

Conectividade Hidrossedimentológica em Bacias Hidrográficas: uma Revisão de Conceitos, Métodos e Modelos

Hydrosedimentological Connectivity in Watersheds: A Review of Concepts, Methods, and Models

Adonai Felipe Pereira de Lima Silva¹ 

Jonas Otaviano Praça de Souza² 

Palavras-chave

Geomorfologia Fluvial
Modelagem Hidrológica
Índice de Conectividade

Resumo

A crescente aplicação de modelos numéricos e de índices tem ampliado significativamente a compreensão da conectividade hidrossedimentológica em bacias hidrográficas, ao permitir a representação da dinâmica de redistribuição de água e sedimentos e a avaliação dos efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra. Esta pesquisa apresenta uma revisão sistemática dos principais conceitos, métodos e modelos empregados na análise da conectividade hidrossedimentológica, destacando a evolução da modelagem matemática desde as formulações teóricas clássicas até a incorporação de ferramentas computacionais amplamente utilizadas na literatura científica. Entre os modelos discutidos, destacam-se o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), o Topographic Model (TOPMODEL), o MIKE 11, entre outros, evidenciando suas aplicações, potencialidades e limitações na simulação de processos hidrossedimentológicos. Além disso, são analisados os índices de conectividade, com ênfase no Índice de Conectividade (IC), amplamente empregado na estimativa da transferência potencial de sedimentos entre diferentes compartimentos da paisagem e no interior das unidades geomorfológicas. Por fim, ressalta-se a importância da validação dos modelos e índices por meio de observações de campo e dados empíricos, reforçando a complementaridade entre modelagem computacional e investigação experimental para o avanço dos estudos geomorfológicos, hidrológicos e hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas, contribuindo para o aprimoramento do planejamento ambiental e da gestão integrada dos recursos hídricos.

Keywords

Fluvial Geomorphology
Hydrological Modeling
Connectivity Index

Abstract

The increasing application of numerical models and indices has significantly expanded the understanding of hydrosedimentological connectivity in river basins, as it allows the representation of the dynamics of water and sediment redistribution and the assessment of the effects of land use and land cover changes. This study presents a systematic review of the main concepts, methods, and models employed in the analysis of hydrosedimentological connectivity, highlighting the evolution of mathematical modeling from classical theoretical formulations to the incorporation of computational tools widely used in the scientific literature. Among the models discussed, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), the Topographic Model (TOPMODEL), and MIKE 11 stand out, among others, evidencing their applications, potentialities, and limitations in the simulation of hydrosedimentological processes. In addition, connectivity indices are analyzed, with emphasis on the Index of Connectivity (IC), widely applied in estimating the potential transfer of sediments between different landscape compartments and within geomorphological units. Finally, the importance of validating models and indices through field observations and empirical data is emphasized, reinforcing the complementarity between computational modeling and experimental investigation for the advancement of geomorphological, hydrological, and hydrosedimentological studies in river basins, contributing to the improvement of environmental planning and integrated water resources management.

INTRODUÇÃO

O fluxo de água e sedimentos em bacias hidrográficas é um processo complexo e dinâmico, condicionado por fatores climáticos, geomorfológicos, geológicos e antrópicos. Essa transmissão pode ser modificada por elementos naturais ou artificiais que bloqueiam o fluxo, exigindo estudos específicos para prever os impactos futuros nos ambientes fluviais em diferentes escalas temporais e espaciais (Almeida; Correa, 2020). Em regiões semiáridas, como o Nordeste brasileiro, a dinâmica torna-se ainda mais complexa devido à irregularidade das chuvas, à variação de energia no sistema e à heterogeneidade espacial dos eventos pluviométricos (Souza; Almeida, 2015; Souza; Correa, 2012).

A análise desses processos tem como base a abordagem da conectividade da paisagem, definida como a capacidade de interação e circulação de matéria e energia tanto entre diferentes compartimentos da paisagem quanto no interior deles. Determinados trechos podem estar conectados ou desconectados (Blanton; Marcus, 2013; Brierley *et al.*, 2006; Fryirs, 2013; Souza; Correa, 2012; Wohl, 2017), tanto em termos hidrológicos (conectividade hidrológica) quanto sedimentológicos (conectividade sedimentológica), atuando em três dimensões: vertical (superfície–subsuperfície), lateral (encosta–planície–canal) e longitudinal (montante–jusante) (Blanton; Marcus, 2013; Bracken *et al.*, 2013; Bracken; Croke, 2007).

O aumento das pressões antrópicas tem alterado significativamente a conectividade e a sensibilidade geomórfica das bacias, influenciando os fluxos de água e sedimentos, os processos erosivos e a estabilidade das unidades do vale (Poepl *et al.*, 2020). Entre os impactos observados estão atividades agropecuárias, piscicultura, abertura de estradas e perfuração de poços, sendo os barramentos os mais expressivos, pois modificam intensamente a transmissão de energia e matéria no sistema fluvial (Blanton; Marcus, 2013).

Diante dessas alterações nos fluxos e processos geomórficos decorrentes das ações antrópicas, o conceito de conectividade tem sido amplamente empregado nas ciências hidrológicas, ecológicas, geológicas e geomorfológicas, abordando diferentes tipos — hidrológica, sedimentológica e da paisagem — que exigem compreensão integrada e interdisciplinar. Essas conexões são influenciadas por fatores climáticos, hidrológicos e sedimentares (Bracken; Croke, 2007; Wohl *et al.*, 2019).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo revisar e discutir os principais modelos numéricos, índices e abordagens conceituais empregados na análise da conectividade hidrossedimentológica, abordando sua evolução, aplicações, formas de validação e potencial de expansão em pesquisas voltadas à geomorfologia fluvial em regiões úmidas e semiáridas. A realização desta revisão é essencial diante da crescente diversidade de modelos e índices aplicados ao estudo da conectividade, bem como das lacunas existentes quanto aos critérios de escolha, limites de aplicação e validação dessas ferramentas. Ao sistematizar avanços conceituais e metodológicos, o trabalho contribui para fortalecer a base teórica da conectividade hidrossedimentológica e orientar análises mais robustas em diferentes contextos ambientais.

ABORDAGEM DA CONECTIVIDADE NA ANÁLISE DOS FLUXOS BIOFÍSICOS SUPERFICIAIS

Os conceitos de conectividade têm sido discutidos nas pesquisas geográficas desde meados do século XX, com destaque na geomorfologia, onde são definidos como a transferência de energia e matéria entre e intra compartimentos da paisagem ou ao longo do sistema fluvial. No século XXI, o tema ganhou maior relevância, ampliando-se para áreas como Ecologia, Geologia, Hidrologia e Geomorfologia (Bracken; Croke, 2007; Poepl *et al.*, 2017; Wohl *et al.*, 2019).

A conectividade é amplamente empregada nas geociências para descrever a dinâmica hidrológica e o transporte de sedimentos (Baartman *et al.*, 2020). Assim, Geologia, Geomorfologia e Ecologia devem ser compreendidas de forma integrada, visto que as interações entre vegetação, sedimentos e água em canais fluviais influenciam a diversidade de habitats, a dinâmica do fluxo e as unidades geomórficas, em ambientes úmidos ou semiáridos (Cadot; Wine, 2017).

