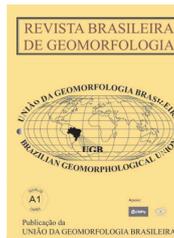


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 21, nº 2 (2020)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i2.1754>



NOTA TÉCNICA

CONECTIVIDADE DOS SEDIMENTOS: CONCEITOS, PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES

SEDIMENT CONNECTIVITY: CONCEPTS, PRINCIPLES AND APPLICATIONS

Franciele Zanandrea

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91509-900. Brasil
ORCID: 0000-0002-4797-1379
E-mail: franciele.zanan@gmail.com*

Leonardo Rodolfo Paul

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91509-900. Brasil
ORCID: 0000-0001-5104-5944
E-mail: leonardorpaul@gmail.com*

Gean Paulo Michel

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91509-900. Brasil
ORCID: 0000-0002-7857-1941
E-mail: gean.michel@ufrgs.br*

Masato Kobiyama

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91509-900. Brasil
ORCID: 0000-0003-0615-9867
E-mail: masato.kobiyama@ufrgs.br*

Aline da Silva Zanini

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91509-900. Brasil
ORCID: 0000-0003-2844-6357
E-mail: aline.s.zanini.az@gmail.com*

Bruno Henrique Abatti

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91509-900. Brasil
ORCID: 0000-0003-0973-4783
E-mail: bruno_abatti@hotmail.com*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
17/10/2019

Aceito (Accepted):
05/12/2019

Palavras-chave:

Conectividade; Hidrogeomorfologia; Hidrossedimentologia; Índice de conectividade.

Keywords:

Connectivity; Hydrosedimentology; Hydrogeomorphology; Connectivity Index.

Resumo:

A conectividade de sedimentos pode ser entendida como a transferência de sedimentos entre diferentes compartimentos da paisagem através das relações entre seus componentes. Isso ocorre, principalmente, por meio da interação entre processos hidrológicos e sedimentológicos, os quais, por sua vez, são controlados por características geomorfológicas. O tema vem se tornando fundamental para o entendimento da dinâmica dos sedimentos em uma bacia hidrográfica, pois avalia a transferência dos sedimentos de maneira integrada e inovadora, considerando diferentes processos e características, diferindo das demais metodologias de estudo da dinâmica da paisagem. Consequentemente, muitas metodologias diferentes foram desenvolvidas em todo o mundo para avaliar a conectividade de maneira quantitativa e qualitativa. No entanto, entre esses estudos, diferentes terminologias foram adotadas. Grande parte das metodologias avalia a conectividade dos sedimentos a partir de aspectos estruturais (geomorfológicos) que distribuem no espaço as relações entre os

componentes do sistema. Atualmente, são sugeridas abordagens utilizando aspectos funcionais (hidrológicos), que trazem dependência temporal para a conectividade. Entretanto, poucas metodologias inseriram as características do próprio sedimento nesta avaliação. Em relação aos estudos brasileiros, poucas investigações sobre conectividade foram realizadas, surgindo a necessidade de trabalhos considerando as características físicas das bacias brasileiras. A partir disso, a presente revisão discute, inicialmente, os diferentes conceitos de conectividade utilizados atualmente. Em seguida, resume e discute as metodologias desenvolvidas para avaliar a conectividade dos sedimentos, destacando as propriedades estruturais e funcionais relevantes para o estudo da conectividade. Adicionalmente, estudos de conectividade desenvolvidos em território brasileiro são apresentados. Conclui-se que, somente a partir de estudos que levem em conta a interação entre geomorfologia, hidrologia e sedimentologia, será possível uma avaliação integral da conectividade dos sedimentos. Ademais, a conectividade se apresenta como uma potencial ferramenta para o gerenciamento de bacias hidrográficas, trazendo avanços no entendimento da dinâmica dos sedimentos e, consequentemente, na evolução da paisagem.

Abstract:

Sediment connectivity can be understood as the sediment delivery between different landscape compartments through the linkage of its components. This linkage occurs by hydrological and sedimentological processes interaction, which are controlled by geomorphological attributes. Connectivity is becoming essential for the understanding of sediment dynamic processes at catchment level, assessing sediment delivery in an integrated and novel way, considering different processes and landscape characteristics to route the sediment from the source to a sink. Consequently, different methodologies, both qualitative and quantitative, were developed around the worlds to assess connectivity. However, among these studies different terminologies were utilized. Most methodologies assess sediment connectivity utilizing structural (geomorphological) features, spatializing system components coupling relationships. Currently, some functional (hydrological) methodologies were created, introducing connectivity temporal dependence. However, few methodologies consider sediment attributes. In the regard of Brazilian studies, few connectivity investigations were undertaken. Therefore, more investigations considering Brazilian basins physiographic characteristics are necessary. Thus, this review discusses currently utilized sediment connectivity concepts. Then, summarizes and discusses developed methodologies for sediment connectivity assessment, highlighting relevant structural and functional properties. Additionally, connectivity studies developed in Brazil are shown. It's concluded that sediment connectivity assessment can only be whole through the study of geomorphology, hydrology and sedimentology interaction. Also, connectivity is a potential tool for catchment management, contributing in the understanding of sediment dynamics and landscape evolution.

1. Introdução

Um conceito que vem sendo muito utilizado na avaliação da dinâmica dos sedimentos é a conectividade, que descreve a eficiência da transferência de material entre componentes da paisagem, como encostas e rios e/ou segmentos longitudinais, dentro de uma rede fluvial (WOHL *et al.*, 2018). Devido à importância das características geomorfológicas, que controlam a ligação entre os compartimentos da paisagem, a geomorfologia tem sido a principal área considerada nos estudos sobre a conectividade dos sedimentos.

A conectividade aparece definida pela primeira vez em 1984, dentro das áreas ambientais relatada por Merriam (1984), ao estudar a interação entre as espécies e a estrutura da paisagem, com ênfase no fluxo entre habitats. Considerando que o fluxo de água é um importante processo que ocorre em meio natural, Pringle (2001) tratou pela primeira vez da conectividade hidrológica como a transferência de matéria, energia e organismos entre ou dentro de elementos do ciclo hidrológico através da água. Uma das importantes matérias que têm sua transferência efetivada através do fluxo de água é o sedimento, o que comumente é chamado de conectividade de sedimentos (*sediment connectivity* – SC).

O estudo da conectividade de sedimentos é um tema que vem crescendo no mundo (BRACKEN *et al.*, 2015). Heckmann *et al.* (2018) relatam que a conectividade dos sedimentos é um dos principais pilares da construção da geomorfologia moderna, auxiliando tanto em questões científicas básicas, como em questões aplicadas. No cenário atual da pesquisa mundial, essa abordagem vem sendo tratada por meio do estabelecimento de índices de conectividade de sedimentos (BORSSELLI *et al.*, 2008) ou sedimentológica (GUMIERE *et al.*, 2011). Um dos primeiros trabalhos aplicados nesse tema foi o de Borselli *et al.* (2008), que propôs um índice de conectividade de sedimentos que, a partir de então, desencadeou diversas pesquisas no assunto. No entanto, de maneira teórica, o tema já foi discutido anteriormente em diversos trabalhos (HOOKE, 2003; BRIERLEY; FRYIRS; JAIN, 2006; BRACKEN; CROKE, 2007; FRYIRS *et al.*, 2007a, b; REID *et al.*, 2007).

A conectividade de sedimentos trata do grau de ligação entre os diferentes compartimentos da paisagem que controlam a transferência de sedimentos (CAVALLI *et al.*, 2013). Quando o vetor de transferência desses sedimentos é a água, pode-se chamar de conectividade

hidrossedimentológica (ZANANDREA *et al.*, 2017). Em uma abordagem similar, Tarolli *et al.* (2017) entendem como conectividade hidrogeomorfológica a transferência superficial de água e sedimento ao longo da paisagem. Assim, os conceitos de conectividade hidrológica, de sedimentos, hidrossedimentológica e hidrogeomorfológica apresentados possuem diversas interfaces, justamente por isso podem ser confundidos em algumas situações. Com intuito de evitar possíveis equívocos, faz-se necessária a abordagem teórica destes conceitos. Para uma melhor compreensão das conectividades, é necessário o conhecimento da variedade de técnicas e abordagens sobre o tema, visto a diversidade de interpretações dos pesquisadores que abordam o conceito sobre diferentes perspectivas.

Muitos pesquisadores tratam da conectividade hidrossedimentológica como conectividade de sedimentos e água (LÓPEZ-VICENTE; BEN-SALEM, 2019; LÓPEZ-VICENTE *et al.*, 2013; TURNBULL; WAINWRIGHT, 2019; ZINGARO *et al.*, 2019; WOHL *et al.*, 2017; WOHL *et al.*, 2019), visto que o termo hidrossedimentologia não é muito utilizado internacionalmente (ZANANDREA *et al.*, 2017). Para efeitos de padronização, esses trabalhos serão tratados como conectividade hidrossedimentológica, considerando que o termo ainda não foi difundido fora do Brasil. O entendimento teórico da conectividade foi apresentado por diversos pesquisadores, principalmente europeus e norte-americanos, nos últimos anos sob uma perspectiva geomorfológica (LEXARTZA-ARTZA; WAINWRIGHT, 2009; BRACKEN *et al.*, 2015; WOHL, 2017; WOHL *et al.*, 2019; HECKMANN *et al.*, 2018), principal área que vem abordando este tema. Portanto, surge a necessidade da discussão também sob uma perspectiva da hidrogeomorfologia, visto que, principalmente no Brasil, o maior vetor de conectividade é a água.

A conectividade tem se apresentado como peça chave para o entendimento da dinâmica de sedimentos em bacias hidrográficas e vem sendo tratada como uma propriedade emergente do sistema, representando a continuidade de um ponto da paisagem no tempo (HECKMANN *et al.*, 2018; WOHL *et al.*, 2019). Logo esse tema torna-se de grande relevância também no contexto do Brasil, pois existem diferentes características das bacias hidrográficas brasileiras; e poucos trabalhos têm abordado este tema no país. Portanto, o presente trabalho propõe realizar uma revisão da conectividade com base nos conceitos, princípios e aplicações relacionados

aos sedimentos, além de trazer um enfoque nos trabalhos realizados no Brasil.

2. Histórico e Conceitos

Uma característica diretamente relacionada à conectividade é o acoplamento entre os componentes da paisagem. Brunsdon e Thornes (1979) trataram do acoplamento encosta-canal em seu artigo sobre a sensibilidade e as mudanças da paisagem. Como continuação, Brunsdon (1993) descreveu o acoplamento como um aspecto da resistência estrutural da paisagem, e definiu três estados de acoplamento: não acoplados, acoplados e desacoplados. Segundo Harvey (2001), as unidades da paisagem não acopladas não possuem ligações entre elas; unidades de paisagem acopladas têm livre transferência de matéria e energia, como a água e os sedimentos, entre elas; unidades de paisagem desacopladas já foram acopladas, porém, como resultado da deposição, se tornaram desacopladas. A partir desses conceitos, pode-se observar a origem do conceito de conectividade, tratada pela primeira vez na ecologia por Merriam (1984).

Na ecologia, a conectividade representa o grau de ligação entre os componentes da paisagem, o que facilita ou impede o movimento de organismos (TISCHENDORF; FAHRIG, 2000), e considera os rios como meios de conexão entre diferentes compartimentos. A conectividade fluvial (*riverine connectivity*) refere-se à transferência de energia pela paisagem fluvial (WARD, 1997). A partir desse conceito, Pringle (2001) tratou pela primeira vez da conectividade hidrológica e, então, Pringle (2003) e Tetzlaff *et al.* (2007) relacionaram a relevância da conectividade hidrológica na ecologia da paisagem, pois a água serve, muitas vezes, como vetor de transporte para fauna e flora.

A conectividade hidrológica auxilia no entendimento dos processos que ocorrem na fase terrestre do ciclo hidrológico, podendo descrever o grau de acoplamento entre esses diferentes componentes (MICHAELIDES; CHAPPELL, 2009). Segundo Bracken e Croke (2007), a conectividade hidrológica é a passagem da água entre componentes da paisagem e sua resposta no escoamento da bacia hidrográfica. Assim, a conectividade hidrológica influencia os processos biológicos e a transferência de água e sedimentos (MICHAELIDES; CHAPPELL, 2009).

Com isso, o conceito de conectividade foi adotado também para tratar da transferência dos sedimentos entre os componentes da paisagem a partir de determinadas zonas para outros locais, considerando o potencial de

uma partícula em se mover pelo sistema (HOOKE, 2003). Observa-se que alguns trabalhos abordaram a transferência de sedimentos na descrição de conectividade hidrológica (e.g. HOOKE, 2003; CROKE *et al.*, 2005; BRACKEN; CROKE, 2007; TETZLAFF *et al.*, 2007), considerando unificadamente a água e os sedimentos. Isso também pode ser visto de maneira implícita na primeira definição de conectividade hidrológica, pois Pringle (2001) trata da transferência de matéria, o que abrange os sedimentos. A expressão conectividade de sedimentos aparece com Borselli *et al.* (2008) em uma abordagem puramente geomorfológica, na qual questões hidrológicas não são avaliadas. Posteriormente, Bracken *et al.* (2015) trazem a definição de conectividade de sedimentos como a transferência física de uma fonte ao longo da bacia hidrográfica desde a desagregação ao transporte dos sedimentos, controlada pela forma como se dá esse movimento entre diferentes zonas da paisagem.

