1º HIDROGEOMINAS
SIMPÓSIO MINEIRO DE HIDROGEOMORFOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS
07 – 10 de setembro de 2026
Departamento de Geografia – UFMG
Belo Horizonte - MG

# ANÁLISE HIDROGEOMORFOLÓGICA DA BACIA DO RIO PIRACICABA (MG) POR MEIO DA MODELAGEM ESPACIAL APLICADA À EROSÃO HÍDRICA

Maria Eduarda dos Santos Pedro [1]
Harold George Monteiro Ferreira [2]
Antônio Pereira Magalhães Júnior [3]

## RESUMO

A erosão hídrica pode ser entendida como um dos principais processos de degradação ambiental em bacias hidrográficas, promovendo a perda de solos e consequentemente aumentando o assoreamento de cursos d'água e alterações na dinâmica geomorfológica. Este estudo objetivou analisar a erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba-MG a partir da aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE) integrada ao Índice de Conectividade de Sedimentos (IC), utilizando a plataforma do Google Earth Engine (GEE) e do software QGIS para processamento dos dados. Foram utilizados dados de precipitação (CHIRPS), pedologia, relevo, uso e cobertura da terra e Modelo Digital de Elevação (MDE) para obtenção dos rasters. Os resultados indicaram perda média de solo de 11,42 t $ha^{-1}$ $ano^{-1}$, com mediana de 1,78 t $ha^{-1}$ $ano^{-1}$ e valores máximos superiores a 3.142 t $ha^{-1}$ $ano^{-1}$ em áreas críticas, evidenciando forte variabilidade espacial da erosão na bacia. As maiores taxas de perda de solo concentram-se em áreas de elevada declividade com solo exposto, atividades minerárias e redução da cobertura vegetal, sobretudo na porção sudoeste da bacia. Através do IC foi possível observar o predomínio de conectividade média a alta em porções de encostas mais dissecadas e próximas à rede de drenagem, indicando uma transferência maior de sedimentos para o curso d'água. A integração entre ambas as ferramentas permitiu a identificação de áreas de maior vulnerabilidade, sendo prioritárias para ações de manejo e conservação ambiental, exumando a importância da modelagem espacial em apoio à gestão territorial e dos recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Susceptibilidade erosiva; RUSLE; Índice de Conectividade.

## INTRODUÇÃO

A erosão hídrica acelerada pode promover a degradação ambiental por meio de perdas de solos, assoreamento de cursos d'água e alteração da dinâmica geomorfológica da paisagem. Esse processo é agravado quando associado a elevados índices pluviométricos e à intensificação da conversão do uso da terra, favorecendo o aumento e a intensidade de processos erosivos

[1] Graduanda do Curso de Geografia da UFMG, madu.mespx@gmail.com;
[2] Graduando pelo Curso de Geografia da UFMG, harold.george.901@gmail.com;
[3] Professor orientador: Departamento de Geografia da UFMG, antonio.magalhaes.ufmg@gmail.com.

especialmente em áreas associadas à atividades minerárias, agropecuárias e urbanas (GUERRA; CUNHA, 2011; BERTONI; LOMBARDI NETO; 2014).

A bacia hidrográfica do rio Piracicaba (BHRP), afluente do rio Doce, é marcada pela intensa mineração de minério de ferro, além do predomínio da silvicultura e agropecuária, o que a torna um exemplo adequado para pesquisas sobre vulnerabilidade ambiental e gestão territorial (MAPBIOMAS, 2024). Sob o ponto de vista geomorfológico, uma bacia deve ser compreendida como um sistema no qual a forma do relevo condiciona a circulação da água e o transporte de sedimentos. A compartimentação do relevo, especialmente quanto à organização espacial de entre topos, vertentes e fundos de vale, ajuda a explicar a morfodinâmica da paisagem e a distribuição espacial dos processos erosivos (MORAES E NASCIMENTO, 2020). Na BHRP, houve a substituição da mata nativa por floresta plantada entre os anos de 2007 e 2018, além de um padrão de uso marcado para formação florestal, pastagens, agricultura e reflorestamento de eucalipto para atender às cadeias de celulose e carvão vegetal (CUNHA; VIEIRA, 2022). Esta dinâmica favorece a intensificação dos processos erosivos, aumentando o aporte de sedimentos dos cursos d'água e comprometendo a qualidade ambiental da bacia (SILVA *et al.*, 2017).

