

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ÍNDICE DE CONECTIVIDADE DE SEDIMENTOS PARA O ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

Geraldo André Rosseto Barreto¹ ; Livia Luchi Rabelo²; Lizandra Broseghini Föeger³; Diogo Costa Buarque⁴; Eberval Marchioro⁵; Murilo Brazzali Rodrigues⁶ & Mino Viana Sorribas⁷

Abstract: Soil erosion represents one of the main global environmental challenges, affecting water resource quality and the sustainability of land use. In this context, the present study applies the Sediment Connectivity Index (IC) to the state of Espírito Santo, to identify spatial patterns of lateral sediment connectivity and support environmental planning. The IC enables the assessment of the ease with which sediments are transported from hillslopes to watercourses, considering physical factors such as topography and land cover. The methodology was based on geotechnologies, particularly using Geographic Information Systems (GIS). A Digital Elevation Model (DEM) with a 5-meter spatial resolution and satellite-derived land use and land cover data were employed. The index was calculated following the model proposed by Borselli *et al.* (2008), incorporating variables such as slope, surface roughness, and the C factor (soil protection or erosion impedance). Spatial reclassification was performed into six categories using the natural breaks method. Results showed that the highest sediment connectivity values occur in mountainous regions with intensive land use, such as the Santa Maria da Vitória, Reis Magos, and Itaúnas river basins. Areas with preserved vegetation exhibited low connectivity, even on steep terrains. The study highlights priority areas for conservation, providing valuable technical input for public policies focused on environmental management and erosion control in Espírito Santo.

Resumo: A erosão do solo representa um dos principais desafios ambientais globais, impactando a qualidade dos recursos hídricos e a sustentabilidade do uso da terra. Dentro deste contexto, o estudo aplica o Índice de Conectividade de Sedimentos (IC) para o estado do Espírito Santo, com o objetivo de identificar padrões espaciais de conectividade lateral de sedimentos e apoiar o planejamento ambiental. O IC permite avaliar a facilidade com que os sedimentos se deslocam de encostas até os cursos d'água, considerando fatores físicos como relevo e cobertura do solo. A metodologia baseou-se em geotecnologias, especialmente o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Foram utilizados o Modelo Digital de Elevação com resolução de 5 metros e dados de uso e cobertura do solo obtidos por satélite. O índice foi calculado com base no modelo proposto por Borselli *et al.* (2008), incorporando variáveis como declividade, rugosidade da superfície e fator C (impedância do solo à erosão). A reclassificação espacial foi realizada em seis classes, por meio do método de quebras naturais. Os resultados revelaram que as maiores conectividades ocorrem em regiões montanhosas com uso intensivo do solo, como nas bacias dos rios Santa Maria da Vitória, Reis Magos e Itaúnas. Áreas com vegetação preservada apresentaram baixa conectividade, mesmo em terrenos íngremes. O

1) Professor na Universidade Vila Velha e doutorando em Engenharia Ambiental na Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, 514, gandrebarreto@gmail.com.

2) Mestre e Pesquisadora em Engenharia Ambiental na Fundação Espírito Santense de Tecnologia, Av. Fernando Ferrari, 1080, livia.luchi.rabelo@gmail.com.

3) Doutoranda em Engenharia Ambiental na Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, 514, lizandra.bf@gmail.com.

4) Professor PhD na Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Ambiental, Av. Fernando Ferrari, 514, diogo.buarque@gmail.com.

5) Professor PhD na Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Geografia, Av. Fernando Ferrari, 514, ebervalm@gmail.com.

6) Pós-doutorando em Engenharia Ambiental na Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, 514, murilobrazzali@gmail.com.

7) Pós-doutorando em Engenharia Ambiental na Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, 514, mino.sorribas@gmail.com.

estudo destaca regiões prioritárias para conservação, fornecendo subsídios relevantes para políticas públicas de gestão ambiental e controle da erosão no Espírito Santo.

Palavras-Chave – Conectividade dos Sedimentos; Índice de Conectividade, Sistema de Informações Geográficas.

INTRODUÇÃO

A erosão do solo representa um dos mais graves e complexos desafios ambientais relacionados ao manejo do uso da terra em escala global. Entre os impactos provocados pela erosão estão as alterações na cobertura do solo, a transferência de sedimentos, a saturação das redes de drenagem, acarretando no aumento ao risco de inundações, entre outros (Morgan, 2005). Dessa forma, compreender os fatores que controlam a erosão, o transporte e a deposição de sedimentos, como o clima, a topografia e a geologia são fundamentais, uma vez que tais elementos afetam o fornecimento de água para a rede de drenagem.

Nesse contexto, um conceito que vem sendo muito utilizado na avaliação da dinâmica dos sedimentos é a conectividade. Esse conceito foi introduzido formalmente na hidrologia e na geomorfologia por Bracken e Croke (2007) e difundido por Borselli *et al.* (2008). A conectividade é considerada um conceito-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, onde existe uma grande variabilidade nas características das bacias hidrográficas brasileiras (Zanandrea *et al.*, 2020).

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; Bracken *et al.*, 2007).