Na Geologia e na Geomorfologia, distinguem-se três tipos principais de conectividade amplamente discutidos na literatura: (i) Conectividade da Paisagem, concebida inicialmente por Brierley *et al.*, (2006), refere-se ao acoplamento entre formas de relevo, unidades geomórficas e a rede de drenagem da bacia; (ii) Conectividade Hidrológica, discutida por Bracken e Croke (2007), envolve as ligações funcionais de passagem da água entre e intra compartimentos da paisagem, influenciando a geração e a resposta do escoamento superficial;

(iii) Conectividade Sedimentológica, tratada por Wohl *et al.*, (2019), Poepl *et al.*, (2020) e outros autores, diz respeito à transferência de sedimentos (e poluentes associados) ao longo da rede de drenagem, condicionada por propriedades como tamanho das partículas, rugosidade do percurso e capacidade de transporte.

A conectividade hidrológica representa a capacidade da água de mediar o transporte de energia, matéria e organismos ao longo do ciclo hidrológico. É uma ferramenta útil para compreender as variações espaciais do escoamento superficial e subsuperficial (Bracken *et al.*, 2013; Poepl *et al.*, 2017; Pringle, 2003), sendo classificada em cinco camadas: encosta; hiporreica (zona de transição entre a água superficial e a subsuperficial imediata no leito do rio); interação rio-águas subterrâneas (trocas profundas entre o fluxo do rio e os aquíferos); planície de inundação/planície ripária; e longitudinal ao longo dos canais (Covino, 2017; Wohl, 2017).

A conectividade sedimentar corresponde à ligação entre áreas-fonte e sítios de deposição, controlada pelo movimento dos sedimentos entre as unidades geomórficas. Três elementos são essenciais: a magnitude-frequência dos eventos de transporte e deposição, o sequenciamento espaço-temporal do deslocamento e os mecanismos de descolamento e transporte (Bracken *et al.*, 2015).

Os processos hidrossedimentológicos, que envolvem a interação entre água e sedimentos, são fundamentais para compreender a conectividade. Em ambientes tropicais e subtropicais, a transferência desses materiais depende principalmente da precipitação, que condiciona variações espaço-temporais conforme a magnitude dos eventos (Zanandrea *et al.*, 2021).

A relação entre processos hidrológicos e sedimentares tem ampliado o uso do conceito de Hidrossedimentologia, aplicado em estudos sobre a dinâmica hidrológica e sedimentológica de bacias hidrográficas brasileiras, em regiões úmidas e semiáridas (Oliveira *et al.*, 2024; Silva, 2019; Silva; Souza, 2017; Souza; Marçal, 2015; Zanandrea *et al.*, 2021; Zanin *et al.*, 2018). Contudo, ainda são escassas as publicações que definem claramente os conceitos de Hidrossedimentologia e de Conectividade Hidrossedimentológica (Dwivedi *et al.*, 2025; Zanandrea *et al.*, 2017).

Em uma paisagem, as ligações podem estar conectadas (*coupled*) ou desconectadas (*decoupled*). Nesse contexto, *buffers*, *barriers* e *blankets* atuam reduzindo a conectividade: os *buffers* bloqueiam a transmissão de sedimentos

para os canais; os *barriers* interrompem o transporte longitudinal; e os *blankets* recobrem camadas superficiais, dificultando o retrabalhamento vertical. Por outro lado, os *boosters* intensificam o fluxo de energia e matéria (Brierley *et al.*, 2006; Fryirs *et al.*, 2007). Assim, compreender a conectividade implica avaliar criticamente eventos climáticos e geológicos em função da estrutura sedimentar em interação com escoamento superficial (Fryirs; Brierley, 2012).

A conectividade pode ser analisada sob diferentes categorias — hidrológica, sedimentológica e hidrossedimentológica — e dimensões — lateral, vertical e longitudinal —, conforme a abordagem disciplinar (ecologia, hidrologia, geomorfologia). Contudo, comumente se distingue entre conectividade estrutural, que descreve os padrões espaciais da paisagem, e funcional, que representa as interações entre esses padrões e os processos de transferência de água e sedimentos (Bracken; Croke, 2007; Bracken; Wainwright, 2006; Heckmann *et al.*, 2018; Schopper *et al.*, 2019; Zanandrea *et al.*, 2021). As dinâmicas estruturais e funcionais operam em múltiplas escalas espaço-temporais, demandando abordagens interdisciplinares para sua análise em diferentes ambientes (Wainwright *et al.*, 2011).

Assim como ocorre na conectividade da paisagem e na conectividade hidrológica, as ligações laterais, longitudinais e verticais influenciam a dinâmica sedimentar. Uma quarta dimensão frequentemente destacada é o tempo, representado pelo conceito de *Effective Timescales*, que expressa a frequência e magnitude dos processos geomórficos em sistemas de captação. Essa dimensão temporal afeta diretamente a conectividade: quanto maior a magnitude do evento, maior sua capacidade de transporte e, portanto, mais forte a conectividade (Boulton *et al.*, 2017; Schopper *et al.*, 2019).

MODELOS DE ANÁLISE DE CONECTIVIDADE

Nos últimos anos, houve um aumento do número de estudos desenvolvidos sob simulações numéricas de fluxos, e em seguida, comparadas as previsões desses modelos numéricos com as medições do mundo real, obtidas de estudos de campo ou dados de sensoriamento remoto. O uso de medidas qualitativas versus quantitativas, juntamente com os aspectos específicos da conectividade que são estimados, refletem os

objetivos de estudos individuais ou aplicações de gerenciamento. Algumas limitações envolvem as medidas qualitativas, que fornecem apenas uma percepção geral da conectividade, e as quantitativas, que dependem de dados detalhados, cuja falta ou escala incorreta pode comprometer a precisão, a validação de modelos e a gestão de bacias, podendo, assim, restringir a capacidade de quantificar alguns estudos da conectividade (Wohl, 2017).

Para atender a esses propósitos e quantificar a conectividade de sedimentos, várias técnicas têm sido empregadas, incluindo índices, modelos e teoria dos grafos (*graph theory*), no entanto, a maioria das pesquisas sobre conectividade de sedimentos tem focado mais na conectividade estrutural e menos na conectividade funcional (Najafi *et al.*, 2021).

Nessa perspectiva, o principal objetivo dos modelos é quantificar a dinâmica complexa de redistribuição de água e sedimentos em uma bacia hidrográfica, enquanto que os índices normalmente são combinações de diversas variáveis conceitualmente conhecidas por controlar a intensidade de fluxo e a organização espacial em uma paisagem. Muitas vezes os índices são mais estáticos que os modelos, podendo ser aplicado amplamente e modificado por várias aplicações (Baartman *et al.*, 2020; Heckmann *et al.*, 2018). Em seguida, será abordado as características de algumas abordagens, modelos e índices de conectividade.

A modelagem matemática tem sido usada há décadas para quantificar e prever o transporte e a erosão de sedimentos, como em cenários de mudança de uso da terra ou medidas de conservação. Os modelos numéricos são usados desde a década de 1960 para descrever os processos hidrológicos e transportes de sedimentos em bacias hidrográficas, incluindo a turbulência do fluxo nos canais fluviais (Baartman *et al.*, 2020; Churuksaeva; Starchenko, 2015).