A partir do contexto abordado, destaca-se a importância da modelagem espacial da bacia como ferramenta de diagnóstico ambiental, em prol do entendimento da atuação de processos geomorfológicos e suas consequências, a fim de identificar áreas críticas e subsidiar ações de conservação e planejamento ambiental. Entre os variados modelos de análise e estimativa de perda de solo, a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE) ganha destaque. A RUSLE resulta de uma adaptação da USLE (WISCHMEIER; SMITH, 1978), revisada por Renard *et al.* (1997), e é utilizada para estimar a perda média anual de solo a partir da integração dos seguintes fatores: erosividade da chuva, erodibilidade dos solos, relevo, uso e cobertura da terra e práticas conservacionistas. A RUSLE é amplamente aplicada em estudos geomorfológicos e hidrossedimentológicos.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar à susceptibilidade à erosão hídrica na BHRP por meio da modelagem espacial da equação RUSLE e do Índice de Conectividade (IC) de sedimentos, buscando compreender a dinâmica dos condicionantes geomorfológicos e do uso da terra na área de estudo.

## A BACIA DO RIO PIRACICABA

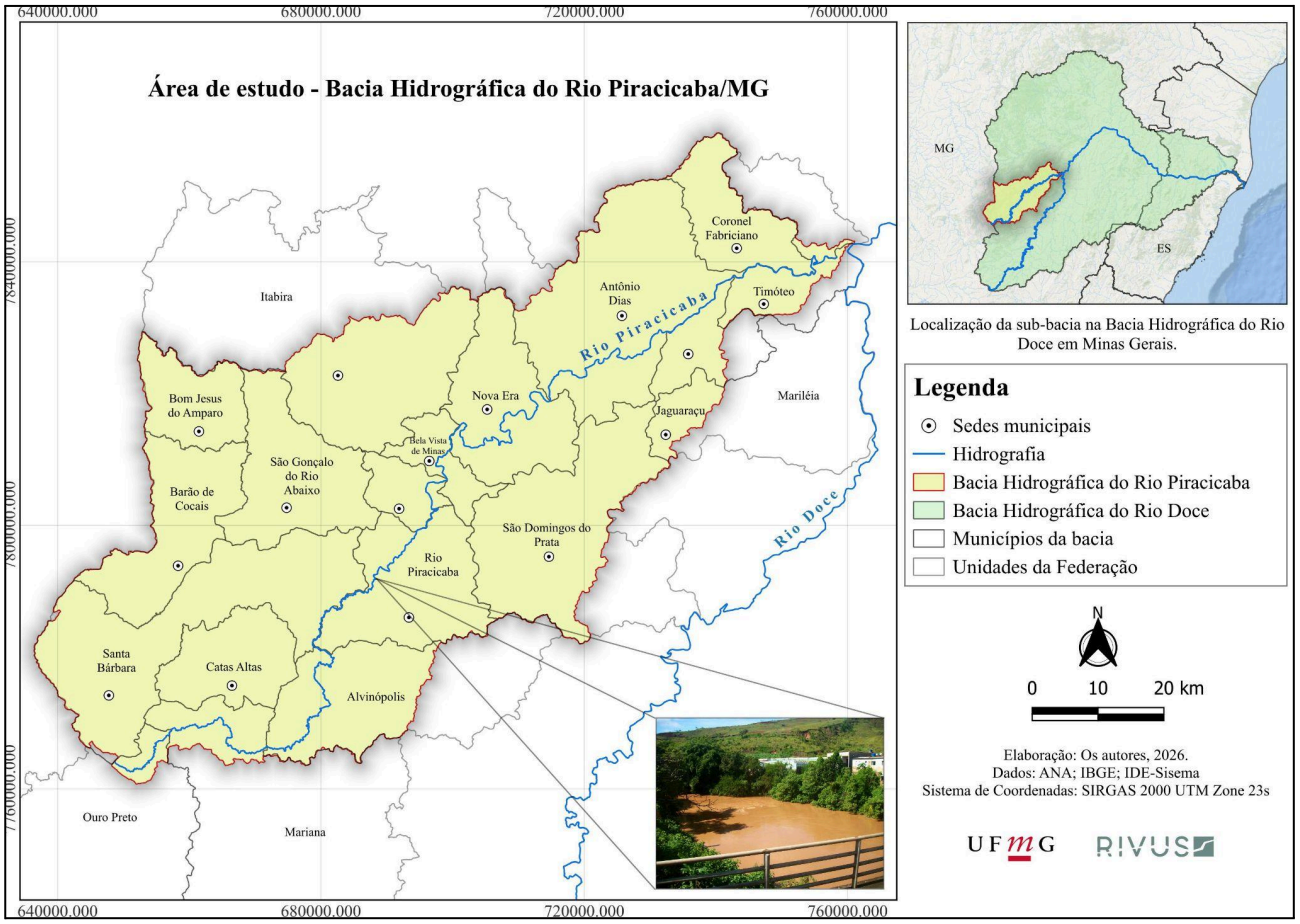
Localizada na margem esquerda do rio Doce, a bacia hidrográfica do rio Piracicaba é enquadrada na Circunscrição Hidrográfica do Rio Doce, conforme o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). O Piracicaba tem sua nascente na Serra da Caraça (1.650 m), no município de Ouro Preto, possuindo 241km em extensão e uma área de drenagem de aproximadamente 5.465 km², abrangendo 21 municípios total ou parcialmente inseridos na bacia (IGAM, 2010; CBH-Piracicaba, 2018). A bacia está inserida no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, com itabiritos, quartzitos e xistos do Supergrupo Minas e do Complexo de Guanhães, com rochas de alto grau metamórfico, como gnaisses bandados, migmatitos e granitoides (ALKMIM; MARSHAK, 1998).