Diferentes vetores podem ser responsáveis por esse movimento, tais como vento, gravidade, geleiras, água ou animais (PETERS *et al.*, 2008; BRACKEN *et al.* 2015). Em regiões de precipitações bem distribuídas ao longo do ano, como em diversas regiões do Brasil, essa transferência ocorre principalmente pela água, que desloca esse material em diferentes escalas temporais e espaciais. Dessa maneira, Zanandrea *et al.* (2017) definiram a conectividade hidrossedimentológica como a transferência integrada de sedimentos por toda a bacia, de qualquer fonte possível para determinado ponto de controle em um sistema em que o vetor de transporte é a água. A conectividade de sedimentos tem grande proximidade com o conceito de conectividade hidrossedimentológica, a qual também foi mencionada como conectividade de vazão e sedimentos (*flow and sediment connectivity - FSC*) (LÓPEZ-VICENTE; BEN-SALEM, 2019). Nesse contexto, Thomaz e Peretto (2016) trazem pela primeira vez o termo conectividade hidrogeomorfológica, aprofundado posteriormente por Tarolli *et al.* (2017).

Os processos que determinam a conectividade dos sedimentos estão relacionados com a interação da estrutura geomorfológica da paisagem e os componentes da conexão, como o fluxo de energia e o vetor de transporte, dependendo também do tipo de material, controlando o comportamento do fluxo de sedimentos que se manifesta na forma de relevo (PRESTON; SCHMIDT, 2003; BRACKEN *et al.*, 2013; BRACKEN *et al.*, 2015). Assim, percebe-se que conectividade de sedimentos, conectividade hidrológica, conectividade

hidrogeomorfológica e conectividade hidrossedimentológica apresentam diferenças.

Observa-se que ainda existe dificuldade na conceitualização da conectividade, principalmente devido a sua subjetividade no mundo. Muitos pesquisadores definem a conectividade dos sedimentos a partir do vetor de transferência, como no caso da conectividade hidrológica (PRINGLE, 2001; HOOKE, 2003; CROKE *et al.*, 2005; BRACKEN; CROKE, 2007; TETZLAFF *et al.*, 2007) e da conectividade hidrogeomorfológica (TAROLLI *et al.*, 2017); outros definem pelo material transferido, como na

conectividade de sedimentos (BORSELLI *et al.*, 2008; CAVALLI *et al.*, 2013; BRACKEN *et al.*, 2015), ou ainda, pela interação do vetor e do material transferido como na conectividade hidrossedimentológica (ZANANDREA *et al.*, 2017). Pode-se então classificar os tipos de conectividade dos sedimentos pelos fatores que regem sua transferência, pois o sedimento pode se movimentar ao longo da paisagem de diferentes maneiras. A Tabela 1 apresenta os tipos de conectividade de acordo com seus fatores e cita alguns dos processos e das características envolvidas em cada tipo de transferência dos sedimentos.

Tabela 1: Tipos, fatores e processos/características das diferentes formas de conectividade dos sedimentos.

	Tipos	Fatores	Processos/Características
CONECTIVIDADE DOS SEDIMENTOS	Geomorfológica	Paisagem	Relevo, nível de base, litologia, pedologia, densidade de drenagem, entre outras.
	Hidrológica/ Hidrossedimentológica	Água	Chuva, escoamento superficial, escoamento subsuperficial, escoamento subterrâneo, movimentos de massa úmido, entre outras.
	Biológica	Fauna	Migração de espécies, atividades de espécies escavadoras, barreiras de origem animal, entre outras.
	Eólica	Vento	Arraste, saltação, suspensão, entre outras.
	Antrópica	Atividade humana	Estradas, construção de barreiras, uso do solo, modificações em encostas e canais, entre outras.
	Glacial	Gelo	Degelo, congelamento, entre outras.
	Tectônica	Movimentação de placas tectônicas	Vulcanismo, tsunamis, terremotos, movimentos de massa seco, entre outras.

A geomorfologia representa a peça chave no entendimento da conectividade, interagindo com outros tipos de conectividade, pois todos os vetores de transferência têm seu percurso vinculado à paisagem. Brierley *et al.* (2006) destacaram a importância da abordagem da conectividade na bacia hidrográfica como chave no gerenciamento ambiental, destacando que as relações espaciais determinam padrões e taxas de fluxo de água, sedimentos e nutrientes. Essa dinâmica influencia os processos biofísicos que afetam a disponibilidade e viabilidade dos recursos, habitats e de várias funções biogeoquímicas.

3. Abordagens sobre o entendimento da Conectividade dos Sedimentos

A conectividade em uma bacia hidrográfica está intrinsecamente relacionada à geomorfologia da paisa-

gem (BRACKEN *et al.*, 2015; BORSELLI *et al.*, 2008; CAVALLI *et al.*, 2013). De acordo com Mahoney, Fox e Aamery (2018), a desconectividade ocorre na bacia hidrográfica em todos os níveis morfológicos, incluindo microtopografia de superfícies onduladas de baixa energia, voçorocas e ravinas, apenas ativas nos maiores eventos pluviométricos, sumidouros cársticos, que desconectam áreas de drenagem, e planícies de inundação, que desconectam as encostas da rede de drenagem. Para melhor identificação dessas feições, são necessários levantamentos topográficos de alta resolução e levantamentos de campo. Cantreul *et al.* (2018) definem 1 metro de tamanho de pixel como a resolução ótima de modelos digitais de terreno (MDT) para o uso na avaliação da conectividade de sedimentos, não havendo ganhos significativos para resoluções maiores.

Fatores como o uso do solo também podem influenciar na conectividade dos sedimentos. De acordo com Persichillo *et al.* (2018), o aumento da cobertura vegetal nas encostas pode causar desconexão entre uma fonte de sedimentos e o exutório da bacia. Portanto, esse

fator deve ser avaliado principalmente em regiões de florestas tropicais e subtropicais, como no Brasil, onde a superfície do terreno é coberta por uma alta camada de serapilheira (Figura 1).

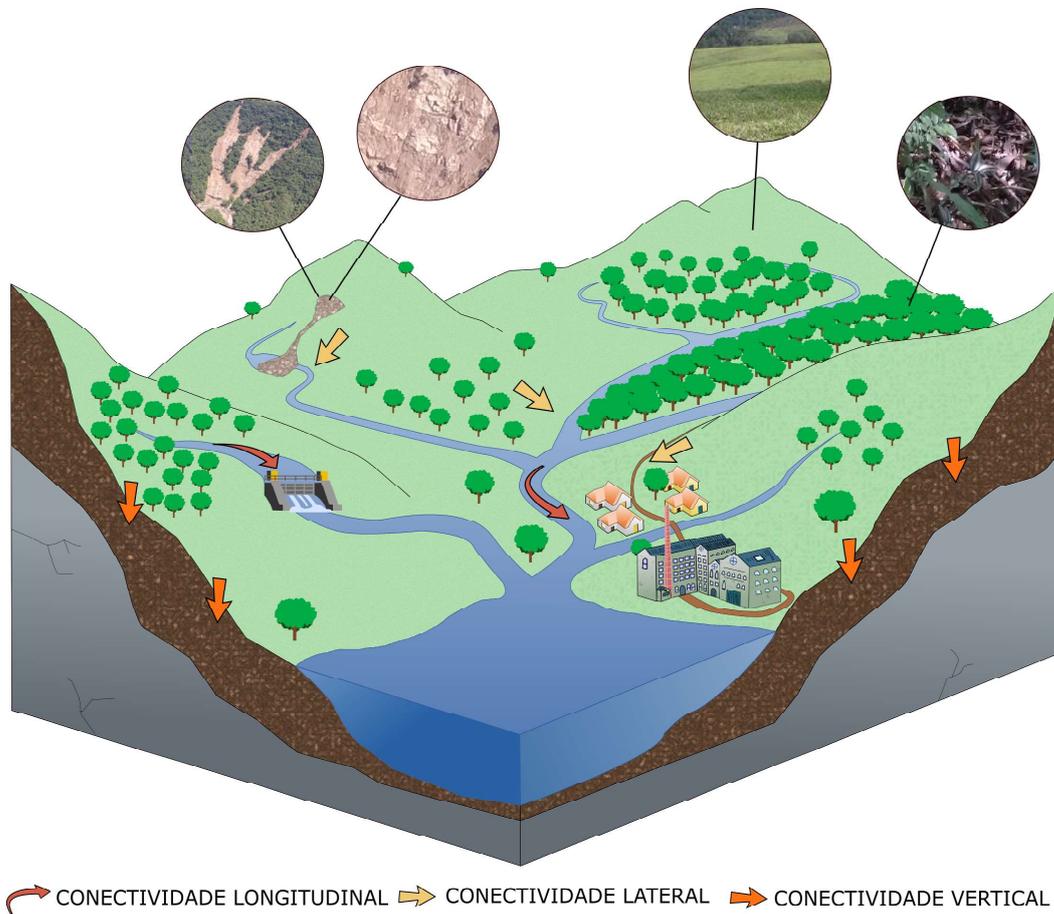


Figura 1 - Dimensões, componentes e características da conectividade dos sedimentos.

Wainwright *et al.* (2011) e Duvert *et al.* (2011) tratam de dois componentes da conectividade: funcional e estrutural. O componente funcional traduz a ligação entre elementos da paisagem oriunda de escoamentos superficiais e subsuperficiais causados por chuvas. Já o componente estrutural representa a taxa de transferência, a qual depende do caminho (continuidade), do comprimento da encosta e da impedância (resistência) ao fluxo (BRAKEN *et al.*, 2013).

De acordo com Heckmann *et al.* (2018), a conectividade torna-se uma propriedade emergente do estado do sistema, refletindo a continuidade e a força dos caminhos do fluxo de água e dos sedimentos em um determinado intervalo de tempo. A configuração espacial dos componentes do sistema representa a conectividade estrutural, enquanto a conectividade

funcional é inferida a partir da dinâmica dos processos do sistema (e.g. transferência de água e sedimentos) (WAINWRIGHT *et al.*, 2011; HECKMANN *et al.*, 2018), sendo modificada, ao longo do tempo, em uma escala espaço temporal específica (NUNES *et al.*, 2018). Desse modo, o componente estrutural, ligado às características geomorfológicas, fornece aspectos espaciais à conectividade. Já a funcional, ligada às propriedades hidrológicas, traz uma escala de temporalidade à conectividade.

Nesse sentido, a conectividade estrutural pode ser modificada pelos processos que governam a conectividade funcional, sendo que o grau de alteração dependerá da magnitude do evento, pois, como apresentado por Gumiere *et al.* (2011), quanto maior a lâmina de água gerada pelo escoamento superficial menor o efeito da

rugosidade, por exemplo, o que diminui a impedância relacionada à conectividade estrutural.

Intrínseca à propriedade estrutural estão as propriedades topográficas, como elevação, declividade, curvatura, rugosidade, densidade de drenagem e as propriedades do solo (e.g. estabilidade dos agregados, coesão) (HECKMANN *et al.*, 2018). Porém, segundo Heckmann *et al.* (2018), a conectividade estrutural não implica necessariamente que o sedimento será transferido de uma unidade para outra e depende de um vetor para transportá-lo. Da mesma forma, os processos que governam a conectividade funcional são influenciados por aspectos estruturais da paisagem. No caso da conectividade hidrossedimentológica, esse vetor é influenciado pela precipitação, pela geração do escoamento superficial e pela capacidade de transporte, ou seja, a conectividade emerge da interação espacial dos processos. Assim, entende-se que os dois componentes não devem ser tratados de maneira isolada, mas avaliadas conjuntamente.

Segundo Liu e Fu (2016), a conectividade estrutural descreve o acoplamento físico entre unidades da paisagem; e a conectividade funcional descreve a ligação entre os elementos da paisagem mantidos pelo transporte do material. A interação dessas dimensões é o que fornece a conectividade real dos sedimentos e o que reafirma a importância do estudo da conectividade dos sedimentos a partir da hidrogeomorfologia. A conectividade dos sedimentos é regida pelo contínuo destacamento, transporte e deposição das partículas, controlado pela forma como o sedimento se move dentro dos compartimentos geomorfológicos (entre encosta e canais e dentro dos canais). Nessa perspectiva, a desconectividade define-se como a descontinuidade na cadeia de sedimentos, em que alguma mudança estrutural (e.g. barreira) na paisagem impede a transferência de sedimentos (Figura 1), ou então a ausência do vetor de transporte, a água, ou da capacidade de transporte do escoamento, no caso da conectividade hidrossedimentológica.