A conectividade dos sedimentos surge em diferentes escalas espaciais. No que tange a variação espacial, esta possui três componentes: lateral, longitudinal e vertical. A conectividade lateral é caracterizada pela relação entre a rede de canais e a paisagem que incluem as relações vertente-canal e canal-planície de inundação. A conectividade longitudinal reflete a capacidade do canal transferir sedimentos de montante para jusante e a conectividade vertical refere-se às trocas químicas, biológicas e hidrológicas que ocorrem entre superfície e subsuperfície, controladas pela textura do material da superfície (Fryirs *et al.*, 2007).

A caracterização dos padrões de conectividade lateral em bacias hidrográficas auxilia na identificação de fontes de sedimentos, bem como na definição dos caminhos nos quais essa transferência ocorre (Cavalli *et al.*, 2013). Essa caracterização ocorre, geralmente, por meio de Índices de Conectividade (IC), que representam a possibilidade do sedimento, gerado em um determinado local, chegar a um ponto específico de deposição ou ao canal, considerando a morfometria da encosta (Borselli *et al.*, 2008; Heckmann *et al.*, 2018).

Em grandes áreas, como estados, por exemplo, a conectividade dos sedimentos desempenha um papel essencial na compreensão da dinâmica dos fluxos de sedimentos (Fryis, 2013), permitindo identificar áreas com maior propensão à entrega efetiva de sedimentos aos canais, orientando o reconhecimento de regiões críticas para o controle da erosão e a mitigação de impactos como o

assoreamento de corpos hídricos. Além disso, o mapeamento do IC em grandes extensões territoriais representa uma ferramenta estratégica para apoiar o planejamento ambiental e a gestão integrada de bacias hidrográficas, especialmente em contextos com disponibilidade limitada de dados de campo.

Com base nessa abordagem, o objetivo do presente estudo foi elaborar um mapa do Índice de Conectividade para o estado do Espírito Santo, visando identificar os padrões espaciais de conectividade lateral de sedimentos em escala estadual, de modo a permitir a visualização de áreas com maior potencial de entrega de sedimentos à rede de drenagem e contribuir para o entendimento da dinâmica de sedimentos e para a identificação de zonas prioritárias para ações de manejo e conservação do solo

ÁREA DE ESTUDO

O Estado do Espírito Santo (Figura 1) estende-se entre os paralelos 17° e 22° sul e os meridianos 39° e 42° oeste, compondo a região sudeste do Brasil juntamente com os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. Limita-se a leste com o Oceano Atlântico, ao norte com o estado da Bahia, a oeste com Minas Gerais e ao sul com o Rio de Janeiro (SEAMA; AGERH, 2018).

Segundo informações disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, o território do Espírito Santo ocupa uma área de 46.089,39 km², ocupando pouco mais de 0,5% do território nacional, e está completamente inserido no bioma Mata Atlântica.

Dentre os diversos padrões de relevo existentes no estado, predomina-se o Domínio Montanhoso, que ocupa uma área de quase 15 mil km² (pouco mais de 30 % da superfície capixaba) majoritariamente ao oeste, e apresenta uma amplitude acima de 300 metros (Figura 2). A segunda tipologia predominante é o Domínio de Morros e Serras Baixas, que ocupa aproximadamente 19% da superfície do estado. Essa região é caracterizada pela existência de morros de topos arredondados com amplitudes variando de 80 a 200 metros. A formação de Tabuleiros ocupa uma área de aproximadamente 7.800 km² no Espírito Santo, sendo caracterizada pela forma suavemente dissecada, superfícies extensas, amplitudes que variam de 20 a 50 metros e inclinações entre 0 e 3°.

Em relação ao clima, o Espírito Santo encontra-se na zona Tropical Central, com um clima quente e predominantemente úmido, sem uma estação fria definida. Segundo a classificação de Köppen, a maior parte do Estado possui clima tropical úmido (am), com temperaturas médias acima dos 18°C. Essa caracterização climática está diretamente relacionada com os valores de precipitação locais, que no caso capixaba, é verificada por duas situações opostas de temperatura, sendo: junho a setembro com as menores temperaturas e período mais seco e dezembro a março as maiores temperaturas com maior índice pluviométrico. Esse cenário determina períodos de um inverno seco e de um verão úmido (SEAMA; AGERH, 2018).

Em relação ao uso e ocupação do solo (Figura 3) o Espírito Santo possui 65,6% do seu território composto por áreas antropizadas, sendo boa parte desse montante referente a áreas de pastagem e agricultura (SEAMA; AGERH, 2018)

Figura 1 – Localização do Estado do Espírito Santo.