O clima da bacia é o tropical de altitude (Cwa/Cwb) nas cabeceiras, e tropical sazonal (Aw) nas áreas de menor altitude, influenciando o regime hidrológico marcado por cheias repentinas no verão (ALVARES, 2013). A bacia apresenta relevo acidentado, com escarpas íngremes, nas cabeceiras, favorável à erosão acelerada, e colinas dissecadas no médio e baixo curso (Mares de Morros). A bacia é marcada por processos denudacionais intensos controlados por fatores estruturais e climáticos (AB'SÁBER, 1969; VALADÃO, 2009).

Na bacia predominam o Latossolo Vermelho e o Vermelho-Amarelo em áreas de estabilidade e Cambissolo Háplico em vertentes acidentadas (SISEMA, 2026). Apesar de serem geralmente profundos, estes solos são altamente suscetíveis à erosão quando há a ausência da cobertura vegetal, como no caso da BHRP. Neste caso, há elevada vulnerabilidade erosiva devido à intensa atividade de minerária e siderúrgica, além da urbanização acelerada, o que demanda monitoramento constante do aporte de sedimentos e metais pesados (EMBRAPA, 2018; CURI *et al.*, 2017; LEONEL *et al.*, 2021).

A região se encontra sob forte domínio da Floresta Estacional Semidecidual, apesar de estar inserida na faixa de transição com o cerrado (SISEMA 2026). No Alto vale do Piracicaba encontram-se remanescentes de campos de altitude e matas de galeria na Serra do Caraça, enquanto no médio e no baixo curso houve a substituição da vegetação natural por atividades antrópicas (IEF, 2019). A substituição da vegetação nativa por pastagens, silvicultura, áreas urbanas e atividades minerárias tem contribuído para a intensificação dos processos erosivos, alterando significativamente a dinâmica geomorfológica e hidrológica da bacia (DRUMMOND *et al.*, 2005; SOS Mata Atlântica, 2020).

**Figura 01: Mapa de localização da bacia do rio Piracicaba**




**Elaboração: Os autores, 2026.**

## TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS

Os procedimentos se iniciaram com a organização da base de dados secundária, sendo elas recortadas, reprojetadas para o Sistemas de Coordenadas SIRGAS 2000 UTM Zone 23S e padronizadas para a área da BHRP, com a filtragem dos dados no software *Quantum Gis (QGIS)*. A estimativa da perda média anual de solo foi realizada por meio da aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE), proposta por Renard *et al.* (1997), cuja formulação é dada por:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

A = perda média anual de solo;

R = erosividade da chuva;

K = erodibilidade do solo;

LS = fator topográfico;

C = uso e cobertura da terra;

P = práticas conservacionistas.