Similarmente à água e aos sedimentos, as conectividades hidrológicas e hidrossedimentológica variam tanto espacialmente como temporalmente. A variação temporal da conectividade está diretamente ligada à magnitude e frequência dos eventos efetivos (FRYIRS *et al.*, 2007a), bem como à duração (BRACKEN; CROKE 2007). Já espacialmente, segundo Brierley *et al.* (2006), a conectividade pode variar em

três dimensões: a Dimensão Longitudinal, a Lateral ou Transversal e a Vertical (Figura 1). Conectividade Longitudinal refere-se à rede de canais e suas relações de fluxo de trechos mais altos para os mais baixos e afluentes com o canal principal, o que reflete também na capacidade dos canais na transferência de sedimentos. A Conectividade Lateral ou Transversal define-se pela relação entre a rede de drenagem e a paisagem, incluindo a relação encosta-canal e planície de inundação-canal, controlados pela frequência e magnitude dos eventos de inundação e erosão (escorregamentos e fluxos de detritos). Por último, os autores definem a Conectividade Vertical referente às trocas químicas, biológicas e hidrológicas que ocorrem entre superfície e subsuperfície, controladas pela textura do material da superfície. Assim, pode-se dizer que a conectividade dos sedimentos possui interfaces com as taxas de produção de sedimentos de uma bacia hidrográfica.

Bracken e Croke (2007), ao avaliarem diversos estudos sobre conectividade, observaram que a conectividade de sedimentos é abordada de maneira implícita nas avaliações da produção de sedimentos. Heckmann *et al.* (2018) relataram que alguns estudos baseados em campo (PEÑUELA *et al.*, 2015) e em modelos (BAARTMAN *et al.*, 2013) revelam indícios de uma correlação direta entre índices de conectividade, produção de sedimentos e taxa de transferência de sedimentos (*Sediment Delivery Ratio*) - *SDR*.

A produção de sedimentos (*sediment yield* – *SY*) é definida como a quantidade de sedimentos que passa por uma seção de controle, ou seja, é uma variável que se refere a um determinado ponto. Além disso, o valor final da produção de sedimentos depende diretamente das características da área de contribuição da seção de análise, o que define a produção de sedimentos como uma variável concentrada, pois haverá um único valor de produção de sedimentos por unidade de tempo para a seção de controle. Já a conectividade dos sedimentos refere-se à ligação do sedimento do seu ponto de origem até determinado destino. Assim, conforme Fryirs (2013), a conectividade refere-se ao sedimento oriundo de determinado local na paisagem. A partir disso, cada ponto da paisagem exhibe conectividade (ou desconectividade) com o local de interesse, podendo ser considerada um dado distribuído, pois o valor é diferente para cada ponto.

A *SDR* possui características muito parecidas com a produção de sedimentos, pois também se refere a uma

seção de interesse e é condicionada pelas características das áreas localizadas a montante. Porém, difere-se pelo fato de ser apresentada em termos de proporção do sedimento total mobilizado na bacia que é transferida para jusante do ponto de interesse. Normalmente, a *SDR* é abordada de maneira concentrada, mas também pode ser distribuída (FERRO; PORTO, 2000). Por exemplo, dentro do conjunto de modelos InVEST (*Integrated Valuation of Environmental Services and Trade-offs*), a *SDR* é calculada pixel a pixel e utiliza como base para espacialização o índice de conectividade proposto por

Borselli *et al.* (2008) (HAMEL *et al.*, 2015). A *SDR* e a conectividade dos sedimentos estão intrinsecamente relacionadas, principalmente quando se trata de aporte de sedimentos ao canal. A *SDR*, por representar a parcela do sedimento destacado que passa pela seção de interesse, depende de fatores muito similares àqueles que a conectividade dos sedimentos depende. A produção de sedimentos, a conectividade dos sedimentos e a *SDR* são temas fortemente relacionados, porém existem diferenças importantes entre elas que devem ser destacadas (Tabela 2).

Tabela 2: Comparação entre a *SDR*, Produção de Sedimentos (*SY*) e Conectividade dos Sedimentos (*SC*).

Características	<i>SY</i>	<i>SDR</i>	<i>SC</i>
Variável concentrada, vinculada à seção de controle	✓	✓	
Variável distribuída		✓	✓
Valor relativo		✓	✓
Valor absoluto	✓		
Utilização de características geomorfológicas na sua determinação		✓*	✓
Dependência dos processos erosivos a montante do ponto de interesse	✓	✓	
Estabelece o aporte de sedimentos	✓	✓	

O conceito de conectividade dos sedimentos precisa ser de ampla aplicação em toda bacia hidrográfica e em diferentes regimes hidrológicos (variação espaço-temporal), a fim de melhorar a compreensão da transferência de sedimentos. A conectividade dos sedimentos está intimamente ligada à constituição e formação do canal, da encosta e, conseqüentemente, da paisagem. O estudo da conectividade dos sedimentos contribui para o entendimento dos fatores que controlam os processos erosivos e o transporte de partículas e poluentes ao longo da bacia hidrográfica. A avaliação do grau de conectividade dos sedimentos em um sistema fluvial permite a compreensão do funcionamento e a evolução do sistema a partir da dinâmica fluvial (HOOKE, 2003). A compreensão dos elementos que influenciam a conectividade dos sedimentos permite quantificar o grau dessa conectividade de maneira espaço-temporal para uma bacia hidrográfica. Brierley, Fryirs e Jain (2006) destacaram que, cada vez mais, as aplicações de modelagem são usadas para caracterizar, explicar e prever inter-relações, porém ressaltaram a necessidade de fundamentar esses resultados em campo.

4. Variáveis Utilizadas na Quantificação da Conectividade dos Sedimentos

Embora existam diferentes definições, a conectividade hidrológica é normalmente quantificada a partir de dois aspectos: (i) continuidade do caminho do fluxo entre cabeceiras, zona ripária e canais fluviais (JENCISO *et al.*, 2009); e (ii) métrica hidrológica relacionada a umidade do solo (WESTERN *et al.*, 2001). Para quantificar a conectividade dos sedimentos, diversas fórmulas foram propostas utilizando parâmetros geomorfológicos que podem condicionar a transferência de sedimentos na bacia hidrográfica (e.g., BORSELLI *et al.*, 2008; CAVALLI *et al.*, 2013; LIU; FU, 2016; e ZANANDREA *et al.*, 2017). Apesar de Fressard e Cossart (2018) alertarem que tais índices procuram quantificar algo que ainda não possui uma medida clara, eles servem para desenvolver o entendimento acerca do tema, além de evoluírem em direção à integração com modelos de erosão e produção de sedimentos.

Existem diversas variáveis que podem compor os índices de conectividade hidrossedimentológica. Essas variáveis podem ser hidrológicas, quando relacionadas à geração de escoamento responsável pela ligação entre diferentes locais; geomorfológicas, relacionadas às características da paisagem que facilitam ou impedem o fluxo, e sedimentológicas, quando relacionadas às características dos sedimentos a serem transferidos. A Tabela 3 sumariza e classifica quanto ao regime tempo-

ral algumas dessas variáveis. Consideram-se permanentes os parâmetros que não alteram suas características durante o período de análise, enquanto os transientes possuem variabilidade temporal, como no caso das precipitações e da taxa de infiltração. É importante ressaltar que, dependendo da escala temporal de análise, essas variáveis podem assumir diferentes regimes, como, por exemplo, a cobertura do solo que, dentro de uma análise de anos, sofrerá mudanças.

Tabela 3: Exemplos de possíveis variáveis para compor um índice de conectividade dos sedimentos e suas características.

Variável Permanente		Regime Temporal	
		Permanente	Transiente
Hidrológica	Precipitação		✓
	Erosividade		✓
	Índice de Precipitação Antecedente		✓
	Taxa de infiltração		✓
	Precipitação Efetiva		✓
	Umidade do solo		✓
Geomorfológica	Comprimento do percurso	✓	
	Declividade	✓	
	Área de drenagem	✓	
	Fator Topográfico	✓	
	Rugosidade do terreno	✓	
	Cobertura do solo	✓	
Sedimentológica	D ₅₀	✓	
	Erodibilidade	✓	
	Granulometria	✓	
	Coesão	✓	

Além do aspecto temporal, as variáveis são classificadas quanto a sua espacialização. Em geral, são representadas de maneira distribuída, entretanto, devido à dificuldade associada à obtenção de dados distribuídos (e.g. precipitação e taxa de infiltração), alguns parâmetros podem ser representados de maneira concentrada, ou seja, uniforme em toda a área de interesse. Nesse sentido, ao compor um índice de conectividade dos sedimentos, é importante levar em conta a disponibilidade e a qualidade dos dados das variáveis selecionadas. Na prática, a falta de informações comumente surge como

uma limitação para a aplicação de determinadas metodologias (HECKMANN *et al.*, 2018).

Esse índice deve ser função de dois componentes relacionados à conectividade: um representativo da conectividade estrutural (Ce) e outro representativo da conectividade funcional (Cf). Esses componentes são constituídos por um conjunto de variáveis específicas, que, juntos, caracterizarão o grau de conectividade dos sedimentos da área de interesse. Wohl (2014) destacou a importância dos componentes como magnitude, duração e extensão da conectividade. A autora ressaltou

que, ao avaliar a conectividade, é importante considerar a variação das dinâmicas ao longo do percurso da água e dos sedimentos, bem como a variação das condições ambientais em diferentes escalas temporais. Assim, um índice de conectividade dos sedimentos deve ser capaz de avaliar espacialmente e temporalmente o comportamento da conectividade dentro da bacia hidrográfica.

Conectividade estrutural (Ce)

A conectividade estrutural está relacionada às propriedades de elementos que constituem os canais e superfícies pelas quais a água e os sedimentos percorrerão até um ponto de deposição (HECKMANN et al., 2018). Alguns dos elementos que compõem a conectividade estrutural são: declividade, rede de canais de drenagem, comprimento do percurso, área efetiva de contribuição e rugosidade do terreno.

A declividade influencia significativamente na conectividade (BORSELLI et al. 2008; HECKMANN et al., 2018). Ambientes com declives acentuados contribuem para a geração de escoamentos superficiais com alta erosividade, uma vez que altos gradientes de declividade aumentam as tensões cisalhantes atuantes. Em contrapartida, relevos mais suaves contribuem para a atenuação da energia de escoamento e, por consequência, favorecem a deposição dos sedimentos. Além da declividade, existem outras variáveis topográficas importantes, tais como: a curvatura do terreno, que determina a convergência ou divergência dos escoamentos; a rugosidade da superfície, que influencia as características hidráulicas, alterando velocidades e regimes de escoamento conforme as características da superfície; anisotropia topográfica, que indica a falta de uniformidade no terreno e a distribuição de fossos/barreiras, que podem gerar desconectividade na paisagem.

O comprimento do percurso também exerce influência na conectividade dos sedimentos. Fressard e Cossart (2018) destacaram que redes de canais de drenagem mais densas aumentam a acessibilidade do sedimento ao exutório da bacia. Ademais, quanto maior o comprimento do percurso, maiores as chances de o sedimento ter sua movimentação impedida por algum fator, seja um obstáculo, sumidouro ou suavização no relevo. O fator *LS* (*length slope*) é utilizado como uma alternativa para condensar informações de comprimento e declividade, podendo ser calculado pela metodologia

de Moore e Wilson (1992) e suas variantes (e.g. ZHANG et al., 2017).

A cobertura do solo interfere diretamente na geração (funcional) e propagação do escoamento superficial (estrutural). A vegetação existente pode influenciar por meio de compartimentos para armazenar sedimentos (troncos de árvores), da rugosidade da superfície (serapilheira), que diminuem a energia do escoamento, além de interceptar água proveniente da precipitação. Por conseguinte, diferentes tipos e densidades de vegetação possuem diferentes níveis de influência sobre a conectividade (HECKMANN et al., 2018). A cobertura é sensível às ações humanas, como, por exemplo, criando barreiras/obstáculos artificiais que dão origem a pontos de desconectividade (FRESSARD; COSSART, 2018).

A área efetiva de contribuição é uma variável que indicará a proporção da região a montante de uma seção de interesse que direciona os fluxos para um determinado ponto da paisagem. Dessa maneira, locais com grandes áreas de contribuição tendem a saturar mais rapidamente e a gerar escoamentos superficiais mais facilmente. Como a área de contribuição é calculada por um tratamento topográfico, a resolução do modelo digital de terreno (MDT) e o algoritmo de determinação do direcionamento de fluxo influenciam consideravelmente nos resultados (CAVALLI et al., 2013).

Conectividade funcional (Cf)

A conectividade funcional abarca as variáveis que ligam elementos da paisagem por meio de um processo (WAINWRIGHT et al., 2011). Dessa forma, a conectividade funcional é composta por variáveis que condicionam a geração de escoamento superficial, que é o principal vetor de ligação dos sedimentos entre pontos da paisagem. Algumas das variáveis que podem ser utilizadas nessa quantificação são: precipitação, índice de precipitação antecedente (KOHLER; LINSLEY, 1951), condutividade hidráulica, permeabilidade e infiltração. Esses parâmetros podem ser obtidos a partir de séries de dados monitorados e medidos em campo e a partir de dados fornecidos por modelos hidrossedimentológicos.

O tipo de solo determina suas propriedades, que, por sua vez, condicionam o comportamento de diversas variáveis: capacidade de armazenamento de água, condutividade hidráulica e erodibilidade (HECKMANN et al., 2018). A condutividade hidráulica depende da

umidade no solo e de sua permeabilidade. A erodibilidade traduz a facilidade com a qual o solo pode ser desagregado e transportado pela água. Os processos erosivos, nesse sentido, conectam os diferentes pontos de uma paisagem, mas, ao mesmo tempo, geram um *feedback*, alterando a microtopografia e outros componentes estruturais que podem diminuir a conectividade.