Desde a formulação da Teoria Difusiva da Turbulência – que investigava os córregos fluviais para avaliar a precisão de medidas da velocidade média do fluxo (entre os anos da década de 1930 e 1960) – o aumento do poder computacional permitiu criar métodos e modelos matemáticos que são mais complexos e mais precisos, incluindo métodos para fluxos instáveis e fluxos em leitos deformáveis (Churuksaeva; Starchenko, 2015). Apesar das ideias descritas sobre o mecanismo de formação de escoamento de rios, além de outros temas relacionados que foram trabalhados por muitos pesquisadores em meados do século XX, a modelagem matemática tomou forma em 1970, a qual era associada com o uso de computadores

para processamento de grande quantidade de informação (Mukharamova *et al.*, 2018).

Logo, a capacidade de fazer cálculos precisos do fluxo fluvial, transporte de sedimento, os processos de evolução morfológica associados e a qualidade da água se tornaram essenciais em um período em que a preocupação com os ambientes fluviais e a influência das intervenções humanas têm aumentado. Desse modo, o processo de transporte de sedimentos fluviais tem sido um assunto importante nos campos da engenharia de recursos hídricos, hidrologia, das ciências ambientais, geográficas e geológicas (Cao; Carling, 2002). A análise do transporte de sedimentos fluviais tem sido frequentemente utilizada a partir da modelagem hidrológica, esta que procura representar parte de alguns processos do ciclo hidrológico, e por isso, a bacia hidrográfica é o objeto da maioria dos modelos hidrológicos (Almeida; Serra, 2017; Rennó; Soares, 2008).

A modelagem hidrológica é utilizada como ferramenta para aprofundar o conhecimento nos fenômenos físicos envolvidos, além da simulação e previsão de cenários. Por sua vez, os modelos hidrológicos podem ser representados matematicamente, através do fluxo de água e seus constituintes sobre partes da superfície e subsuperfície terrestre, abarcando sistema de equações e procedimentos que integram variáveis e parâmetros comumente utilizados em estudos ambientais, e, portanto, podendo auxiliar na compreensão dos impactos sobre o uso da terra e na previsão de alterações futuras na paisagem (Almeida; Serra, 2017; Araújo *et al.*, 2024).

Há diversos tipos de modelos (determinísticos, estocásticos, empíricos, conceituais, concentrados e distribuídos) e aplicações (análise de consistência e preenchimento de falhas; previsão de vazão; dimensionamento e previsão de cenários de planejamento) de modelagem hidrológica (Almeida; Serra, 2017). Entre os modelos determinísticos destaca-se o *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), utilizado para simulação de processos hidrológicos em bacias, incluindo infiltração, escoamento superficial e roteamento de fluxos (Usace, 2023). Modelos conceituais, como o *Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier* (GR4J), são comumente utilizados para simular o comportamento de bacias hidrográficas e prever variáveis, como a vazão dos rios (Lujano *et al.*, 2025). Outro modelo conceitual popular é o *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* (HBV), que simula o balanço hídrico de bacias e é utilizado na previsão de regimes hidrológicos (Ouatiki *et al.*,

2020). Métodos empíricos, como o Número da Curva (*Curve Number* - CN, em inglês), permanecem úteis para estimativas rápidas de escoamento superficial (Albuquerque *et al.*, 2024). Já os modelos distribuídos, como o MIKE SHE (*Modelling Integrated Catchment Hydrology*), permitem representação detalhada da variabilidade espacial de solo, topografia e uso da terra (Aysha; Fahim, 2024). Além disso, abordagens estocásticas seguem essenciais para fornecer simulações e representações idealizadas dos mecanismos físicos envolvidos nos processos de chuva (Northrop, 2023).

Normalmente, todos os modelos espacialmente explícitos capazes de produzir mapas do fluxo terrestre e a redistribuição de sedimentos podem ser usados para inferir conectividade, sejam eles modelos baseados nos processos de erosão, modelos hidrológicos ou modelos de evolução da paisagem (Baartman *et al.*, 2020). Nessa perspectiva, não existe um único “melhor modelo”, devido à natureza das previsões ambientais, havendo então muitas soluções plausíveis a depender da finalidade e complexidade necessária, além de uma grande variedade de modelos hidrológicos diferentes, onde normalmente a seleção do modelo tende a ser mais uma função de familiaridade do que adequação (Ogden, 2021).

Um dos modelos matemáticos mais utilizados para estimar a produção de sedimentos e volume do escoamento superficial é o modelo hidrossedimentológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), desenvolvido pelo *Agricultural Research Service of the United States* (ARS – USDA), com o objetivo de prever os impactos e mudanças no uso e manejo do solo atual e futuro, por meio de análise da distribuição espaço-temporal, simulação de cenários na produção de água, sedimentos e nutrientes em bacias hidrográficas, além de dados de precipitação, temperatura, umidade, solos, uso da terra, modelo digital de elevação, entre outros elementos (Da Silva *et al.*, 2018; Dantas *et al.*, 2015; Lima *et al.*, 2021; Martins *et al.*, 2020).

Além do SWAT, vários outros modelos podem ser usados em objetivos distintos para análise da conectividade hidrossedimentológica em bacias hidrográficas, como por exemplo, o modelo hidrológico conceitual baseado em grade regular: *Topography-Based Hydrological Model* (TOPMODEL), proposto inicialmente por Beven e Kirkby (1979), o qual representa um modelo hidrológico semidistribuído que usa a topografia para estimar a variabilidade espacial da umidade do solo e identificar áreas propensas à saturação, permitindo simular geração de escoamento em bacias hidrográficas (Beven;

Freer, 2001; Goudarzi *et al.*, 2023; Reid *et al.*, 2007); o modelo hidrodinâmico unidimensional (MIKE 11), para simular a variação de profundidade da água e descarga ao longo dos rios e planícies (Karim *et al.*, 2014); o modelo para simular o fluxo terrestre hortoniano e de saturação (TAPES-C), como também a dinâmica espaço-temporal das respostas das águas subterrâneas rasas (Sidle, 2021); modelos especializados para erosão do solo e/ou geração de escoamento (USLE, RUSLE, SCN-CN) (Borselli *et al.*, 2008); além do sistema de modelagem de escoamento de precipitação (*Precipitation Runoff Modeling System* – PRMS, em inglês) e capacidade de infiltração variável (*Variable Infiltration Capacity* – VIC, em inglês), entre vários outros (Bennett *et al.*, 2019).

Assim como os modelos hidrológicos/hidrossedimentológicos, diversas fórmulas foram propostas no intuito de quantificar a conectividade de sedimentos, visando condicionar a transferência de sedimentos na bacia hidrográfica a partir de parâmetros geomorfológicos. Nesse sentido, os índices contribuem para o desenvolvimento do entendimento do tema, pois existem uma série de variáveis que podem ser integradas aos índices de conectividade hidrossedimentológica, que são: hidrológicas (precipitação, erosividade, taxa de infiltração, umidade do solo, entre outras); geomorfológicas (declividade, comprimento do percurso, rugosidade, cobertura do solo, topografia e área de drenagem); e sedimentológicas (erodibilidade, granulometria e coesão) (Zanandrea *et al.*, 2020).