Para a execução e processamento dos dados, a plataforma de computação do *Google Earth Engine* (GEE) foi utilizada com resolução espacial de 30m e a projeção inicialmente definida para o projeto. Para o fator R, utilizou-se a série CHIRPS (2004-2023), a partir da precipitação média anual. O fator K foi obtido a partir de dados de pedologia disponibilizados pela EMBRAPA, sendo convertidos para o formato raster com base na erodibilidade das classes de solo. Além disso, foram utilizados os dados referentes ao Modelo Digital de Elevação (MDE) para o cálculo do fator LS, conforme Desmet & Govers (1996). O fator C foi calculado a partir do NDVI derivado das imagens do Sentinel-2 (2019-2023) com base na formulação de Van der Knijff J.M. *et al.* (1999). E por fim, o fator P foi fixado em 1, devido à ausência de dados detalhados referentes às práticas conservacionistas na bacia, procedimento amplamente empregado em estudos semelhantes desenvolvidos em bacias brasileiras. A integração dos fatores resultou no mapa de perda de solo (t $ha^{-1}$ $ano^{-1}$).

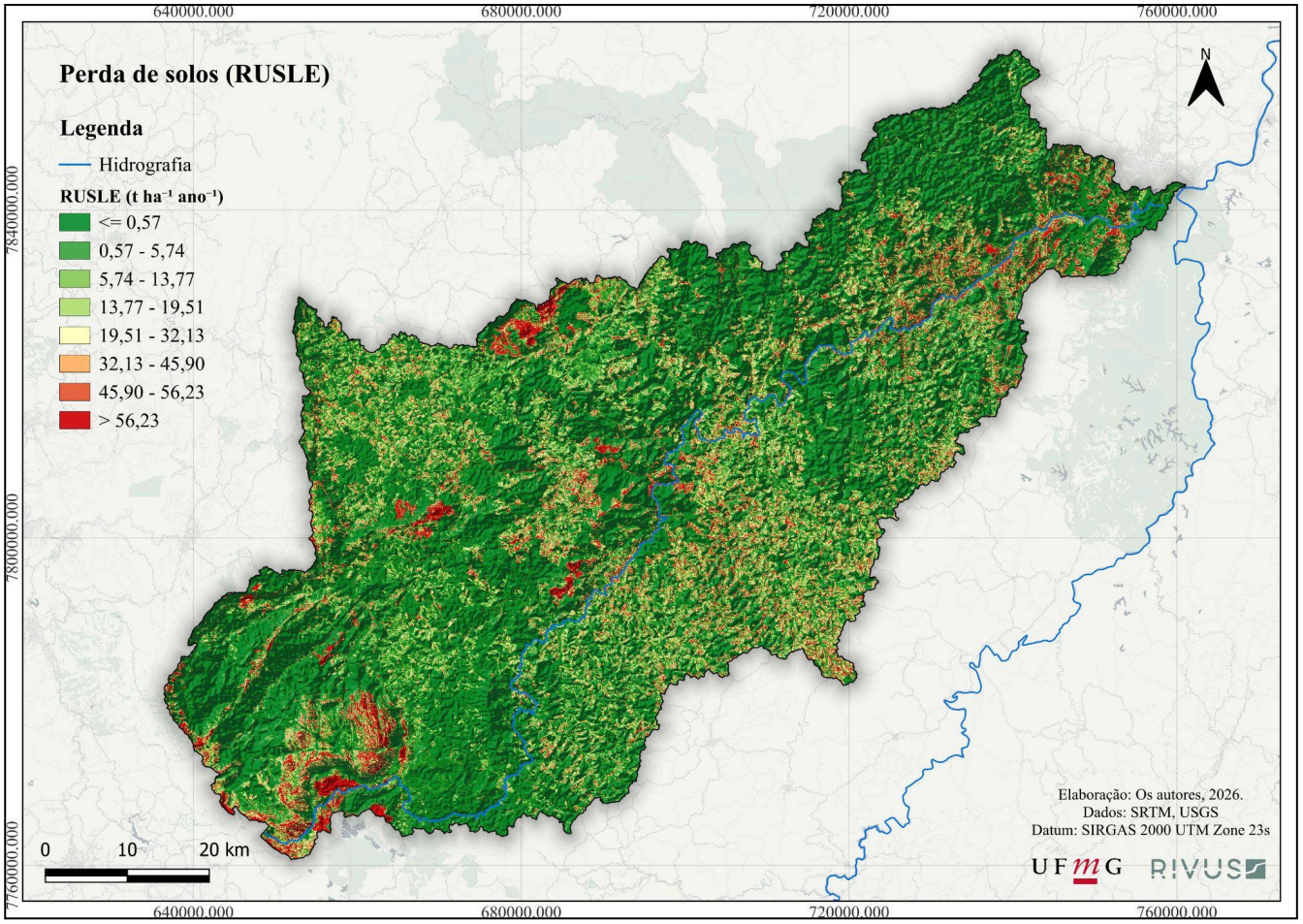