A precipitação é um agente externo responsável pela geração de escoamentos superficiais que, por sua vez, produzem interações entre sedimentos e água dentro do sistema. A magnitude desses processos caracteriza-se pela intensidade, duração e frequência da precipitação (HECKMANN *et al.*, 2018). A impermeabilização do solo potencializa o escoamento superficial. O índice de precipitação antecedente pode auxiliar na avaliação da condição inicial da saturação do solo, sendo essencial para casos em que os eventos de precipitações anteriores ao período de análise alteraram significativamente as condições iniciais do meio.

A quantificação da conectividade funcional ainda é um desafio para os pesquisadores da área; e diversas outras variáveis podem ser utilizadas para essa quantificação. No entanto, o desafio maior reside no entendimento da interação das variáveis na representação da conectividade funcional junto à estrutural, representando a conectividade hidrossedimentológica. Ambos os componentes não devem ser tratados de maneira isolada para uma representação da conectividade real dos sedimentos.

5. Aplicações na Avaliação da Conectividade dos Sedimentos

Segundo Bracken *et al.* (2013), a estimativa física da conectividade na modelagem se deu por meio de métodos simples de ponderação da transferência de água e sedimento, desenvolvidos como uma função da distância da encosta. Avaliando a conectividade de sedimentos como um quadro conceitual para a compreensão de transferência de sedimentos através de escalas múltiplas, Bracken *et al.* (2015) examinaram: (i) distribuições das relações frequência-magnitude de processos de desagregação/transporte de sedimentos; (ii) relações espaciais e temporais entre tais processos; e (iii) mecanismos desses processos para desenvolver um novo quadro da conectividade de sedimentos.

Parsons *et al.* (2015) relataram, além da discussão científica recente sobre a conectividade, a atual rede internacional dos pesquisadores e suas atividades. Assim, nota-se que diversos estudos vêm aplicando os conceitos de conectividade com a finalidade de quantificar e avaliar influências de graus de conectividades na paisagem. Na Tabela 4, encontra-se um resumo dos métodos propostos para avaliação da conectividade dos sedimentos levantados nesta pesquisa. Esse levantamento foi realizado via internet utilizando as bases científicas: SciELO (*Scientific Electronic Library Online*), *Science Direct* e Google acadêmico. Assim, esse estudo é constituído por 21 trabalhos levantados a partir das palavras-chave “índice”, “conectividade de sedimentos”, “índice de conectividade” e os mesmos termos em inglês.

Tabela 4: Métodos de avaliação da conectividade dos sedimentos.

Autores	Método	Definição	Dados de entrada
Fryirs <i>et al.</i> (2007a) e Fryirs <i>et al.</i> (2007b)	Modelo conceitual	Avalia a conectividade da cadeia de sedimentos (<i>sediment cascade</i>) na bacia hidrográfica.	Geomorfológicos (MDT e imagens ortofoto aérea)
Borselli <i>et al.</i> (2008)	Índice de Conectividade (IC)	Representa potencial conectividade baseada nas características da paisagem	Geomorfológicos (MDT) e uso do solo
Borselli <i>et al.</i> (2008)	Índice de Conectividade de campo (FIC)	Dependem das intensidades dos eventos que ocorreram localmente e que deixaram sinais visíveis	Geomorfológicos (Topográficos e observações de campo)
Duvert <i>et al.</i> (2011)	Monitoramento hidrossedimentológico	Avalia a conectividade entre as taxas de transferência de sedimentos e a vazão de base.	Sedimentológicos (Concentração de sedimentos em suspensão) e Hidrológicos (precipitação e vazão)
Heckmann e Schwanghart (2013)	Gráfico espacial	Avalia a conectividade das fontes e acumulações de sedimentos.	Geomorfológicos (MDT e imagens ortofoto aérea)
Croke <i>et al.</i> (2013)	Conectividade sistema canal/ planície aluvial	Avalia a conectividade de água e sedimentos do sistema canal/ planície aluvial	Geomorfológicos (MDT e imagens ortofoto aérea) e Hidrológicos (precipitação e vazão)

Baartman <i>et al.</i> (2013)	Índices de complexidade morfológica e de conectividade de sedimentos	Avalia relações entre a complexidade da paisagem e a conectividade da bacia	Geomorfológicos (MDT) e Hidrológicos (precipitação)
Cavalli <i>et al.</i> (2013)	Índice de conectividade de sedimentos (IC)	Abordagem geomorfológica da conectividade de sedimento em relação aos fluxos de detritos	Geomorfológicos (MDT)
Messenzehl <i>et al.</i> (2014)	Índice de conectividade de sedimentos + Índice morfométrico	Índice morfométrico através de geoprocessamento, para caracterizar a conectividade de sedimentos ao canal	Geomorfológicos (MDT, ortofotos) e uso do solo
Pechenick <i>et al.</i> (2014)	Estatística multi-escala	Avalia a conectividade de sedimentos entre estradas rurais e canais na bacia	Geomorfológicos (MDT e imagens de alta resolução), Sedimentológicos (sedimento de fundo e coesão)
Hoffmann (2015)	Conceito matemático	Relaciona o tempo de residência dos sedimentos a conectividade de sedimentos	_____
Liu e Fu (2016)	Indicadores de conectividade	Quantifica a conectividade hidrossedimentológica de uma bacia utilizando modelo de erosão do solo e sedimentação	Geomorfológicos (imagens de satélite de alta resolução e MDT) e Hidrológicos (precipitações)
Coulthard e Wiel (2017)	Modelo de evolução da paisagem	Utilização de modelo de evolução da paisagem para avaliar conectividade de sedimentos	Geomorfológicos (CAESAR) e Hidrológicos (CAESAR-Lisflood)
Zanandrea <i>et al.</i> (2017)	Índice de Conectividade Hidrossedimentológica (ICHS)	Calcula o grau de conectividade de um escorregamento com o canal	Geomorfológicos (imagens de satélite de alta resolução e MDT) e Sedimentológicos (volume de sedimentos)
Grauso <i>et al.</i> (2018)	Índice de Conectividade Simplificado (SCI)	Expressa a capacidade potencial da transferência de sedimentos potencialmente disponível em uma seção do rio.	Geomorfológicos (MDT) e Sedimentológicos (perda de solo)
Crema e Cavalli (2018)	Índice de conectividade (IC)	Implementa o IC de Cavalli <i>et al.</i> (2013) em uma ferramenta de simples aplicação: <i>SedInConnect</i>	Geomorfológicos (MDT)
Fressard e Cossart (2018)	Indicador de conectividade	Avalia a conectividade sedimentológica estrutural pelo índice de fluxo residual	Geomorfológicos (MDT e medições em campo)
Mahoney <i>et al.</i> (2018)	Probabilidade da conectividade de sedimentos	Modelo de conectividade de sedimentos que se baseia nas probabilidades de intersecção da fonte, destacamento e transporte de sedimentos integrado em uma estrutura de modelagem hidrossedimentológica de bacias hidrográficas.	Geomorfológicos (MDT e observações de campo), Hidrológicos (modelos hidrológicos) e Sedimentológicos (equações baseadas na tensão de cisalhamento)
Turnbull e Wainwright (2019)	Indicador de conectividade	Quantifica a taxa entre conectividade funcional e estrutural com modelos de escoamento superficial e de transporte de sedimentos	Geomorfológicos (imagens de alta resolução e MDT) e Hidrológicos (precipitações)
López-Vicente e Ben-Salem (2019)	Índice agregado de conectividade de vazão e sedimentos (AIC)	Representa a potencial conectividade de vazão e sedimentos considerando a variação temporal e espacial	Geomorfológicos (MDT), uso do solo, Sedimentológicos (erodibilidade do solo), Hidrológicos (precipitação)
Zingaro <i>et al.</i> (2019)	Índice de conectividade de fluxo de sedimentos (SCI)	Representa um gradiente de mobilidade dos sedimentos integrando aspectos funcionais dentro do componente estrutural	Geomorfológicos (MDT e uso do solo), Sedimentológicos (índice de estabilidade do solo), e Hidrológicos (precipitação)

A avaliação da conectividade de sedimentos tem início a partir de um modelo conceitual elaborado por Fryirs *et al.* (2007a), que utiliza o conceito de *sediment cascade* em nível de bacia hidrográfica. *Sediment cascade* é definido pelos autores como o grau em que qualquer alteração ou bloqueio antrópico ou natural limite a eficiência das relações de transferência de sedimento. Nessa perspectiva, a avaliação se torna qualitativa, uma vez que se baseia na observação das formas topográficas da paisagem que podem possibilitar e/ou barrar os processos de distribuição de sedimentos. Fryirs *et al.* (2007b) relataram que a área efetiva de contribuição é um indicador explícito da conectividade da bacia. Esse parâmetro quantifica a proporção de uma bacia hidrográfica que potencialmente contribui com sedimentos para o exutório (*sinks*).

Na mesma linha de avaliação da conectividade ao longo do *sediment cascade*, Hoffmann (2015) apresentou um conceito matemático baseado na teoria do reservatório para modelar o tempo de residência dos sedimentos. A estrutura elimina a limitação da *SDR*, que frequentemente é usada na conectividade de sedimentos em sistemas geomorfológicos, e fornece informações analíticas sobre o tipo de processo, o ritmo de fluxo de sedimentos e a conectividade dos compartimentos de armazenamento ao longo da escada sedimentar.

Com a finalidade de quantificar a conectividade de sedimentos, Borselli *et al.* (2008) propuseram o índice de conectividade (*IC*) bastante utilizado atualmente (CAVALLI *et al.*, 2013; CANTREUL *et al.*, 2018; LÓPEZ-VICENTE *et al.*, 2013; NICOLL; BRIERLEY, 2017; PERSICHILLO *et al.*, 2018; ZANANDREA *et al.*, 2019). Esse índice baseou-se nas características físicas a montante e a jusante do ponto de cálculo, considerando as características topográficas e de uso do solo. Diversas modificações e complementações foram propostas a partir deste índice (MESSENZEHL; HOFFMANN; DIKAU, 2014; ORTÍZ-RODRÍGUEZ; BORSELLI; SAROCCHI, 2017), sendo a principal delas a adaptação feita por Cavalli *et al.* (2013) para uma abordagem puramente geomorfológica, em que o único dado de entrada o MDT. Posteriormente, Crema e Cavalli (2018) conceberam a ferramenta *SedInConnect* para facilitar a aplicação do índice, almejando expandir sua utilização para investigações geomorfológicas, previsão de áreas inundáveis e efeitos da alteração do uso do solo em áreas agrícolas.

O *IC* representa a possibilidade de que o sedimento, em um determinado local, chegue a um ponto específico de deposição ou ao canal, considerando a morfometria da encosta. O *IC* é calculado localmente para cada célula do MDT, usando um componente a montante e um a jusante do ponto de cálculo do índice (Figura 2).

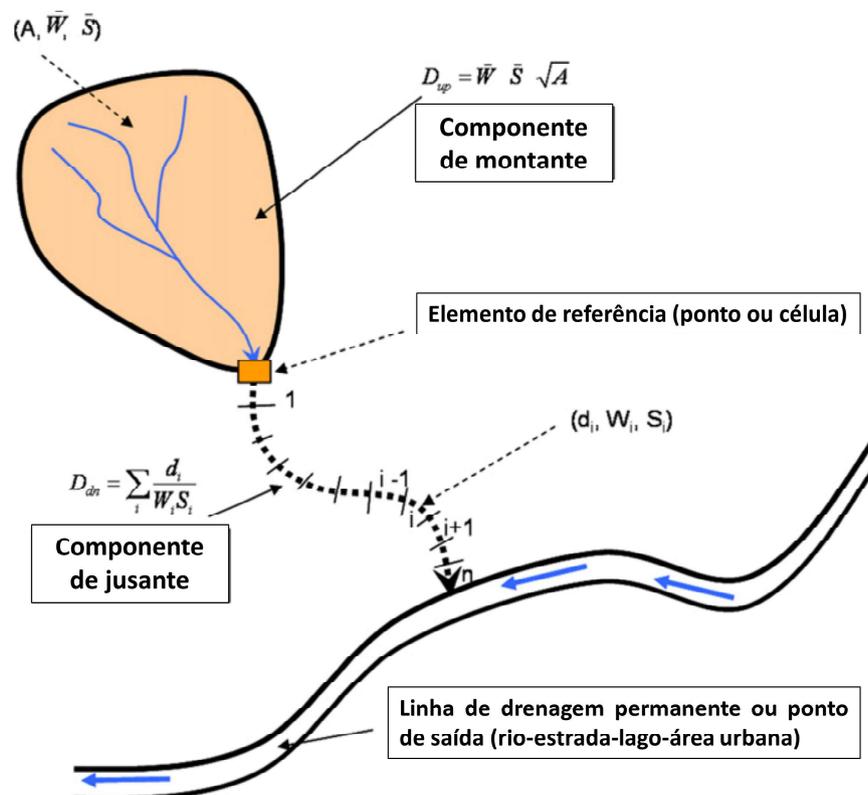


Figura 2. Definição dos componentes a montante e a jusante do ponto de cálculo do índice de conectividade (*IC*). Fonte: Adaptado de BORSELLI *et al.*, 2008.