Muitas abordagens empíricas e discussões teóricas foram desenvolvidas para avaliar a conectividade do escoamento superficial em bacias hidrográficas (Bracken; Croke, 2007; Brierley *et al.*, 2006; Fryirs *et al.*, 2007; Hooke, 2003), no entanto, o índice de conectividade (IC) tem sido uma das abordagens mais utilizadas. O IC foi desenvolvido por Borselli *et al.* (2008) e posteriormente testado, modificado e aplicado para avaliar a conectividade hidrológica em escalas de captação (Cavalli *et al.*, 2013; Sidle, 2021). Logo, o índice de conectividade hidrológica e/ou sedimentológica passou a ser amplamente aplicado e modificado para diversas aplicações em diferentes pesquisas que envolvem a transferência de água e sedimentos em escala de captação (Baartman *et al.*, 2020). Entre outras abordagens, o índice de conectividade de sedimentos é simples e fácil de usar, indicando a possibilidade de uma dada porção da bacia hidrográfica de transferência de sedimentos intra e entre os compartimentos da paisagem (Najafi *et al.*, 2021).

Por sua vez, o índice de conectividade (IC) fornece uma estimativa da conexão potencial entre os sedimentos erodidos das encostas e o sistema de fluxo. Isso envolve a distribuição e padrões de uso da terra e as características topográficas e da superfície capazes de produzir ou armazenar água e sedimento. Desse modo, o IC permite avaliar as conexões reais durante uma série de eventos de diferentes magnitudes, podendo também ser usado para realizar cenários de análise. Esta última aplicação pode ser útil no intuito de avaliar a eficiência das medidas de conservação contra erosão de solos e transporte de sedimentos, que estão altamente associados à conectividade de fluxos (Borselli *et al.*, 2008). De acordo com Heckmann *et al.*, (2018), dois problemas podem levar ao desenvolvimento do índice de conectividade: o primeiro é a dificuldade de medir diretamente a transferência de sedimentos, portanto, inferir a conectividade em campo; e o segundo é a necessidade de prever o comportamento de sistemas geomórficos no futuro, ou em áreas de pesquisa onde as medições não estão disponíveis (Heckmann *et al.*, 2018).

Em relação à validação dos índices de conectividade, Zanandrea *et al.*, (2020, p. 453) afirmam que “os índices de conectividade existentes foram pouco explorados nas bacias brasileiras e, portanto, ainda não foram devidamente validados para diferentes climas e biomas.”. De forma geral, a validação do índice de conectividade tem sido um desafio devido à impossibilidade da identificação quantitativa dos processos envolvidos no conceito de conectividade. Logo, a validação do índice de conectividade tem sido buscada com base em dados de campo para processos e vias de transferência de sedimentos, muitas vezes relacionadas aos eventos extremos. Além disso, a identificação das áreas fonte e de deposição de sedimentos pode ser usada para validação de índices de conectividade, conforme a complexidade dos processos conhecidos para a conectividade de sedimentos (Zanandrea *et al.*, 2021).

Desse modo, todos esses modelos numéricos adotam abordagens e esquemas computacionais que podem ser amplamente diferentes, e por isso, protocolos de validação podem ser necessários para facilitar a comparação de modelos e melhorar o desenvolvimento dos mesmos, entre outras necessidades (Biondi *et al.*, 2012). Ademais, outras preocupações reforçam a necessidade de validação dos modelos, como as demais irregularidades que podem ser introduzidas devido à ampla aquisição de métodos e aplicação de técnicas, além da possível inclusão de informações falsas

ou conflitantes em um modelo. Isso pode gerar resultados errôneos de uma simulação numérica, sendo preciso então, detectar os prováveis problemas e ajustar adequadamente o conjunto de dados (Rink *et al.*, 2013).

Diante da busca pela validação com base nas observações in loco, as medidas de campo usadas para muitos mapeamentos são normalmente limitadas em termos de escala espacial e temporal, e logo, a modelagem tem sido usada para quantificar processos erosivos e o transporte de sedimentos. Assim, os avanços das técnicas de aquisição de dados de campo juntamente com as melhorias computacionais para a modelagem têm potencializado novas oportunidades para o estudo da conectividade, mapeando e quantificando as vias de água e sedimentos em múltiplas escalas espaciais e temporais (Cavalli *et al.*, 2019).

Atrrelado ao gradativo uso de tecnologias, a crescente presença da modelagem computacional vem afetando a Geomorfologia, permitindo então que o teste de hipóteses que antes não poderiam ser testadas, e consequentemente, podendo relegar o trabalho de campo a uma preocupação secundária na interpretação dos processos geomorfológicos. Contudo, as observações realizadas em campo não podem ser substituídas em função do avanço da modelagem computacional na Geomorfologia e demais métodos de análise laboratoriais (Salgado; Salgado, 2020).

Nas pesquisas de campo – sobretudo, pesquisas que contêm fortes componentes de campo – a análise, coleta e explicação de dados de campo vão muito além da modelagem, isto é, as informações sobre o terreno podem corrigir ou validar um conjunto de dados espaciais e temporais, já que alguns componentes naturais não podem ser modelados. Logo, o trabalho de campo é necessário para informar esses modelos geomorfológicos, estimulando pesquisadores a pensar fora dos modelos ao coletar novos dados. Além disso, o trabalho de campo em Geomorfologia tem o poder de fortalecer as relações interdisciplinares, verificando e aprimorando as ligações e conexões processo-forma (Allen, 2014).

Os resultados gerados pelos modelos precisam de validação, desse modo, Hooke e Souza (2021) recomendam a utilização de uma combinação do mapeamento com a modelagem, pois sem a testagem, a saída dos modelos continua como hipótese. Os autores ainda afirmam que muitos pesquisadores enfatizam a necessidade para mapeamento de campo ou observações atuais para a validação ou verificação do terreno, mesmo quando o foco principal do trabalho foi a modelagem. Apesar

desses esforços, não há ainda uma estrutura clara para validação dos índices, sobretudo, devido às diferentes abordagens e objetivos de pesquisa.

Nessa perspectiva, Brierley *et al.*, (2013) propôs uma abordagem de análise geomórfica de sistemas fluviais, baseada em campo por meio de um procedimento em quatro etapas para ler a paisagem e gerar entendimentos locais de sistemas fluviais, consistindo na identificação das unidades geomórficas, interpretação das relações processo-forma, incidindo também na análise, interpretação e explicação dos controles no conjunto de formas de relevo na escala de alcance e como eles se ajustam ao longo do tempo, além da integração desses

entendimentos na escala de captação para interpretar padrões de conectividade e a trajetória evolutiva do rio. Os autores destacam que examinar as ligações (conectividade) entre compartimentos da paisagem é necessário para interpretar as relações espaciais dentro do sistema.

Para facilitar a compreensão das diferentes abordagens utilizadas na análise da conectividade hidrossedimentológica, o quadro a seguir apresenta uma síntese cronológica de alguns modelos e índices, indicando seus objetivos e autores que os aplicaram. Ressalta-se que se trata apenas de exemplos selecionados utilizados neste artigo, não constituindo uma listagem exaustiva de todos os modelos ou pesquisadores na área (Quadro 1).