Em relação ao Índice de Conectividade, os dados foram obtidos através do cálculo do MDE, conforme Cavalli *et al.* (2013), utilizado por Borselli *et al.* (2008). O fator de ponderação (W) foi derivado da rugosidade topográfica, estimada pela topografia residual e pelo desvio padrão local da elevação, sendo normalizado entre 0,001 e 1 e utilizado como parâmetro de impedância ao escoamento superficial. O índice de conectividade expressa a relação da conexão de transferência dos sedimentos entre as vertentes e a rede hidrográfica, permitindo a identificação das áreas com maior potencial de transporte efetivo dos sedimentos para o curso d'água.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da RUSLE, obteve-se uma taxa perda de solo média correspondente a 11,42 t $ha^{-1}$ $ano^{-1}$ para a bacia, além de uma mediana de 1,78 t $ha^{-1}$ $ano^{-1}$ e o valor máximo pontual de 3.142,13 t $ha^{-1}$ $ano^{-1}$. A discrepância entre a média e a mediana mostra que a maior parte da bacia apresenta taxas de erosão controladas e abaixo do limite de tolerância de perda de solo (T), que para a maioria dos solos tropicais oscila entre 5 e 12 t $ha^{-1}$ $ano^{-1}$ (SMITH; WISCHMEIER, 1962; COGO *et al.*, 2003). Contudo, o valor médio é elevado a partir de porções pontuais de degradação severa na bacia, como relevos montanhosos e escarpados que potencializam o fator LS sobre os processos