O IC considera as características da área de drenagem (módulo de montante, D_{up}) e o comprimento do percurso que uma partícula percorre até chegar a um ponto especificado pelo usuário (módulo de jusante, D_{dn}) (Figura 2). Para cada pixel na bacia, o IC estima os componentes D_{up} e D_{dn} . O componente D_{up} é o potencial de deposição do sedimento produzido a montante do ponto de cálculo; e o componente D_{dn} considera a probabilidade de o sedimento chegar a um ponto ao longo de uma linha de fluxo. As variáveis que compõem o índice são: Wi , o fator médio de ponderação da área de contribuição a montante (adimensional); Si , o gradiente de inclinação média da área de contribuição a montante (m/m); Ai , a área de contribuição a montante (m^2); di , o comprimento da célula i ao longo do caminho descendente (m); Wi , o valor de ponderação da célula i (adimensional); Si , o gradiente de declividade da célula i (m/m). A ponderação realizada por meio do parâmetro W representa a impedância ao fluxo de água e sedimentos (BORSELLI *et al.*, 2008), ou seja, a resistência encontrada pelo fluxo em sua trajetória.

Cavalli *et al.* (2013) alteraram o IC de Borselli *et al.* (2008) em relação a dois aspectos. O fator de ponderação W , antes relacionado ao uso do solo (fator C da USLE), foi estabelecido como o equivalente ao índice de rugosidade padronizado (RI), calculado como o desvio padrão da diferença entre MDTs não suavizados e suavizados (topografia residual). O parâmetro RI considera obstruções locais à transferência de sedimentos, tais como a rugosidade do canal, os afloramentos rochosos ou os mantos de detritos, típicos nas áreas de montanha (CAVALLI *et al.*, 2013), porém essa metodologia exige MDTs de alta resolução, para que seja possível a identificação destas feições. Aqui atenta-se ao fato da dificuldade da obtenção de dados topográficos de alta resolução em muitas regiões brasileiras. Outra limitação deste método envolve a representação de áreas com cobertura florestal, pois um modelo digital de terreno não é capaz de identificar a rugosidade oriunda de materiais que estão sobre o solo. Isso se torna ainda mais importante em bacias florestadas, como as bacias brasileiras, pois existe uma grossa camada de serapilheira sobre o solo nas florestas tropicais, o que ocasiona resistência ao fluxo, bem como armadilha na retenção de sedimentos.

Em um estudo recente, Persichillo *et al.* (2018) também alteraram o fator W através do uso do coeficiente de rugosidade de Manning (n) como $W=1-n$, representando a impedância a partir de uma solução simplificada para o comportamento do fluxo terrestre, podendo ser avaliada a conectividade perante diferentes cenários de uso do solo.

Ao utilizar o coeficiente de Manning, a representação de áreas florestadas pode ser melhor representada, visto que esse coeficiente varia significativamente com a cobertura do solo em uma região florestada quando comparada ao solo exposto. No entanto, da maneira matemática como W é apresentado, todos os valores ficam próximos de 1, uma vez que grande parte dos valores de Manning é próximo de 0,1. Assim, valores de W próximos de 1 acabam não exercendo efetiva ponderação no cálculo de IC, não sendo efetivos em representar a impedância, principalmente em áreas florestadas, além desta proposição trazer dimensionalidade ao IC, antes adimensional. A partir disso, Zanandrea *et al.* (2020) propuseram uma nova representação do fator de impedância W , através do RS (Relative Smoothness Index) que fornece uma nova formulação matemática para utilização do coeficiente de Manning, mantendo a adimensionalidade de IC e aumentando a variação utilizada na ponderação da impedância para as diferentes coberturas do solo.

O segundo aspecto de modificação, implementado por Cavalli *et al.* (2013), é relacionado à área de contribuição, que passa a ser derivada pelo algoritmo D-infinito de fluxo múltiplo, proposto por Tarboton (1997), e do MDT corrigido hidrologicamente e não suavizado. Cavalli *et al.* (2013) mostraram que os índices propostos foram satisfatórios quando comparados a observações em campo, e buscaram enfatizar a importância da determinação da conectividade de sedimentos em áreas propensas a movimentos de massa.

Os movimentos de massa foram avaliados de maneira qualitativa em relação à conectividade de sedimentos (HECKMANN; SCHWANGHART, 2013). Salienta-se que, no caso de fluxos de detrito, muitas vezes, o volume de sedimentos que alcança o canal pode ser de grande interesse. Então, analogamente, pode-se afirmar que a conectividade dos sedimentos é importante no gerenciamento de desastres relacionados a sedimento, tais como escorregamentos e fluxos de detritos. Neste sentido, foi desenvolvido por Zanandrea *et al.* (2017) um índice de conectividade hidrossedimentológica para escorregamentos ($ICHS$), que busca relacionar o grau de conectividade de um escorregamento com o canal, baseado no volume e no percurso do escorregamento. Desse modo, é possível calcular a quantidade de sedimentos que chega ao canal; enquanto, através do cálculo do IC, seria possível apenas constatar quanto um escorregamento estava mais conectado ao rio do que a outro ponto qualquer da paisagem. No entanto, mesmo com a proposição do $ICHS$, o cálculo do volume de sedimentos aportado ao canal pelos escorregamentos

ainda é algo de difícil obtenção devido à necessidade de medição de dados em campo logo após ao evento.

Além dos movimentos de massa, estruturas antrópicas, como a construção de estradas e as mudanças no uso do solo, também influenciam na conectividade dos sedimentos de bacias hidrográficas, como avaliado por Fressard e Cossart (2018), Pechenick *et al.* (2014) e Coulthard e Wiel (2017). Baartman *et al.* (2013) buscaram quantificar as relações entre a complexidade da paisagem e a conectividade na bacia, confirmando a hipótese de que a conectividade decresce com o aumento da complexidade geomorfológica da paisagem, e

quantificando a não-linearidade dessa relação, o que foi testado através de um modelo de evolução da paisagem.

Na Figura 3, são apresentados os principais dados de entrada utilizados nos estudos levantados nesse trabalho, em que as palavras são apresentadas com tamanhos diferentes, de modo a demonstrar as variáveis mais e menos utilizadas atualmente. Grande parte dos índices propostos utilizou apenas variáveis geomorfológicas na avaliação da conectividade dos sedimentos. As variáveis hidrossedimentológicas são de suma importância no entendimento da conectividade, porém como introduzi-las na quantificação da conectividade ainda é um desafio.



Figura 3 - Principais dados de entrada utilizados na avaliação da conectividade dos sedimentos.

Alguns autores (REID *et al.*, 2007; CROKE *et al.*, 2013; LIU; FU, 2016; COULTHARD; WIEL, 2017) utilizaram modelagem hidrológica junto a fatores geomorfológicos para compreender a conectividade de sedimentos. Croke *et al.* (2013) levantaram o fato da variabilidade espacial na conectividade hidrológica canal/planície de inundação levar à desconectividade na transferência de sedimentos. A consideração de tal variabilidade para eventos de inundação, até mesmo mais extremos, destaca a necessidade de considerar-se cuidadosamente mudanças não-lineares no desenvolvimento de um índice quantitativo de conectividade hidrossedimentológica.

Reid *et al.* (2007) trataram da conectividade de sedimentos a partir de eventos extremos, avaliando o processo de chegada ao canal dos sedimentos grossos gerados por escorregamentos, através de modelagem, com base em uma forma modificada do modelo de susceptibilidade a escorregamentos, o SHALSTAB (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994), no qual foi

acoplado uma versão de índice de rede do modelo hidrológico, o TOPMODEL (BEVEN e KIRKBY, 1979). Essa abordagem hidrológica permite analisar que as áreas saturadas se conectam à rede fluvial apenas quando há saturação total ao longo do percurso, e que o escoamento superficial, quando associado a zonas não conectadas, mas saturadas, permanece dentro da bacia hidrográfica e contribui para o aumento da saturação média da bacia. Isso restringe a distribuição de sedimentos a situações em que há conexão hidrológica superficial (isto é, saturação) ao longo do percurso completo do fluxo (REID *et al.*, 2007).

Para quantificar a conectividade dos sedimentos de uma bacia, Liu e Fu (2016) utilizaram um modelo de erosão do solo e sedimentação (WATEM/SEDEM), propondo, a partir do mesmo, dois indicadores de conectividade: a área de captação sedimentologicamente efetiva (SEA), que contribui como fonte de sedimentos; e a saída mínima de sedimentos do caminho do escoamento que liga fontes e sumidouros. Os autores

indicaram que essa metodologia é altamente aplicável para pequenas bacias, devido à pequena escala temporal e espacial, representando efetivamente o status anual da conectividade hidrossedimentológica. Ressalta-se que Liu e Fu (2016) e Nicoll e Brierley (2017) alertam para o uso do IC nas análises em larga escala, sendo um desafio a avaliação da conectividade hidrossedimentológica em grandes bacias.

Outra maneira utilizada na avaliação da conectividade dos sedimentos acontece por meio do monitoramento de dados de sedimentos. Duvert *et al.* (2011) avaliaram a conectividade através do monitoramento de sedimentos em suspensão em uma bacia rural no México, demonstrando as variações espaciais do transporte de sedimentos ligados à vazão de base em planícies. A utilização da modelagem ou do monitoramento hidrossedimentológico auxilia na compreensão da conectividade hidrossedimentológica da bacia hidrográfica, porém não permitem quantificá-la. Algumas tentativas ainda incipientes surgem neste sentido, com a finalidade de incorporar variáveis hidrossedimentológicas na representação da conectividade funcional dentro do cálculo de índices de conectividade.

Alguns desses trabalhos modificaram o IC de Borselli *et al.* (2008), introduzindo variáveis de caráter funcional, como erosividade da chuva e permeabilidade e erodibilidade do solo (CHARTIN *et al.*, 2017; WALQUE *et al.*, 2017; LÓPEZ-VICENTE; BEN-SALEM, 2019), porém a incorporação dessas variáveis surge dentro do fator de ponderação (W) do IC, as quais não representam a impedância do fluxo de água e sedimentos, para qual W foi proposto, e sim o potencial de desagregação do sedimento. Nesta mesma abordagem, Zingaro *et al.* (2019) definiram a conectividade em função do acúmulo de fluxos com base no gradiente de mobilidade dos sedimentos, que é, por sua vez, uma função simples da erosividade da chuva, das propriedades geotécnicas do solo e do uso da terra. A incorporação dessas novas variáveis hidrossedimentológicas aparece nesses trabalhos no sentido de avaliar o potencial de desagregação dos sedimentos, ou seja, da sua geração. No entanto, a mobilidade dos sedimentos a partir do escoamento superficial, por exemplo, ainda é um termo a ser incorporado aos índices de conectividade de maneira integrada, visto que, na ausência do vetor de transporte, não ocorre a conectividade efetiva dos sedimentos.

Nesse sentido, Turnbull e Wainwright (2019) elaboraram um novo índice ao estudar a invasão de arbustos em terras áridas. O índice de conectividade relativa (*relative connectivity index – RCI*) calcula a taxa entre a conectividade funcional e a estrutural em um ponto, tanto hidrológica como sedimentológica, ou seja, hidrossedimentológica. A ideia consiste na identificação de pixels onde os limites estruturais são excedidos, ou melhor, quando o $RCI > 1$, para que haja a conectividade efetiva. No entanto, este índice não é capaz de calcular a conectividade a partir de variáveis conhecidas em uma área, sendo ainda uma relação empírica.

Grande parte dos novos índices que vem surgindo é um aprofundamento do IC proposto inicialmente por Borselli *et al.* (2008), devido a sua grande aceitação no meio científico e a sua fácil aplicação. Bracken *et al.* (2013) relatam que não há consenso entre os pesquisadores sobre o que é um resultado desejável. Ainda existem muitas incertezas sobre o tema da conectividade hidrossedimentológica e como estabelecer um índice que seja capaz de representar espacial e temporalmente este conceito. Parsons *et al.* (2015) avaliaram que, até o final do ano de 2016, haveria um consenso sobre a utilidade da conectividade como uma estrutura conceitual abordando a variabilidade espacial e temporal no escoamento e no transporte de sedimentos. Entretanto, passado este tempo, percebe-se que ainda há um longo caminho a percorrer.

A conectividade está relacionada a diferentes fatores ambientais sendo distinta para diferentes processos e bacias hidrográficas. Wohl *et al.* (2019) relatam que é improvável a existência de um único índice de conectividade hidrossedimentológica ou de sedimentos capaz de descrever adequadamente todas as formas de conectividade. Grande parte dos trabalhos até agora foi desenvolvido em bacias com características diferentes das brasileiras (BORSELLI *et al.*, 2008; CAVALLI *et al.*, 2013; HECKMANN; SCHWANGHART, 2013; MESSENZEHL; HOFFMANN; DIKAU, 2014; PERSICILLO *et al.* 2018). O entendimento dos processos hidrossedimentológicos e, conseqüentemente, da conectividade dos sedimentos ainda é uma meta a ser alcançada, principalmente nas regiões florestadas e montanhosas de climas tropical e subtropical, como o Brasil, onde a dinâmica de sedimentos é essencial no gerenciamento das bacias hidrográficas.