Quadro 1 - Exemplos cronológicos de modelos e índices aplicados à análise da conectividade hidrossedimentológica em bacias hidrográficas, com seus objetivos e alguns dos autores que os utilizaram

Ano / Período	Modelo / Índice	Objetivo / Aplicação	Autores
1930–1960	Teoria Difusiva da Turbulência	Avaliar velocidade média do fluxo em córregos; base para modelagem de escoamento	Churuksaeva; Starchenko (2015)
1960–1970	Modelagem Hidrológica inicial	Quantificação e previsão de transporte de água e sedimentos em bacias	Mukharamova <i>et al.</i> , (2018)
1970–2000	Modelos numéricos clássicos de escoamento e transporte de sedimentos	Representação de processos hidrológicos e erosão em bacias	Cao; Carling (2002)
2001	TOPMODEL	Simulação de escoamento baseado na topografia; análise de conectividade hidrológica	Beven; Freer (2001) Reid <i>et al.</i> , (2007)
2008	IC	Quantificação da conectividade potencial de sedimentos entre compartimentos da paisagem	Borselli <i>et al.</i> , (2008)
2010–2020	SWAT	Avaliar impactos do uso do solo sobre água, sedimentos e nutrientes; análise de cenários	Da Silva <i>et al.</i> , (2018) Dantas <i>et al.</i> , (2015) Martins <i>et al.</i> , (2020)
2014	MIKE 11	Simulação hidrodinâmica unidimensional de profundidade e descarga ao longo dos rios	Karim <i>et al.</i> (2014)
2019–2021	Aplicações de IC e outras variações	Avaliação da conectividade hidrológica e sedimentológica; validação com dados de campo	Zanandrea <i>et al.</i> , (2020, 2021) Najafi <i>et al.</i> , (2021)
2021	TAPES-C	Simulação de fluxo terrestre Hortoniano, saturação e águas subterrâneas rasas	Sidle (2021)

Fonte: Os autores (2025).

CONECTIVIDADE: PERSPECTIVAS E DESAFIOS ATUAIS – DISCUSSÃO SOBRE AS DIFICULDADES APRESENTADAS

Entender a conectividade aumenta a compreensão dos processos da paisagem, permitindo o desenvolvimento de melhores abordagens de análise e modelagem. As abordagens baseadas na conectividade fornecem o potencial para soluções holísticas e servem diferentes disciplinas (Geomorfologia, Hidrologia, Geologia, Ecologia, Química e Arqueologia). No entanto, em pleno século XXI, os cientistas ainda vêm se esforçando para encontrar melhores meios de quantificar a conectividade no campo da transferência de água e sedimentos (Keesstra *et al.*, 2018).

Apesar dos avanços no desenvolvimento de muitas técnicas para identificar, analisar e quantificar a conectividade, os desafios referentes à implementação e avaliação dos modos de aplicação em ambientes específicos ou problemas de pesquisas ainda permanecem. Os dois principais índices de conectividade se mostram mais adequados em diferentes ambientes, por exemplo, o índice do Borselli (2008) para ambientes vegetados e o do Cavalli (2013) para superfície de rochas afloradas e ambientes montanhosos (Hooke; Souza, 2021).

Nesse caso, o índice do tipo de rugosidade do Cavalli (2013) subestima os efeitos da vegetação, que mesmo se estiver esparsa, pode influenciar significativamente na conectividade a depender do tipo de paisagem. O uso do limite de inclinação (introduzido no modelo do Cavalli) não é recomendado para áreas vegetadas. Por conseguinte, os índices de conectividade refletem o tipo de área em que foram desenvolvidos, por isso, é preciso ter cuidado ao aplicá-los em diferentes áreas (Hooke *et al.*, 2021). Avanços mais recentes têm buscado superar essas limitações, como o modelo proposto por Zanandrea *et al.*, (2021) que incorpora métricas de multiescala e maior sensibilidade a diferentes tipos de cobertura do solo, embora ainda apresente restrições em ambientes heterogêneos. De forma semelhante, Kalantari *et al.*, (2017) desenvolveram indicadores que integram propriedades hidrológicas do solo, enquanto López-Vicente e Ben-Salem (2019) propuseram abordagens probabilísticas que ampliam a representação da variabilidade espacial — ambos contribuindo para maior robustez, mas ainda dependentes de condições específicas de calibração.

Os estudos recentes sobre o uso de índices e modelos de conectividade destacam uma série de

desafios e limitações. Heckmann *et al.*, (2018) enfatizam a dificuldade de medir diretamente a transferência de sedimentos, a necessidade de prever o comportamento de sistemas geomórficos em áreas sem dados disponíveis e a dependência de condições específicas de calibração. Oliveira, Nero e Macedo (2024) recomendam a inclusão de mais parâmetros funcionais e o aprimoramento da representação da rugosidade superficial, destacando que o uso de dados geomorfológicos, especialmente a partir de modelos digitais de elevação, oferece resultados mais precisos quando associados a imagens de drones e processos fotogramétricos de alta resolução, embora haja limitações quanto à capacidade computacional e ao tempo de processamento. Zanandrea *et al.*, (2021) apontam como limitações do índice o uso de valores tabelados dependentes do conhecimento do usuário, a falta de representação da interação entre componentes estruturais e funcionais e a impossibilidade de quantificar a quantidade real de sedimento disponível, indicando apenas a probabilidade de maior transporte em comparação a outros eventos.

Além disso, Batista *et al.*, (2021) ressaltam a dificuldade de aplicação em áreas heterogêneas e a dependência de parâmetros hidrológicos e geomorfológicos bem calibrados. Moreno-de-las-Heras *et al.*, (2020) complementa, apontando que a avaliação da conectividade funcional ainda é limitada, sendo muitas análises restritas à conectividade estrutural e dependentes de observações de campo para validação.

De maneira geral, um dos principais desafios na avaliação e quantificação da conectividade é a verificação de existência de ligações entre as unidades de cada parte do sistema, para saber se está conectada ou não. Além disso, as características de escalas mais detalhadas podem ter um grande efeito nos resultados, a exemplo de pequenos declives ou de meios-fios em áreas urbanas. A incógnita desafiadora é como resolver o dilema que envolve as grandes áreas e a necessidade de maior detalhamento, ou seja, a obtenção de imagens de ampla cobertura espacial com alta resolução, pois os problemas de escala espacial são intrigantes considerando as condições do mapeamento ou validação. No mais, a maioria das análises dos padrões de conectividade são estruturais, porém, análises funcionais são as que mais realmente importam em muitos casos. Logo, é necessário conhecer as características dos elementos desconectantes, portanto, os limites para a desconexão precisam ser identificados (Hooke; Souza, 2021).

Quadro 2 - Pontos positivos e negativos dos índices de conectividade (IC)

Autor(es)	Abordagem	Pontos positivos	Principais limitações
Borselli <i>et al.</i> , (2008)	IC clássico	Simples, amplamente utilizado, eficiente para estimar conectividade potencial	Sensível à resolução; não representa processos funcionais; não considera a dinâmica hidrológica nem a variabilidade de eventos de chuva
Cavalli <i>et al.</i> , (2013)	IC com rugosidade	Adequado para áreas montanhosas e superfícies expostas	Subestima vegetação; limiar de inclinação pouco aplicável em áreas vegetadas
Zanandrea <i>et al.</i> , (2021)	IHC	Integra temporalidade e condições hidrológicas, aproxima dinâmica real de sedimentos	Uso de valores tabelados dependente do conhecimento do usuário; não representa interação física entre componentes; não quantifica sedimento disponível
Heckmann <i>et al.</i> , (2018)	Aplicações de IC	Fornecer estimativas de conectividade potencial em áreas sem dados diretos	Dificuldade de medir diretamente a transferência de sedimentos; dependência de calibração e condições específicas
Moreno-de-las-Heras <i>et al.</i> , (2020)	Conectividade estrutural/funcional	Combina padrões espaciais e processos; eficaz em encostas secas	Exige observações de campo; difícil representar processos funcionais
Batista <i>et al.</i> , (2021)	Aplicações de IC	Pode ser aplicado para identificar áreas críticas de erosão	Aplicação limitada em áreas heterogêneas; dependência de parâmetros bem calibrados

Fonte: Os Autores (2025).