erosivos (Figura 02). Áreas com elevada declividade tendem a apresentar maior velocidade do escoamento superficial, intensificando a desagregação e o transporte de partículas do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2014). Deve-se destacar as áreas onde há o predomínio de solo exposto, possivelmente associado ao manejo inadequado do solo e da remoção da cobertura vegetal, associados ao uso e cobertura da terra (Fator C).

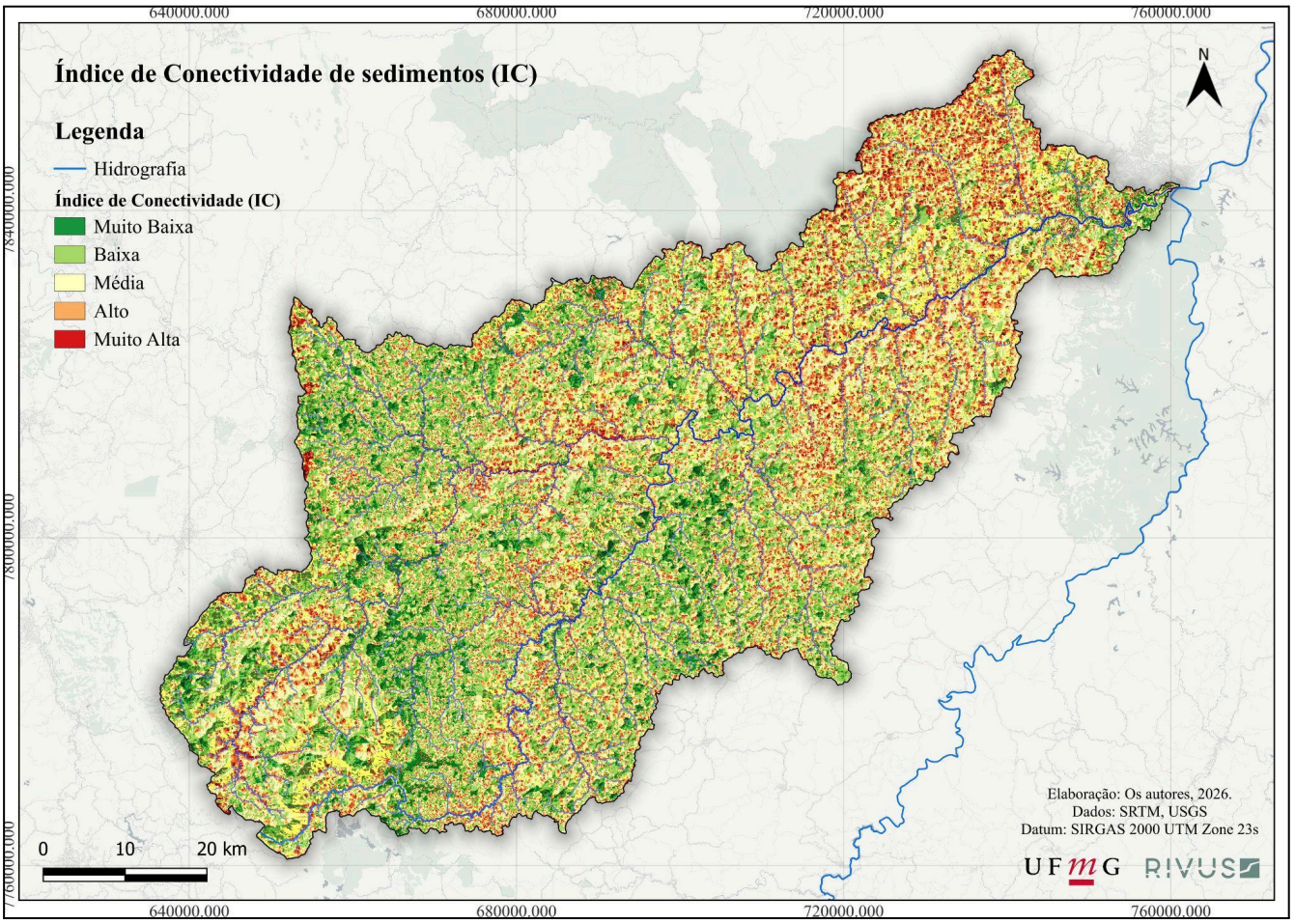
**Figura 02: Mapa de Perda de Solos obtido através da equação RUSLE.**




**Elaboração: Os autores, 2026.**

Os resultados apontam para uma predominância de classes médias a altas de conectividade de sedimentos em diferentes setores da bacia, sobretudo próximos à rede hidrográfica, a exemplo das porções leste a nordeste e em áreas de relevo mais acidentado, como no alto curso (Serra do Caraça). Conforme proposto por Borselli, Cassi e Torri (2008), elevados índices de conectividade indicam maior potencial de transferência de sedimentos entre as vertentes e os canais fluviais, favorecendo o aporte sedimentar e o assoreamento dos cursos d'água em áreas com erosão acelerada (Figura 03).

**Figura 03: Índice de Conectividade de sedimentos.**




**Elaboração: Os autores, 2026.**

Apesar disso, a integração entre o RUSLE e o IC mostra que nem todas as áreas de elevada perda de solos apresentam alta conectividade no transporte de sedimentos para a rede hidrográfica, indicando uma retenção parcial dos sedimentos durante a dinâmica das vertentes. Destacam-se as áreas com erosão moderada, mas com alta conexão, potencializando o transporte sedimentar para os cursos d'água. Portanto, é possível reforçar a importância da combinação das duas ferramentas ao estimar a produção, a conexão e o transporte de sedimentos nos estudos de assoreamento de cursos d´água (CAVALLI *et al.*, 2013).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem espacial da erosão hídrica na BHRP possibilitou uma leitura da evolução da paisagem quanto à erosão hídrica, fortemente condicionada por fatores geomorfológicos e de conexão do transporte de sedimentos, além da conversão do uso da terra. A alta conectividade em