6. Estudos sobre conectividade hidrossedimentológica no Brasil

Para reconhecer a situação atual das produções científicas no Brasil acerca da conectividade hidrossedimentológica, foram utilizadas as plataformas SciELO, Google acadêmico e BDTD (Biblioteca Brasileira Digital de Teses e Dissertações), utilizando as palavras-chave “conectividade hidrossedimentológica”, “conectividade de sedimentos”, “índice de conectividade” e termos equivalentes em inglês. Portanto, trabalhos que estudaram somente conectividade hidrológica, tais como Toledo e Alcantra (2019), não foram computados no presente estudo. Foram encontrados 30 trabalhos publicados até novembro de 2019. A produção científica mais antiga foi publicada em 2008 (LIMA *et al.*, 2008), enquanto, em outros países, o tema é discutido desde 2003.

A Figura 4 apresenta a distribuição temporal das publicações analisadas nesta revisão. Observa-se como a discussão sobre a conectividade dos sedimentos no Brasil é recente. Dessa maneira, o número de artigos científicos acerca desse tema ainda é muito baixo, dos quais cerca de 33% representam publicações em revistas científicas e 27 % são trabalhos de eventos científicos. Em comparação aos trabalhos publicados ao redor do mundo (HECKMANN *et al.*, 2018), os estudos relacionados à conectividade de sedimentos e hidrossedimentológica ainda são escassos no Brasil. Entretanto, nota-se uma tendência crescente dessas publicações ao longo do tempo, sendo que o ano de 2017 apresenta maior frequência das mesmas no período de análise (2008-2020).

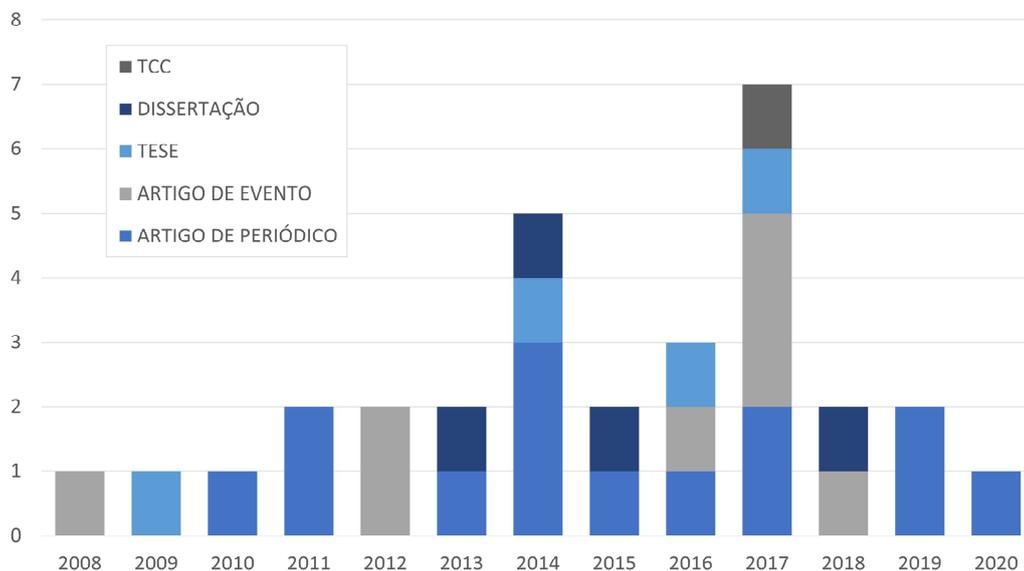


Figura 4 - Distribuição temporal das produções científicas sobre conectividade dos sedimentos no Brasil (2008–2020).

Dos trabalhos encontrados, 66% possuem a conectividade como principal objeto de análise, seja a conectividade de sedimentos ou hidrossedimentológica. Dentre os trabalhos com foco em conectividade, apenas quatro (LOPES, 2013; BECKER *et al.*, 2017; ZANANDREA *et al.*, 2019; ZANANDREA *et al.*, 2020) abordam a conectividade quantitativamente, utilizando os índices de conectividade propostos por Borselli *et al.* (2008) e Cavalli *et al.* (2013). Grande parte das abordagens qualitativas segue metodologias baseadas em cruzamento de mapas temáticos (e.g. altimétrico, litológico, pedológico, uso e ocupação do solo), acompanhado de identificações em campo de áreas com alta e baixa co-

nectividade (e.g. BARROS *et al.*, 2014a; CARVALHO; SILVA, 2016, SOUZA *et al.*, 2019). Alguns trabalhos utilizam ferramentas para modelagem de transporte de sedimentos e usam noções de *SDR* para indicar o grau de conectividade (e.g. MEDEIROS *et al.*, 2010; SCHULTZ *et al.*, 2012).

A Figura 5 mostra a distribuição espacial das áreas de estudo dos trabalhos sobre o tema, em que se observa a distribuição não homogênea de estudos no país, tendo muitas pesquisas realizadas em bacias hidrográficas em comum. Verifica-se que os estados com maior frequência de trabalhos publicados foram o Ceará e o Rio de Janeiro com 8 e 7 trabalhos, respectivamente, e os

demais estados (Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Sul e Santa Catarina) não ultrapassaram 4 publicações.

Em virtude da maior concentração de trabalhos desenvolvidos no Nordeste brasileiro, 56% das investigações foram realizadas em regiões semiáridas. Os demais estudos foram feitos em regiões tropicais (22%) e subtropicais (22%), com predominância de mata

atlântica. Algumas investigações sobre conectividade foram realizadas com foco em estradas ou segmentos de canais, mas a maior parte dos estudos (85%) foi realizada em escala de bacia. Dentre aqueles que utilizaram bacias como objeto de análise, 56% estudaram bacias com áreas entre 100 e 1000 km², 22% entre 1 e 100 km² e 10% com menos de 1 km².

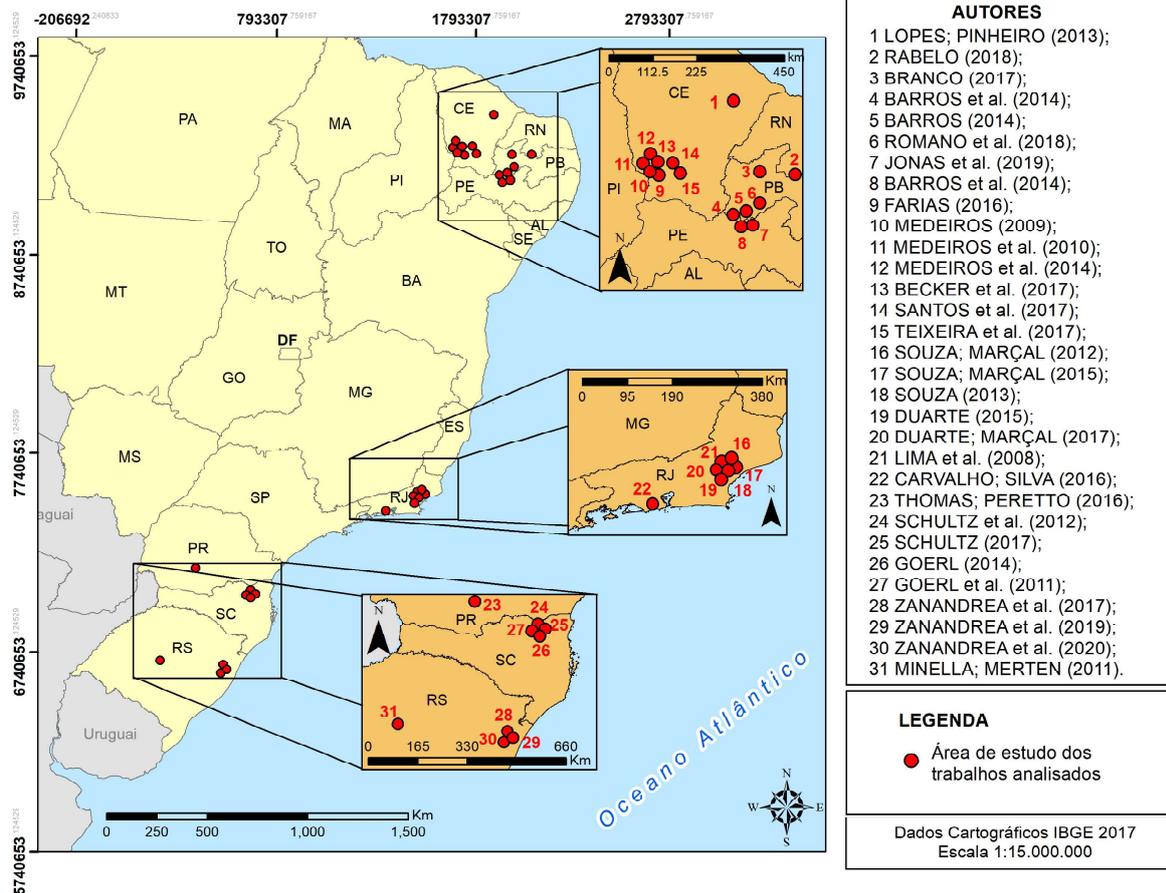


Figura 5 - Distribuição espacial das produções científicas sobre conectividade dos sedimentos no Brasil (2008–2020).

A Figura 6 apresenta a distribuição dos trabalhos quanto à consideração dos componentes funcionais e estruturais da conectividade. Apenas aqueles com foco na avaliação da conectividade foram considerados. A maior parte dos mesmos considera o componente estrutural (94%), enquanto apenas metade deles considera também o funcional. Todos os quatro estudos com foco na avaliação quantitativa da conectividade apenas consideraram o componente estrutural. Lopes (2013) indicou que uma bacia do semiárido possui um *IC* médio de -4,18, enquanto Zanandrea *et al.* (2019) afirmaram que uma bacia subtropical possui

IC médio de -5,25. Como o *IC* não considera fatores como chuva e escoamento superficial, mesmo bacias com características bem distintas como essas possuem conectividades semelhantes. Isso ressalta a importância da consideração de elementos funcionais na avaliação da conectividade.

Os estudos que consideram a conectividade estrutural e funcional tratam a conectividade qualitativamente, classificando os ambientes em conectado, desconectado ou parcialmente conectado. Basicamente, são utilizadas informações de precipitação, vazão e escoamento superficial para determinar pontualmente

a conectividade de um ambiente durante determinado evento. Entretanto, a abordagem do componente funcional nos trabalhos analisados ainda é vaga. Além disso, o caráter qualitativo das abordagens não permite a comparação do grau de conectividade entre diferentes áreas de estudo. Teixeira *et al.* (2017) e Thomaz e Peretto (2016) foram os únicos que não utilizaram informações topográficas de maneira direta para discutir

a conectividade. O primeiro avalia a distribuição de vegetação e sua influência na conectividade, concluindo que altas concentrações de vegetação podem indicar pontos de desconectividade. O segundo estudo avalia a conectividade de água e sedimentos promovida por estradas que cruzam corpos hídricos. Portanto, ambos os estudos focam apenas no componente funcional da conectividade, apesar de não estar explícito.

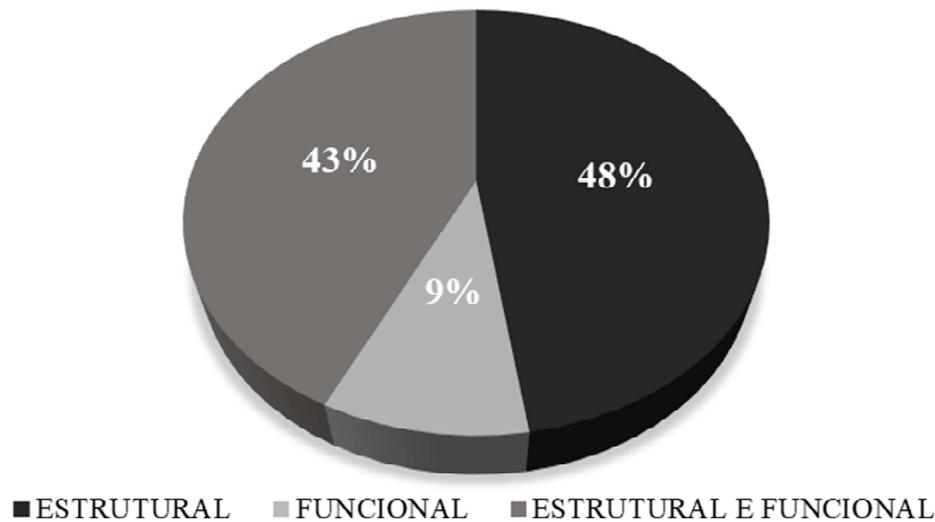


Figura 6 - Distribuição quanto ao tipo de abordagem da conectividade dos sedimentos nos trabalhos brasileiros.

Dado o contexto dos trabalhos brasileiros sobre conectividade de sedimentos/hidrossedimentológica, percebe-se que a aplicação de metodologias quantitativas é baixa. Os índices de conectividade existentes foram pouco explorados nas bacias brasileiras e, portanto, ainda não foram devidamente validados para diferentes climas e biomas. Isso fundamenta a necessidade de mais investigações sobre conectividade hidrossedimentológica no Brasil. Além do mais, as metodologias para a avaliação quantitativa da conectividade foram desenvolvidas em regiões distantes do Brasil e, portanto, existe a possibilidade de não representarem adequadamente a situação das bacias brasileiras. Nesse sentido, as metodologias precisam ser testadas e, caso necessário, adaptadas e/ou aprimoradas.