O quadro apresentado sintetiza pontos positivos e negativos identificados em alguns estudos recentes sobre índices de conectividade (IC), sem a pretensão de esgotar todas as abordagens disponíveis na literatura (Quadro 2). Ainda assim, ele oferece uma visão comparativa útil sobre potencialidades, limitações e requisitos metodológicos desses modelos, auxiliando na escolha das ferramentas mais adequadas para diferentes contextos hidrossedimentológicos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como propósito realizar um levantamento teórico sobre o conceito de conectividade, considerando suas múltiplas terminologias, perspectivas disciplinares e aplicações em diferentes abordagens e modelos. As categorias hidrológica, sedimentar e hidrossedimentológica foram discutidas sob os enfoques estrutural e funcional da paisagem, possibilitando compreender o comportamento dos fluxos de energia e matéria nas dimensões lateral, vertical e longitudinal.

A sazonalidade climática revelou-se um fator determinante na conectividade e nas respostas hidrológicas, pois a precipitação regula a dinâmica do escoamento e dos processos geomorfológicos. Entre os modelos de

conectividade, o IC de Borselli *et al.*, (2008) e sua adaptação por Cavalli *et al.*, (2013) não incluem precipitação, pois se baseiam apenas em atributos geomorfológicos. Já outros avanços passaram a considerar essa variável: Zanandrea *et al.*, (2021) incorporam chuva acumulada e intensidade em cenários de resposta hidrossedimentológica; Kalantari *et al.*, (2017) utilizam precipitação em modelos hidrológicos acoplados; e López-Vicente e Ben Salem (2019) incluem parâmetros relacionados à erosividade dependente de chuva. Assim, a inclusão da precipitação varia entre os modelos, sendo mais comum em abordagens hidrológicas do que nos índices puramente estruturais. Em ambientes úmidos, há maior continuidade e previsibilidade dos fluxos, enquanto nos ambientes semiáridos, a irregularidade, frequência e magnitude dos eventos chuvosos exercem controle dominante sobre o transporte de sedimentos e a conectividade do sistema. Em regiões áridas de altas latitudes, o degelo sazonal de áreas montanhosas e planálticas constitui a principal fonte de recarga hídrica, evidenciando contrastes espaciais e temporais significativos entre os tipos de ambiente.

A diversidade de modelos computacionais disponíveis para análise da conectividade exige cautela na escolha e aplicação, pois cada modelo apresenta limitações e maior adequação a determinadas condições naturais e objetivos de pesquisa. Assim, o conhecimento prévio da área estudada é essencial para a correta parametrização e identificação dos limites de desconexão. Ainda assim, as observações de campo permanecem fundamentais para validar, calibrar e ajustar os modelos teóricos, assegurando interpretações mais realistas dos processos de transmissão e retenção de fluxos na paisagem.

Em síntese, a conectividade se consolida como um conceito-chave para integrar os estudos hidrológicos, sedimentológicos e geomorfológicos, especialmente em contextos de mudanças climáticas e intensificação das pressões antrópicas. Futuras pesquisas devem avançar na quantificação e modelagem integrada da conectividade em múltiplas escalas, associando dados de campo, sensoriamento remoto e modelagem espacial, de modo a aprimorar a compreensão dos processos fluviais e suas implicações para a gestão e conservação das bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, C. C.; BRASIL, M. C. O.; MATEUS, N. P. A.; MACEDO, D. R.; RIBEIRO, S. M. C. Estimativa do Número da Curva (CN) e sua adaptação ao contexto das Paisagens Mineiras. **Labor & Engenho**, v. 15, p. 1–13, 2024. <https://doi.org/10.20396/labore.v18i00.8673566>
- ALLEN, C. D. Chapter 2. Why Fieldwork? **Developments in Earth Surface Processes**, v. 18, n. 2006, p. 11-29, 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63402-3.00002-9>
- ALMEIDA, J. D. M. DE; CORREA, A. C. D. B. Conectividade Da Paisagem E A Distribuição De Plainos Aluviais Em Ambiente Semiárido. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 1, p. 171-183, 2020. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i1.1663>
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.
- ARAÚJO, L. F.; CIRILO, J. A.; SILVA, J. B.; OLIVEIRA, D. S. Aplicação da Modelagem Hidrológica na Gestão dos Recursos Hídricos: Uma Revisão Sistemática. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 04, p. 3095–3108, 2024. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.4.p3084-3098>
- AYSHA, A.; FAHIM, S. Hydrological modeling of the selected flash flood-prone rivers. **Natural Hazards**, v. 121, p. 3997–4021, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06928-z>
- BAARTMAN, J. E. M.; NUNES, J. P.; MASSELINK, R.; DARBOUX, F.; BIELDERS, C.; DEGRÉ, A.; CANTREUL, V.; CERDAN, O.; GRANGEON, T.; FIENER, P.; WILKEN, F.; SCHINDEWOLF, M.; WAINWRIGHT, J. What do models tell us about water and sediment connectivity? **Geomorphology**, v. 367, art. 107300, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107300>
- BATISTA, P. V. G.; FIENER, P.; SCHEPER, S.; ALEWELL, C. A conceptual-model-based sediment connectivity assessment for patchy agricultural catchments. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 26, p. 1–32, 2021. <https://doi.org/10.5194/hess-2021-231>
- BENNETT, A.; NIJSSEN, B.; OU, G.; CLARK, M.; NEARING, G. Quantifying Process Connectivity With Transfer Entropy in Hydrologic Models. **Water Resources Research**, v. 55, n. 6, p. 4613-4629, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018WR024555>

