. 2023. Hydrology Research. doi: https://doi.org/10.2166/nh.2023.026

MCNALLY, A.; ARSENAULT, K.; KUMAR, S.; SHUKLA, S. et al. **A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications**. 2017. Scientific Data, v. 4, 2017. DOI: 10.1038/sdata.2017.12.

OEHRIG, J.; KANANIZADEH, N.; WILD, M.; ROUHANI, S.; ODLE, W. **Applying multivariate techniques to fingerprint water quality impact of the Fundão dam breach within the**

Rio Doce basin. 2024. Integrated Environmental Assessment and Management, v. 20, 2024. DOI: 10.1002/ieam.4820.

PEREIRA, C. C.; FERNANDES, S.; FERNANDES, G. W.; GOULART, F. F. **Eight years after the Fundão tailings dam collapse: chaos on the muddy banks**. 2024. Nature Conservation, v. 56, 2024. DOI: 10.3897/natureconservation.56.133441.

QUADRA, G. R. et al. **Water quality assessment of the Doce River basin: what are the conditions a decade after the Fundão dam breach?** 2026. Water Biology and Security, v. 5. DOI: 10.1016/j.watbs.2026.100549.

ROSA, N. M. G.; MAGALHÃES JR., A. P. **Impacts of the Fundão dam failure on water and land use in the Doce River basin**. 2024. Caderno de Geografia, v. 34, p. 1–20, 2024.

SÁNCHEZ, L. E.; ALGER, K.; ALONSO, L.; BARBOSA, F. A. R. et al. **Os impactos do rompimento da barragem de Fundão: o caminho para uma mitigação sustentável e resiliente**. 2018. Gland (Suíça): UICN, 2018.

SMAKHTIN, V. U. **Low flow hydrology: a review**. 2001. Journal of Hydrology, v. 240, p. 147–186. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00340-1.

SIVAPALAN, M. **Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: is there a connection?** 2003. Hydrological Processes, 17: 1037-1041. https://doi.org/10.1002/hyp.5109

STEWART-OATEN, A.; MURDOCH, W. W.; PARKER, K. R. **Environmental impact assessment: pseudoreplication in time?** 1986. Ecology, v. 67, n. 4, p. 929–940, 1986. DOI: 10.2307/1939815.

UNDERWOOD, A. J. **On beyond BACI: sampling designs that might reliably detect environmental disturbances**. 1994. Ecological Applications, v. 4, n. 1, p. 3–15, 1994. DOI: 10.2307/1942110.

VALLE, B. L. et al. **A systematic review of the water quality in the Doce River Basin: following the Fundão dam collapse**. 2025. Acta Limnologica Brasiliensia, v. 37, 2025. DOI: 10.1590/S2179-975X8724.

WOHL, E.; BRIERLEY, G.; CADOL, D.; COULTHARD, T. J. et al. **Connectivity as an emergent property of geomorphic systems**. 2019. Earth Surface Processes and Landforms, [s.l.], v. 44, p. 4–26. DOI: 10.1002/esp.4434.

ZHANG, L.; DAWES, W. R.; WALKER, G. R. **Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale**. 2001. Water Resources Research, v. 37, n. 3, p. 701–708, 2001. DOI: 10.1029/2000WR900325.