Conclusões

O presente trabalho abordou de maneira teórica a conectividade dos sedimentos, buscando diferenças e semelhanças nos termos utilizados na literatura, como conectividade hidrológica, hidrossedimentológica, hidrogeomorfológica e de sedimentos. Percebe-se que

ainda permanece muita confusão na utilização desses termos, visto que há grande interface entre eles. A conectividade de sedimentos refere-se à transferência dos sedimentos na paisagem, que, quando avaliada utilizando parâmetros hidrológicos, pode ser entendida a partir da conectividade hidrológica dos sedimentos. A transferência dos sedimentos considerando parâmetros hidrológicos e sedimentológicos é objeto de estudo da conectividade hidrossedimentológica. A conectividade dos sedimentos, quando avaliada através de parâmetros hidrológicos e geomorfológicos, é tratada como conectividade hidrogeomorfológica. Dessa forma, a conectividade dos sedimentos pode ser definida de acordo com os fatores considerados na metodologia de análise. Portanto, a conectividade dos sedimentos é um conceito em ascensão no estudo dos processos que ocorrem em bacias hidrográficas, apresentando avanços no entendimento da geomorfologia, hidrologia, sedimentologia, entre outras áreas.

Observando-se os diferentes estudos realizados, verifica-se que grande parte dos índices propostos representa a conectividade dos sedimentos a partir de

componentes estruturais (geomorfológicos), espacializando as relações de ligação entre elementos do sistema. No entanto, algumas abordagens utilizam componentes funcionais (hidrológicos), inserindo temporalidade, principalmente por meio da implementação de variáveis adicionais nos índices existentes. Entretanto, constatou-se que poucas metodologias inseriram as características do próprio sedimento nessa avaliação. Atualmente, nenhum estudo foi capaz de quantificar a conectividade dos sedimentos considerando aspectos funcionais e estruturais distribuídos de maneira espaço-temporal, o que pode ser atribuído à subjetividade do tema. Já, no Brasil, a maioria dos trabalhos publicados na área, até agora, são apenas aplicações de metodologias já estabelecidas, o que preocupa, considerando as diferentes características dos locais onde foram propostas. Além do mais, grande parte das publicações são qualitativas, e muitas apenas comentam sobre a conectividade, sem avaliá-la minuciosamente. Isso decorre do fato de o tema ainda ser recente no país, mas também evidencia a necessidade de desenvolver mais estudos sobre o assunto em território brasileiro. Com mais investigações, há a possibilidade de desenvolver metodologias que sejam mais apropriadas às especificidades das bacias brasileiras.

Alguns desafios futuros a esse tema relacionam-se à busca por relações entre índices de conectividade e produção de sedimentos e/ou *SDR*, uma abordagem que, gradativamente, vem sendo inserida em trabalhos recentes. Outra questão refere-se à importância de considerar a heterogeneidade das paisagens e seus padrões de conectividade no espaço e no tempo, como, por exemplo, a diferença das bacias brasileiras com características fitogeográficas e hidroclimatológicas diferentes e sua intermitência na geração de escoamento superficial. Com avanços nos dados disponíveis e nos modelos hidrossedimentológicos, tem-se mais informações de modo a auxiliar nos avanços sobre a conectividade hidrossedimentológica. A conectividade dos sedimentos torna-se uma ferramenta potencial aos gestores de recursos hídricos, trazendo benefícios por meio da manutenção ou restauração de formas variadas de conectividade. Índices de conectividade podem auxiliar na gestão de bacias hidrográficas, pois consideram a paisagem de maneira integrada, vinculando diversas áreas e auxiliando no entendimento da dinâmica dos sistemas naturais, principalmente dos sedimentos, e, conseqüentemente, na evolução da paisagem. Desse

modo, o estudo da interação da geomorfologia, hidrologia e sedimentologia possibilitaria uma avaliação da conectividade dos sedimentos por meio de uma visão holística do sistema.

Referências Bibliográficas

- BAARTMAN, J. E. M.; MASSELINK, R.; KEESSTRA, S. D.; TEMME, A. J. A. M. Linking landscape morphological complexity and sediment connectivity. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.38, p. 1457-1471, mai. 2013.
- BARROS, A. **Avaliação da desconexão encosta-canal na Bacia do Riacho Grande/PB**. 2014. 139 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2014.
- BARROS, A. C. M.; ALMEIDA, J. D. M.; SOUZA, J. O. P.; CORREA, A. C. B. Dinâmica dos sedimentos em Bacia do Semiárido: Conectividade e a Relação com o escoamento superficial como suporte para a gestão dos recursos hídricos local. **Revista Geonorte**, v. 5, n. 23, p. 332 – 336, jan. 2014a.
- BARROS, A. C. M.; SOUZA, J. O. P.; CORREA, A. C. B. Caracterização Granulométrica dos depósitos de preenchimento de vale como base à proposição de uma tipologia de elementos de desconexão na bacia do riacho Araras/PB. **Revista Geonorte**, Edição Especial 4, v.10, n.1, p. 202-206, 2014b.
- BECKER, S.; COSTA, C. A. G.; MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C.; WUNDERLICH, J. Aplicação de um índice de conectividade sedimentológica à bacia semiárida de Bengê, Ceará, Brasil. In: III Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido, 3, 2017, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza: MASSA, 2017. p. 1-6.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.
- BORSELLI, L., CASSI, P., TORRI, D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. **Catena**, v.75, p. 268 – 277, nov. 2008.
- BRACKEN, L. J., CROKE, J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff dominated geomorphic systems. **Hydrological Processes**, v. 21, p. 1749–1763, fev. 2007.
- BRACKEN, L.; TURBBULL, L.; WAINWRIGHT, J.; BOGAART, P. Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transport at multiple scales. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 40, p. 177 – 188, ago.

2015. <https://doi.org/10.1002/esp.3635>.

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. 119, p. 17 – 34, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.001>.

BRANCO, A. **Análise da conectividade da paisagem no baixo curso do Rio Piancó – Pombal – Semiárido paraibano**. 2017. 91 p. TCC (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba., 2017.

BRIERLEY, G.; FRYIRS, K.; JAIN, V. Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. **Area**, v. 38, n. 2, p. 165-174, out. 2006.

BRUNSDEN, D., THORNES, J. B. (1979). Landscape Sensitivity and Change. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 4, n. 4, p. 463-484. 1979. <https://www.jstor.org/stable/622210>

BRUNSDEN, D. **Barriers to geomorphological change**. In: Thomas, D.S.G., Allison, R.J. Eds. , Landscape Sensitivity. Wiley, Chichester, 1993. p. 7–12.

CANTREUL, V.; BIELDERS, C.; CALSAMIGLIA, A.; DEGRÉ, A. How pixel size affects a sediment connectivity index in central Belgium. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, n. 4, p. 884-893, 2018. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.4295>.

CARVALHO, R. P. B.; SILVA, A. S. Avaliação das áreas de produção e de possíveis rotas de fluxos de detritos como geoindicadores de (des)conectividades de bacias urbanas. In: II Simpósio Modelagem de Sistemas Ambientais e Gestão da Paisagem: Desafios e aplicações, 2, 2016. **Anais...** Belo Horizonte, MG, p. 1-14.

CAVALLI, M., TREVISANI, S., COMITI, F., MARCHI, L. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. **Geomorphology**, v.188, p. 31 – 41, abr. 2013.

CHARTIN, C., EVRARD, O., LACEBY, J.P., ONDA, Y., OTTLÉ, C., LEFÈVRE, I., CERDAN, O. The impact of typhoons on sediment connectivity: lessons learnt from contaminated coastal catchments of the Fukushima Prefecture (Japan). **Earth Surf. Process. Landf.**, v. 42, p. 306–317, set. 2017. <https://doi.org/10.1002/esp.4056>.

COULTHARD, T. J.; WIEL, M. J. Van de. Modelling long term basin scale sediment connectivity, driven by spatial land use changes. **Geomorphology**, v. 277, p. 265–281, jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.027>.

CREMA, S., CAVALLI, M. SedInConnect: a stand-alone, free and open source tool for the assessment of sediment connectivity. **Computers & Geosciences**. v.111, p. 39-45, fev. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.10.009>.

CROKE, J.; FRYIRS, K.; THOMPSON, C. Channel-floodplain connectivity during an extreme flood event: implications for sediment erosion, deposition, and delivery. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, p. 1444 – 1456, mai. 2013. <https://doi.org/10.1002/esp.3430>.

CROKE, J.; MOCKLER, S.; FOGARTY, P.; TAKKEN, I. Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. **Geomorphology**, v. 68, n. (3–4), p. 257 – 268, jun. 2005.

DUARTE, N. **Conectividade no sistema de drenagem do Rio Sana, afluente do Rio Macaé (RJ)**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

DUARTE, N.; MARÇAL, M. dos S. Conectividade da paisagem na bacia do Rio Sana (RJ): relação entre áreas de captação efetiva e tipos de bloqueios. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 4, p. 755-766, 2017.

DUVERT, C.; GRATIOT, N.; ANGUIANO-VALENCIA, R.; NÉMERY, J.; MENDOZA, M. E.; CARLÓN-ALLENDE, T.; PRAT, C.; ESTEVES, M. Baseflow control on sediment flux connectivity: Insights from a nested catchment study in Central Mexico. **Catena**, v.87 (1), p. 129 – 140, out. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.021>

FARIAS, T. R. L. **Estradas Rurais não pavimentadas como fonte de sedimentos em bacia hidrográfica do semiárido Fortaleza - CE**. 2016. 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2016.

FERRO, V.; PORTO, P. Sediment delivery distributed (SEDD) model. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 5, n. 4, p. 411-422, 2000.

FRESSARD, M.; COSSART, E. A graph theory tool for assessing structural sediment connectivity: Development and application in the Mercurey vineyards (France). **Science of the Total Environment**. v. 651, p. 2566-2584, fev. 2018.

FRYIRS, K. (Dis) Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.38 (1), p. 30 – 46, mar. 2013.

FRYIRS, K. A., BRIERLEY, G. J., PRESTON, N. J., KASAI,

- M. Buffers, barriers and blankets: The (dis) connectivity of catchment-scale sediment cascades. **Catena**, 70 (1), p. 49 – 67, jun. 2007a. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.07.007>.
- FRYIRS, K. A., BRIERLEY, G. J., PRESTON, N. J., SPENCER, J. (2007b). Catchment-scale (dis)connectivity in sediment flux in the upper Hunter catchment, New South Wales, Australia. **Geomorphology**, v.84 (3–4), p. 297 – 316, fev. 2007b. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.044>.
- GOERL, R. F. **Evolução da paisagem e conectividade hidrogeomorfológica na Bacia do Rio Cunha – SC**. 2014. 142 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2014.
- GOERL, R. F.; KOBAYAMA, M.; SANTOS, I. dos. Hidrogeomorfologia: Princípios, conceitos, processos e aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, n.2, p. 103 - 111. 2012.
- GOERL, R. F.; SIEFERT, C. A. C.; SCHULTZ, G. B.; SANTOS, C. S.; SANTOS, I. Elaboração e Aplicação de Índices de Fragmentação e Conectividade da Paisagem para Análise de Bacias Hidrográficas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.4, n. 5, p. 1000-1012, 2011.
- GRAUSO, S.; PASANISI, F.; TEBANO, C. Assessment of a Simplified Connectivity Index and Specific Sediment Potential in River Basins by Means of Geomorphometric Tools. **Geosciences**, v. 48, n. 8, p.1-14, jan. 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/geosciences8020048>.
- GUMIERE, S. J.; BISSONNAIS, Y. L.; RACLOT, D. Vegetated filter effects on sedimentological connectivity of agricultural catchments in erosion modelling: a review. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 36, n. 1, p. 3-19, dez. 2011. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.2042>.
- HAMEL, P.; CHAPLIN-KRAMER, R.; SIM, S.; MUELLER, C. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. **Science of the Total Environment**, v. 524-525, p. 166-177, 2015.
- HARVEY, A.M. Coupling between hillslopes and channels in upland fluvial systems: implications for landscape sensitivity, illustrated from the Howgill Fells, northwest England. **Catena**, v. 42, p. 225-250, 2001.
- 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. 187, p. 77–108, dez. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.08.004>.
- HECKMANN, T., SCHWANGHART, W. Geomorphic coupling and sediment connectivity in an alpine catchment – Exploring sediment cascades using graph theory. **Geomorphology**, 182, p. 89 – 103, jan. 2013.
- HOFFMANN, T. Sediment residence time and connectivity in non-equilibrium and transient geomorphic systems. **Earth-science Reviews**, v.150, p. 609 – 627, nov. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.07.008>.
- HOOKE, J. Coarse sediment connectivity in river channel systems: a conceptual framework and methodology. **Geomorphology**, v.56, n. (1-2), p. 79 – 94, nov. 2003.
- JENCISO, K. G.; MCGLYNN, B. L.; GOOSEFF, M. N.; WONDZELL, S. M.; BENCALA, K. E.; MARSHALL, L. A. Hydrologic connectivity between landscapes and streams: Transferring reach-and plot-scale understanding to the catchment scale. **Water Resources Research**, v.45, p. 1 – 16, abr. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008WR007225>.
- KOHLER, M. A.; LINSLEY, R. K. Predicting the runoff from storm rainfall. **U.S. Weather Bureau Research**. Paper 34, p. 1 – 10. 1951.
- LEXARTZA-ARTZA, I.; WAINWRIGHT, J. Hydrological connectivity: Linking concepts with practical implications. **Catena**, v. 79, n. 2, p. 146-152, nov. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2009.07.001>.
- LIMA, R. N. S.; BRANDÃO, E. A. F.; MARÇAL, M. S. Estudo da conectividade de sedimentos em canais na sub-bacia do São Pedro (RJ). In: VII Simpósio Nacional de Geomorfologia / II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia, 2008, Belo Horizonte, MG. **Anais... SINAGEO**, 2008. p. 1-4.
- LIU, Y.; FU, B. Assessing sedimentological connectivity using WATEM/SEDEM model in a hilly and gully watershed of the Loess Plateau, China. **Ecological Indicators**, v.66, p. 259 – 268, jul. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.055>
- LOPES, J. W. B.; PINHEIRO, E. A. R. Análise temporal da conectividade e da capacidade de transporte potencial de sedimentos em meso-bacia semiárida, CE, Brasil. **Revista Agroambiente On-line**, v. 7, n. 2, p. 136-144, mai./ago. 2013. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v7i2.1030>.
- 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.