- BEVEN, K.; FREER, J. A dynamic topmodel. **Hydrological Processes**, v. 15, n. 10, p. 1993-2011, 2001. <https://doi.org/10.1002/hyp.252>
- BEVEN, K.; KIRKBY, A. Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Bulletin**, 24, p. 43-69, 1979. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667909491834>
- BIONDI, D.; FRENI, G.; IACOBELLIS, V.; MASCARO, G.; MONTANARI, A. Validation of hydrological models: Conceptual basis, methodological approaches and a proposal for a code of practice. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 42-44, p. 70-76, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.037>.
- BLANTON, P.; MARCUS, W. A. Transportation infrastructure, river confinement, and impacts on floodplain and channel habitat, Yakima and Chehalis rivers, Washington, U.S.A. **Geomorphology**, v. 189, p. 55-65, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.01.016>
- BORSELLI, L.; CASSI, P.; TORRI, D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. **Catena**, v. 75, n. 3, p. 268-277, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- BOULTON, A. J.; ROLLS, R. J.; JAEGER, K. L.; DATRY, T. Hydrological Connectivity in Intermittent Rivers and Ephemeral Streams. In: THIBAUT DATRY, NÚRIA BONADA, A. B. (Ed.). Intermittent Rivers and Ephemeral Streams: Ecology and Management. **Academic Press**, p. 79-108, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803835-2.00004-8>
- BRACKEN, L. J.; WAINWRIGHT, J.; ALI, G. A.; TETZLAFF, D.; SMITH, M. W.; REANEY, S. M.; ROY, A. G. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, Pathways and future agendas. **Earth-Science Reviews**, v. 18, p. 11-29, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.001>
- BRACKEN, L. J.; TURNBULL, L.; WAINWRIGHT, J.; BOGAART, P. Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 40, n. 2, p. 177-188, 2015. <https://doi.org/10.1002/esp.3635>
- BRACKEN, L. J.; CROKE, J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 13, p. 1749-1763, 2007. <https://doi.org/10.1002/hyp.6313>
- BRACKEN, L. J.; WAINWRIGHT, J. Geomorphological equilibrium: Myth and metaphor? **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 31, n. 2, p. 167-178, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1475-5661.2006.00204.x>
- BRIERLEY, G.; FRYIRS, K.; BLUE, B. Reading the landscape: Integrating the theory and practice of geomorphology to develop place-based understandings of river systems. **Progress in Physical Geography**, v. 37, n. 5, p. 601-621, 2013. <https://doi.org/10.1177/0309133313490007>
- BRIERLEY, G.; FRYIRS, K.; JAIN, V. Landscape connectivity: The geographic basis of geomorphic applications. **Area**, v. 38, n. 2, p. 165-174, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2006.00671.x>
- CADOL, D.; WINE, M. L. Geomorphology as a first order control on the connectivity of riparian ecohydrology. **Geomorphology**, v. 277, p. 174-170, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.022>
- CAO, Z.; CARLING, P. A. Mathematical modelling of alluvial rivers: reality and myth. Part 1: General review. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - **Water and Maritime Engineering**, v. 154, n. 3, p. 207-219, 2002. <https://doi.org/10.1680/wame.2002.154.3.207>
- CAVALLI, M.; TREVISANI, S.; COMITI, F.; MARCHI, L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. **Geomorphology**, v. 188, p. 31-41, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>
- CAVALLI, M.; VERICAT, D.; PEREIRA, P. Mapping water and sediment connectivity. **Science of the Total Environment**, v. 673, p. 763-767, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.071>
- CHURUKSAEVA, V.; STARCHENKO, A. Mathematical Modeling of a River Stream Based on a Shallow Water Approach. **Procedia Computer Science**, v. 66, p. 200-209, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.11.024>
- COVINO, T. Hydrologic connectivity as a framework for understanding biogeochemical flux through watersheds and along fluvial networks. **Geomorphology**, v. 277, p. 133-144, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.030>

- DA SILVA, R. M.; DANTAS, J. C.; BELTRÃO, J. A.; SANTOS, C. A. G. Hydrological simulation in a tropical humid basin in the cerrado biome using the SWAT model. **Hydrology Research**, v. 49, n. 3, p. 908-923, 2018. <https://doi.org/10.2166/nh.2018.222>
- DANTAS, J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. M.; VIANNA, P. C. G. Simulação vazão-erosão usando o modelo SWAT para uma grande bacia da região semiárida da paraíba. **Geociências**, v. 34, n. 4, p. 816-827, 2015.
- DWIVEDI, D.; POEPPL, R. E.; WOHL, E. Hydrological connectivity: a review and emerging strategies for integrating measurement, modeling, and management. **Frontiers in Water**, v. 7, art. 1496199, 2025. <https://doi.org/10.3389/frwa.2025.1496199>
- FRYIRS, K. (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 1, p. 30-46, 2013. <https://doi.org/10.1002/esp.3242>
- FRYIRS, K. A.; BRIERLEY, G. R.; PRESTON, N. J.; KASAI, M. Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. **Catena**, v. 70, n. 1, p. 49-67, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.07.007>
- FRYIRS, K. A.; BRIERLEY, G. J. **Geomorphic Analysis of River Systems: An Approach to Reading the Landscape**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2012. <https://doi.org/10.1002/9781118305454>
- GOUDARZI, S.; MILLEDGE, D.; HOLDEN, J. A Generalized Multistep Dynamic (GMD) TOPMODEL. **Water Resources Research**, v. 59, n. e2022WR032198, p. 1-27, 2023. <https://doi.org/10.1029/2022WR032198>
- HECKMANN, T.; CAVALLI, M.; CERDAN, O.; FOERSTER, S.; JAVAUX, M.; LODE, E.; SMETANOVÁ, A.; VERICAT, D.; BRARDINONI, F. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. **Earth-Science Reviews**, v. 184, p. 77-108, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.004>
- HOOKE, J. Coarse sediment connectivity in river channel systems: A conceptual framework and methodology. **Geomorphology**, v. 56, n. 1-2, p. 79-94, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00047-3)
- HOOKE, J.; SOUZA, J. Challenges of mapping, modelling and quantifying sediment connectivity. **Earth-Science Reviews**, v. 223, art. 103847, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103847>
- HOOKE, J.; SOUZA, J.; MARCHAMALO, M. Evaluation of connectivity indices applied to a Mediterranean agricultural catchment. **Catena**, v. 207, art. 105713, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105713>
- KALANTARI, Z.; CAVALLI, M.; CANTONE, C.; CREMA, S.; DESTOUNI, G. Flood probability quantification for road infrastructure: Data-driven spatial-statistical approach and case study applications. **Science of The Total Environment**, v. 581-582, p. 386-398, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.147>
- KARIM, F.; KINSEY-HENDERSON, A.; WALLACE, J.; GODFREY, P.; ARTHINGTON, A. H.; PEARSON, R. G. Modelling hydrological connectivity of tropical floodplain wetlands via a combined natural and artificial stream network. **Hydrological Processes**, v. 28, p. 5696-5710, 2014. <https://doi.org/10.1002/hyp.10065>
- KEESSTRA, S.; NUNES, J. P.; SACO, P.; PARSONS, T.; POEPPL, R.; MASSELINK, R.; CERDÀ, A. The way forward: Can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics? **Science of the Total Environment**, v. 644, p. 1557-1572, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.342>
- LIMA, J. DA S.; NUNES, D. D.; CHECCHIA, T. E. Aplicação do modelo SWAT como ferramenta para análises hidrossedimentológicas na bacia hidrográfica do Rio Mutum Paraná – RO. **Geosul**, v. 36, n. 78, 2021. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2021.e66199>
- LÓPEZ-VICENTE, M.; BEN-SALEM, N. Computing structural and functional flow and sediment connectivity with a new aggregated index: A case study in a large Mediterranean catchment. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 179-191, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.170>
- LUJANO, E.; DIAZ, R. D.; LUJANO, R.; SANCHEZ-DELGADO, M.; LUJANO, A. Hydrological performance of gridded meteorological products in Peruvian Altiplano basins. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 30, n. 2318-0331, e10, 2025. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.302520240068>
- MARTINS, L. L.; MARTINS, W. A.; MORAES, J. F. L.; JÚNIOR, M. J. P.; MARIA, I. C. Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbfg.v13.2.p576-594>