vales encaixados indica um alto potencial de degradação e comprometimento da qualidade da água por assoreamento, evidenciando a imprescindibilidade de intervenções associadas à conservação do solo e da água. Neste contexto, cabe lembrar estratégias como terraceamento, recuperação de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e implantação de bacias de infiltração (barraginhas), focando em áreas onde há maior taxa do fator LS, a exemplo da porção sudoeste da BHRP e em áreas de alta conectividade, como as calhas fluviais da porção leste.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa PQ 317019/2025-2 do Prof. Antônio Magalhães, à FAPEMIG e ao CNPq pelo auxílio financeiro no âmbito dos projetos APQ-00770-24 e 408177/2024, respectivamente; ao grupo de pesquisa RIVUS - Geomorfologia e Recursos Hídricos.

## REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A. N. **Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário**. *Geomorfologia*, São Paulo, n. 18, p. 1–23, 1969.

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. **Transamazonian orogeny in the southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero**. *Precambrian Research*, v. 90, p. 29–58, 1998.

ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, p. 711-728, 2013.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 9. ed. São Paulo: Ícone, 2014.

BORSELLI, L.; CASSI, P.; TORRI, D. **Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment**. *Catena*, v. 75, n. 3, p. 268-277, 2008.

CAVALLI, M. *et al.* **Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments**. *Geomorphology*, v. 188, p. 31–41, 2013.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. **Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo do solo e estágios de desenvolvimento da cultura do milho**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, n. 4, p. 675-685, 2003.

CBH-PIRACICABA. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piracicaba**. João Monlevade: Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba, 2018.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Geodiversidade do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2014.

CURI, N. *et al.* **Pedologia: solos dos biomas brasileiros**. Viçosa: SBCS, 2017.

CUNHA, L. G. A.; VIEIRA, E. M. **Socio-environmental vulnerability analysis of the Piracicaba River Basin as an environmental indicator for the management of water resources**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 4, p. 1926–1946, 2022. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.4.p1926-1946.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. **A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units**. *Journal of Soil and Water Conservation*, Ankeny, v. 51, n. 5, p. 427–433, 1996.

DRUMMOND, G. M. *et al.* **Biodiversidade em Minas Gerais: um atlas para sua conservação**. Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS (IEF). **Plano de Manejo da RPPN Santuário do Caraça**. Belo Horizonte: IEF/Santuário do Caraça, 2013.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais**. Belo Horizonte: IGAM, 2010.

LEONEL, A. S. *et al.* **Avaliação da vulnerabilidade erosiva na Bacia do Rio Piracicaba (MG) frente aos impactos da mineração e expansão urbana**. *Revista Brasileira de Gestão e Hidrologia*, v. 8, n. 2, p. 115–130, 2021.

MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra no Brasil (Coleção 9)**. São Paulo: MapBiomas, 2024. Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/. Acesso em: 17 maio 2026.

MINAS GERAIS. **Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA)**. IDE-Sisema: Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte: SISEMA, [s.d.]. Disponível em: https://geoportal.meioambiente.mg.gov.br/. Acesso em: 15 maio 2026.

MORAES, R. A.; NASCIMENTO, A. T. A. **A análise temporal do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Piracicaba em Minas Gerais**. *Geoambiente On-line*, n. 38, p. 19–37, 2020.

RENARD, K. G. *et al.* **Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Washington: USDA, 1997.

SILVA, M. A. *et al.* **Impactos da mineração na dinâmica hidrossedimentológica na bacia do rio Piracicaba (MG)**. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 18, n. 2, p. 345–360, 2017.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica**. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica, 2020.

VALADÃO, R. C. **Evolução de longo termo do relevo do Brasil oriental**. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 10, n. 2, p. 3–14, 2009.

VAN DER KNIJFF, J. M.; JONES, R. J. A.; MONTANARELLA, L. **Soil erosion risk assessment in Italy.** Luxembourg: European Soil Bureau, 1999.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture (USDA), 1978. (Agriculture Handbook, n. 537).

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Soil-loss estimation as a tool in soil and water management planning**. IASH Publication, v. 59, p. 148-159, 1962.