- LÓPEZ-VICENTE, M.; POESEN, J.; NAVAS, A.; GASPAR, L. Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pyrenees. **Catena**, v. 102, p. 62-73. 2013.
- MAHONEY, D. T.; FOX, J. F.; AAMERY, N. A. Watershed erosion modeling using the probability of sediment connectivity in a gently rolling system. **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 862-883. 2018.
- MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C.; CREUTZFELDT, G. L. M. B.; BRONSTERT, A. G. A. Connectivity of sediment transport in a semiarid environment: a synthesis for the Upper Jaguaribe Basin, Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1938-1948. out./nov. 2014.
- MEDEIROS, P. H. A.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T. MAMEDE, G. L.; ARAÚJO, J. C. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, p. 636 – 648, mai. 2010.
- MEDEIROS, P. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas**. 2009. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2009.
- MERRIAM, G. Connectivity: a fundamental ecological characteristic of landscape pattern. In: Brandt J, Agger P. (eds) **Proceedings of first international seminar on methodology in landscape ecology research and planning**, vol I. Roskilde Universitetsforlag GeoRue, Roskilde, Denmark, p. 5 – 15. 1984.
- MESSENZEHL, K.; HOFFMANN, T.; DIKAU, R. Sediment connectivity in the high-alpine valley of Val Mütschans, Swiss National Park — linking geomorphic field mapping with geomorphometric modelling. **Geomorphology**, v.221, p. 215 – 229, set. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.05.033>.
- MICHAELIDES, K., CHAPPELL, A. Connectivity as a concept for characterising hydrological behaviour. **Hydrological Processes**, v.23, p. 517 – 522, dez. 2009. <https://doi.org/10.1002/hyp.7214>.
- MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Revista Ciência Rural**, v. 41, n. 3, p. 424 – 432, mar. 2011.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A. physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994.
- MOORE, I. D.; WILSON, J.P. Length-slope factors for the revised universal soil loss equation: simplified method of estimation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.47, n.5, p. 423-428, dez. 1992.
- NICOLL, T.; BRIERLEY, G. Within-catchment variability in landscape connectivity measures in the Garang catchment, upper Yellow River. **Geomorphology**, v.277, p. - 209, jan.2017. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.014>
- NUNES, J.P., WAINWRIGHT, J., BIELDERS, C.L., DARBOUX, F., FIENER, P., FINGER, D., TURNBULL, L., CONNECTEUR WG3 Think-Tank, (2018). Better models are more effectively connected models. **Earth Surf. Process. Landform**. v.43, n.6, p. 1355–1360, dez. 2018.
- ORTÍZ-RODRÍGUEZ, A. J.; BORSELLI, L.; SAROCCHI, D. Flow connectivity in active volcanic areas: Use of index of connectivity in the assessment of lateral flow contribution to main streams. **Catena**. V. 157, p. 90-111. 2017.
- PARSONS, A.J.; BRACKEN, L.; POEPL, R.E.; WAINWRIGHT, J.; KEESSTRA, S.D. Introduction to special issue on connectivity in water and sediment dynamics. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.40, p. 1275 – 1277, fev. 2015.
- PECHENICK, A. M.; RIZZO, D. M.; MORRISSEY, L. A. A multi-scale statistical approach to assess the effects of connectivity of road and stream networks on geomorphic channel condition. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.39, p. 1538 – 1549, jun. 2014. <https://doi.org/10.1002/esp.3611>.
- PEÑUELA, A.; JAVAUX, M.; BIELDERS, C. L. How do slope and surface roughness affect plot-scale Overland flow connectivity? **Journal of Hydrology**. v. 528, p. 192-205, 2015.
- PETERS, D. P.; GROFFMAN, P. M.; NADELHOFFER, K. J.; GRIMM, N. B.; COLLINS, S. L.; MICHENER, W. K.; HUSTON, M. A. Living in an increasingly connected world: a framework for continental-scale environmental science. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v.6, n.5, p. 229 – 237, jun. 2008.
- PERSICILLO, M.G., BORDONI, M., CAVALLI, M., CREMA, S., MEISINA, C. The role of human activities on sediment connectivity of shallow landslides. **Catena**, v.160, p. 261–274, jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.025>.
- PRESTON, N., SCHMIDT, J. **Modelling sediment fluxes at large spatial and temporal scales**. 2003. In: A Lang, K Hennrich and R Dikau (eds) Long Term Hillslope and Fluvial System Modelling – Concepts and Case Studies from the Rhine River Catchment, Lecture Notes in Earth Sciences v. 100, p. 53 – 72, Springer, Berlin. 2013.

- PRINGLE C. M. Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: a global perspective. **Ecological Applications**. v.11, p. 981 – 998, ago. 2001.
- PRINGLE C. M. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? **Hydrological Processes**. v.17, p. 2685–2689, ago. 2003.
- RABELO, D. R. **Análise espacial da razão de aporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Seridó, RN-PB**. 2018. 118 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2018.
- REID, S. C.; LANE, S. N.; MONTGOMERY, D. R.; BROOKES, C. J. (2007). Does hydrological connectivity improve modelling of coarse sediment delivery in upland environments? **Geomorphology**, v.90, n. (3-4), p. 263 - 282, set. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.023>.
- ROMANO, M.P.C.; FRANCO, V.V.; SOUZA, J.O.P. Conectividade da paisagem no alto e médio curso da bacia do Rio Piacó. In: 12º SINAGEO – Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2018, Crato, CE, **Anais...**Crato: SINAGEO, 2018.
- SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; MEDEIROS, P. H. A.; PALÁCIO, H. A. Q.; NETO, J. R. A. Sediment delivery ratio in a small semi-arid watershed under conditions of low connectivity. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 1, jan./mar. 2017.
- SCHULTZ, G. B.; MARANGON, F. H. S.; IENSEN, I. R.R.; SANTOS, I. Simulação da conectividade com os rios e vertentes dos sedimentos provenientes de estradas não pavimentadas. In: 9º SINAGEO – Simpósio Nacional de Geomorfologia, 9, 2012, Rio de Janeiro, RJ, **Anais...** Rio de Janeiro: SINAGEO, 2012. p. 1-5
- SCHULTZ, G. **Conectividade Hidrossedimentológica em bacias experimentais embutidas**. 2017. 118 p. Tese (Doutorado em Geografia). Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2017.
- SOUZA, J. O. P.; CORREA, A. C. B.; BRIERLEY, G. J. An approach to assess the impact of landscape connectivity and effective catchment area upon bedload sediment flux in Saco Creek Watershed, Semiarid Brazil. **Catena**, v. 138, p. 13 – 29, mar. 2019.
- SOUZA, P. A.; MARÇAL, M. S. Avaliação da Conectividade no transporte de sedimentos entre ambientes fluviais no canal Macaé (RJ). In: 9º SINAGEO – SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9, 2012, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...**, Rio de Janeiro: SINAGEO, 2012. p. 1-4.
- SOUZA, P. A.; MARÇAL, M. S.; Hidrossedimentologia e conectividade do Rio Macaé, norte do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Revista Geo UERJ**, v. 27, p. 176 – 201, jul./dez. 2015.
- SOUZA, P. **Dinâmica Hidrossedimentológica e padrões de conectividade no Rio Macaé (RJ)**. 2013. 123 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and 372 upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**. v.33, p. 309–373 319, fev. 1997. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>.
- TAROLLI, P.; FULLER, I. C.; BASSO, F.; CAVALLI, M.; SOFIA, G. Hydro-geomorphic connectivity and landslide features extraction to identifying potential threats and hazardous areas. In: EGU GENERAL ASSEMBLY, 19., 2017, Viena. **Anais...** Viena: EGU, 2017. p. 1.
- TEIXEIRA, L. M. N.; MEDEIROS, P. H. A.; JUNIOR, L. R. P.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M. Vegetação de caatinga e conectividade de água e sedimentos em uma microbacia semiárida. In: III Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido, 3, 2017, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza: MASSA, 2017. p. 1-6.
- TETZLAFF, D.; SOULSBY, C.; BACON, P.J.; YOUNGSON, A.F.; GIBBINS, C.; MALCOLM, A. Connectivity between landscapes and riverscapes—a unifying theme in integrating hydrology and ecology in catchment science? **Hydrological Processes**, v.21, p. 1385 – 1389, abr. 2007.
- THOMAZ, E. L.; PERETTO, G. T. Hydrogeomorphic connectivity on roads crossing in rural headwaters and its effect on stream dynamics. **Science of the Total Environment**, v. 550, p. 547-555, abr. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.100>.
- TISCHENDORF, L.; FAHRIG, L. On the usage and measurement of landscape connectivity. **Oikos**, v.90, p. 7 – 19. 2000.
- TOLEDO, C. E.; ALCANTARA, N. R. Sensitivity of hydrological connectivity in a semiarid basin with a high-density reservoir network. **Rev. Ambient. Água**, v. 14, n. 4, p. 1-13, jul. 2019. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2367>.
- TURNBULL, L.; WAINWRIGHT, J. From structure to function: Understanding shrub encroachment in drylands using hydrological and sediment connectivity. **Ecological Indicators**, v.98, p. 608-618, mar. 2019.
- 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, p. 387 – 404, mar. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.027>.
- WALLING, D.E. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*. 65, p. 209–237. 1983.
- WALQUE, B., DEGRÉ, A., MAUGNARD, A., BIELDERS, C.L. Artificial surfaces characteristics and sediment connectivity explain muddy flood hazard in Wallonia. **Catena**, v. 158, p. 89–101, nov. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.016>.
- WARD, J.V. An expansive perspective of riverine landscapes: pattern and process across scales. **River Ecosystems**, v.6, p. 52 – 60. 1997.
- WESTERN, A.W.; BLÖSCHL, G.; GRAYSON, R.B. Towards capturing hydrologically significant connectivity in spatial patterns. **Water Resources Research**. v.37, n.1, p. 83 – 97. 2001.
- WOHL, E. **Rivers in the Landscape: Science and Management**. Wiley-Blackwell, Chichester, UK. 2014.
- WOHL, E. 2017. Connectivity in rivers. Progress in Physical Geography: **Earth and Environment**, v. 41, n. 3, p. 345-362, jun. 2017. <http://dx.doi.org/10.1177/0309133317714972>.
- WOHL, E., RATHBURN, S., CHIGNELL, S., GARRETT, K., LAUREL, D., LIVERS, B., PATTON, A., RECORDS, R., RICHARDS, M., SCHOOK, D. M., SUTFIN, N. A., WEGENER, P. Mapping longitudinal stream connectivity in the North St. Vrain Creek watershed of Colorado. **Geomorphology**, v.277, p. 171-181, jan. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.004>.
- 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., PASSALACQUA, P., POEPL, R.E., RATHBURN, S.L., SKLAR, L.S. Connectivity as an emergent property of geomorphic systems. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.44, p. 4-26, mai. 2019. <https://doi.org/10.1002/esp.4434>.
- ZANANDREA, F.; KOBİYAMA, M.; MICHEL, G. P., 2017. Conectividade Hidrossedimentológica: uma abordagem conceitual. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XXII, 2017, Florianópolis. **Anais...Florianópolis: ABRH**. p. 1 - 8.
- ZANANDREA, F.; MICHEL, G. P.; KOBİYAMA, M.; CARDOZO, G. L. Evaluation of different DTMs in sediment connectivity determination in the Mascarada River Watershed, southern Brazil. **Geomorphology**, V. 332, p. 80 – 87, mai. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.005>.
- ZANANDREA, F.; MICHEL, G. P.; KOBİYAMA, M. Impedance influence on the index of sediment connectivity in a forested mountainous catchment. **Geomorphology**, V. 351, fev. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106962>.
- ZHANG, X. C.; WANG, Z.L. (2017) Interrill soil erosion processes on steep slopes. **Journal of Hydrology**. v. 548, p. 652-664, mai. 2017.
- ZINGARO, M.; REFICE, A.; GIACHETTA, E.; D'ADDABBO, A.; LOVERGINE, F.; DE PASQUALE, V.; PEPE, G.; BRANDOLINI, P.; CEVASCO, A. CAPOLONGO, D. Sediment mobility and connectivity in a catchment: A new mapping approach. **Science of the Total Environment**. v. 672, p. 763-775. 2019, jul. 2019.