- MORENO-DE-LAS-HERAS, M.; MERINO-MARTÍN, L.; SACO, P. M.; EPIGARES, T.; GALLART, F.; NICOLAU, J. M. Structural and functional control of surface-patch to hillslope runoff and sediment connectivity in Mediterranean dry reclaimed slope systems. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, p. 2855–2872, 2020. <https://doi.org/10.5194/hess-24-2855-2020>
- MUKHARAMOVA, S. S.; YERMOLAEV, O. P.; VEDENEEVA, E. A. Modern Approaches to Mathematical Modeling of River Runoff in the Territory of the European Part of Russia. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, v. 107, art. 012017, 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012017>
- NAJAFI, S.; DRAGOVICH, D.; HECKMANN, T.; SADEGHI, S. H. Sediment connectivity concepts and approaches. **Catena**, v. 196, art. 104880, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104880>
- NORTHROP, P. Stochastic Models of Rainfall. **Annual Review of Statistics and Its Application**, v. 11, p. 1–27, 2023. <https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-040622-023838>
- OGDEN, F. L. Geohydrology: Hydrological Modeling. In: ALDERTON, D.; ELIAS, S. (Eds.). **Encyclopedia of Geology**. Second ed. Academic Press, p. 457–476, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00115-6>
- OLIVEIRA, W.; NERO, M. A.; MACEDO, D. Avaliação das principais variáveis que influenciam na conectividade de sedimentos com base em modelos aplicados. **Geosp**, v. 28, p. 1–19, 2024. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2024.196088>
- OUATIKI, H. BOUDHAR, A.; OUHINOU, A.; BELJADID, A.; LEBLANC, M.; CHEHBOUNI, A. Sensitivity and Interdependency Analysis of the HBV Conceptual Model Parameters in a Semi-Arid. **Water**, v. 12, p. 2440, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12092440>
- POEPPL, R. E.; FRYIRS, K. A.; TUNNICLIFFE, J.; BRIERLEY, G. B. Managing sediment (dis)connectivity in fluvial systems. **Science of the Total Environment**, v. 736, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139627>
- POEPPL, R. E.; KEESSTRA, S. D.; MAROULIS, J. A conceptual connectivity framework for understanding geomorphic change in human-impacted fluvial systems. **Geomorphology**, v. 277, art. 139627, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.033>
- PRINGLE, C. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? **Hydrological Processes**, v. 17, p. 2685–2689, 2003. <https://doi.org/10.1002/hyp.5145>
- REID, S. C.; LANE, S. N.; MONTGOMERY, D. R.; BROOKES, C. J. Does hydrological connectivity improve modelling of coarse sediment delivery in upland environments? **Geomorphology**, v. 90, n. 3–4, p. 263–282, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.023>
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Conceitos básicos de modelagem hidrológica**. Santa Maria: INPE, 33 p., 2008. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf. Acesso em: 19 mar. 2023.
- RINK, K.; FISCHER, T.; SELLE, B.; KOLDITZ, O. A data exploration framework for validation and setup of hydrological models. **Environmental Earth Sciences**, v. 69, n. 2, p. 469–477, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2030-3>
- SALGADO, A. A. R.; SALGADO, L. P. R. Hipóteses, observação e insights na evolução do conhecimento geomorfológico: a importância do trabalho de campo. **Caderno de Geografia**, v. 31, n. 64, p. 64–74, 2020. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2021v31n64p64>
- SCHOPPER, N.; MERGILI, M.; FRIGERIO, S.; CAVALLI, M.; POEPPL, R. Analysis of lateral sediment connectivity and its connection to debris flow intensity patterns at different return periods in the Fella River system in northeastern Italy. **Science of the Total Environment**, v. 658, p. 1586–1600, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.288>
- SIDLE, R. C. Strategies for smarter catchment hydrology models: incorporating scaling and better process representation. **Geoscience Letters**, v. 8, n. 24, p. 24, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40562-021-00193-9>
- SILVA, A. F. P. DE L. **Análise Hidrossedimentológica e Geoquímica dos Ambientes Aluviais da Bacia Riacho do Tigre, Semiárido Paraibano**. João Pessoa: Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, 117 p, 2019.
- SILVA, A. F. P. DE L.; SOUZA, J. O. P. DE. Caracterização Hidrossedimentológica Dos Trechos Aluviais Da Bacia Riacho Do Tigre – PB. **Caminhos de Geografia**, v. 18, n. 63, p. 57–89, 2017. <https://doi.org/10.14393/RCG186303>

- SOUZA, J. O. P. DE; ALMEIDA, J. D. M. DE. PROCESSOS FLUVIAIS EM TERRAS SECAS: UMA REVISÃO. OKARA: **Geografia em debate**, v. 9, n. 1, p. 108-122, 2015.
- SOUZA, J. O. P. DE; CORREA, A. C. B. Conectividade e área de captação efetiva de um sistema fluvial semiárido: bacia do riacho Mulungu, Belém de São Francisco-PE. **Sociedade & Natureza**, v. 24, n. 2, p. 319-332, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132012000200011>
- SOUZA, P. A.; MARÇAL, M. DOS S. Hidrossedimentologia E Conectividade Do Rio Macaé, Norte Do Estado Do Rio De Janeiro, Brasil. **Geo UERJ**, n. 27, p. 176-201, 2015. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2015.16436>
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's Manual**. Version 6.4.1. Davis, CA: Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, 2023. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%20User's%20Manual-v6.4.1.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- WAINWRIGHT, J.; TURNBULL, L.; IBRAHIM, T. G.; LEXARTZA-ARTZA, I.; THORNTON, S. F.; BRAZIER, R. E. Linking environmental regimes, space and time: Interpretations of structural and functional connectivity. **Geomorphology**, v. 126, n. 3-4, p. 387-404, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.027>
- WOHL, E. Connectivity in rivers. **Progress in Physical Geography**, v. 41, n. 3, p. 345-362, 2017. <https://doi.org/10.1177/0309133317714972>
- WOHL, E.; BRIERLEY, G.; CADOL, D.; COULTHARD, T. J.; COVINO, T.; FRYIRS, K. A.; GRANT, G.; HILTON, R. G.; LANE, S. N.; MAGILLIGAN, F. J.; MEITZEN, K. M. Connectivity as an emergent property of geomorphic systems. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 44, n. 1, p. 4-26, 2019. <https://doi.org/10.1002/esp.4434>
- ZANANDREA, F.; PAUL, L. R.; MICHEL, G. P.; KOBİYAMA, M.; ZANINI, A. S.; ABATTI, B. H. Conectividade Dos Sedimentos: Conceitos, Princípios E Aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 2, p. 435-459, 2020. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i2.1754>
- ZANANDREA, F.; MICHEL, G. P.; KOBİYAMA, M.; CENSI, G.; ABATTI, B. H. Spatial-temporal assessment of water and sediment connectivity through a modified connectivity index in a subtropical mountainous catchment. **Catena**, v. 204, art. 105380, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105380>
- ZANANDREA, F.; KOBİYAMA, M.; MICHEL, G. P. Conceitual hydrosedimentological connectivity: a conceptual approach. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., Florianópolis. **Anais [...]**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017. p. 1-8.
- ZANIN, P. R.; BONUMA, N. B.; CORSEUIL, C. W. Hydrosedimentological modeling with SWAT using multi-site calibration in nested basins with reservoirs. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, art. e54, 2018. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170153>

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Adonai Felipe Pereira de Lima Silva: Conceitualização, Pesquisa, Redação do manuscrito original, Análise de dados.
Jonas Otaviano Praça de Souza: Análise de dados, Supervisão, Conceitualização, Redação - revisão e edição.

EDITOR ASSOCIADO: Silvio Carlos Rodrigues. 

DISPONIBILIDADE DE DADOS: Os dados que fundamentam os resultados deste estudo poderão ser disponibilizados pelo autor correspondente, mediante solicitação devidamente justificada. [Adonai Felipe Pereira de Lima Silva].



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.