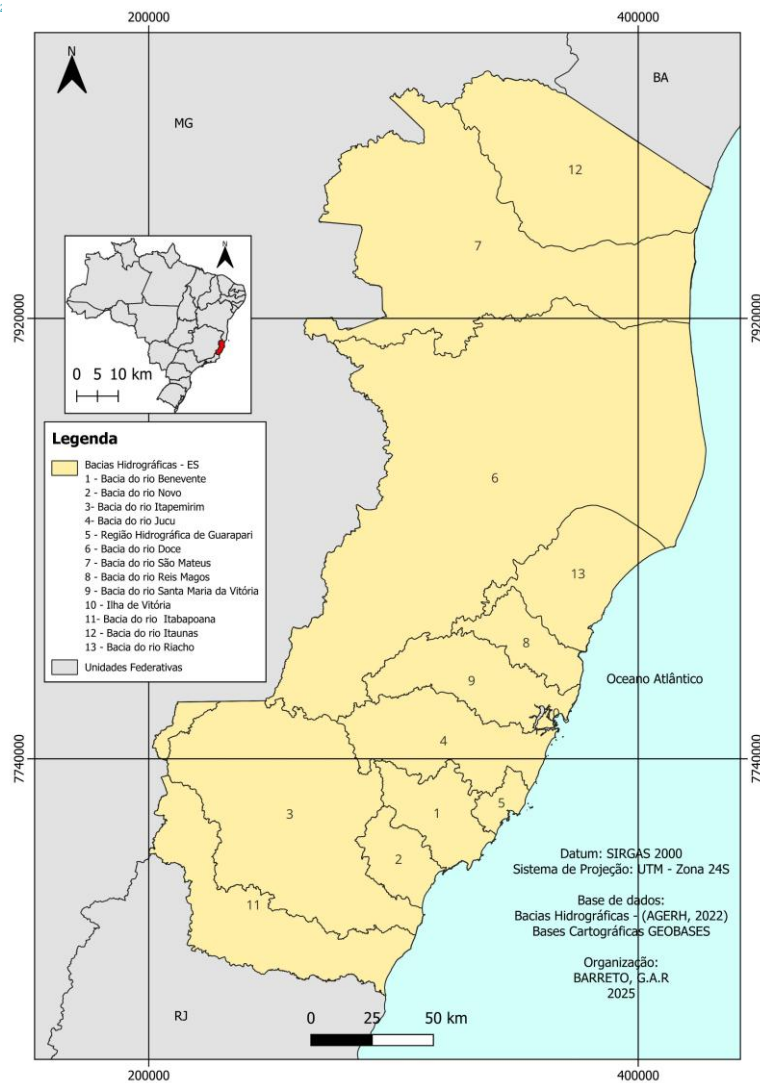


Figura 2 – Relevo do Estado do Espírito Santo

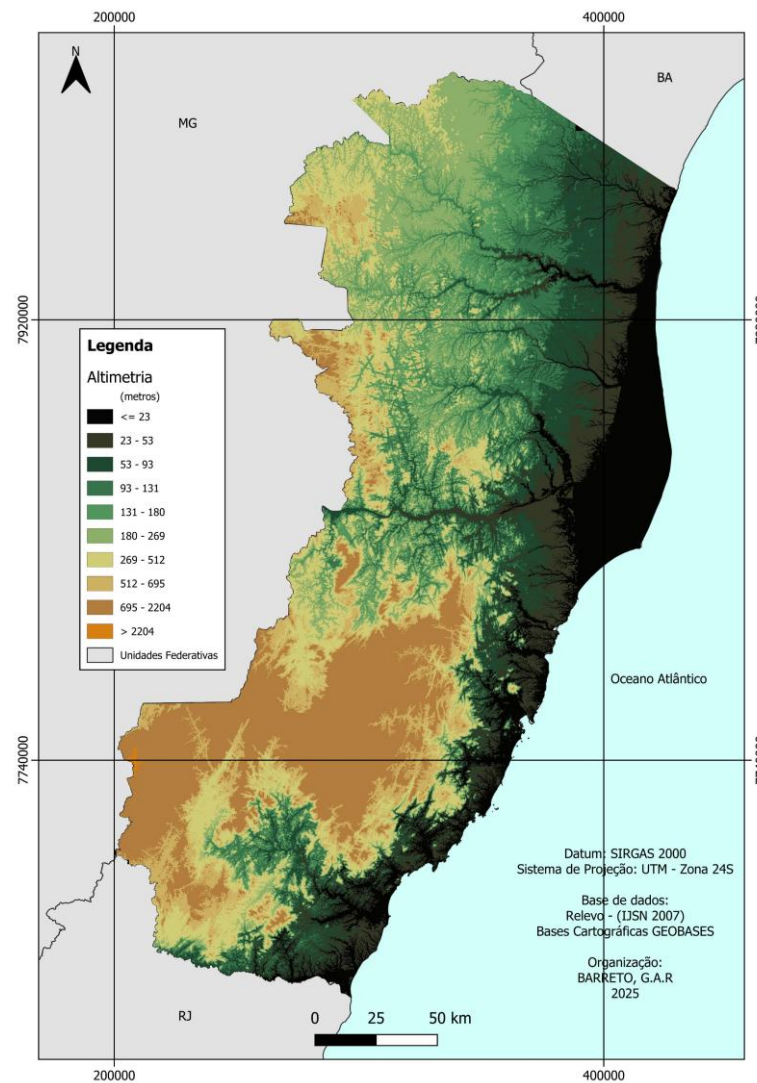
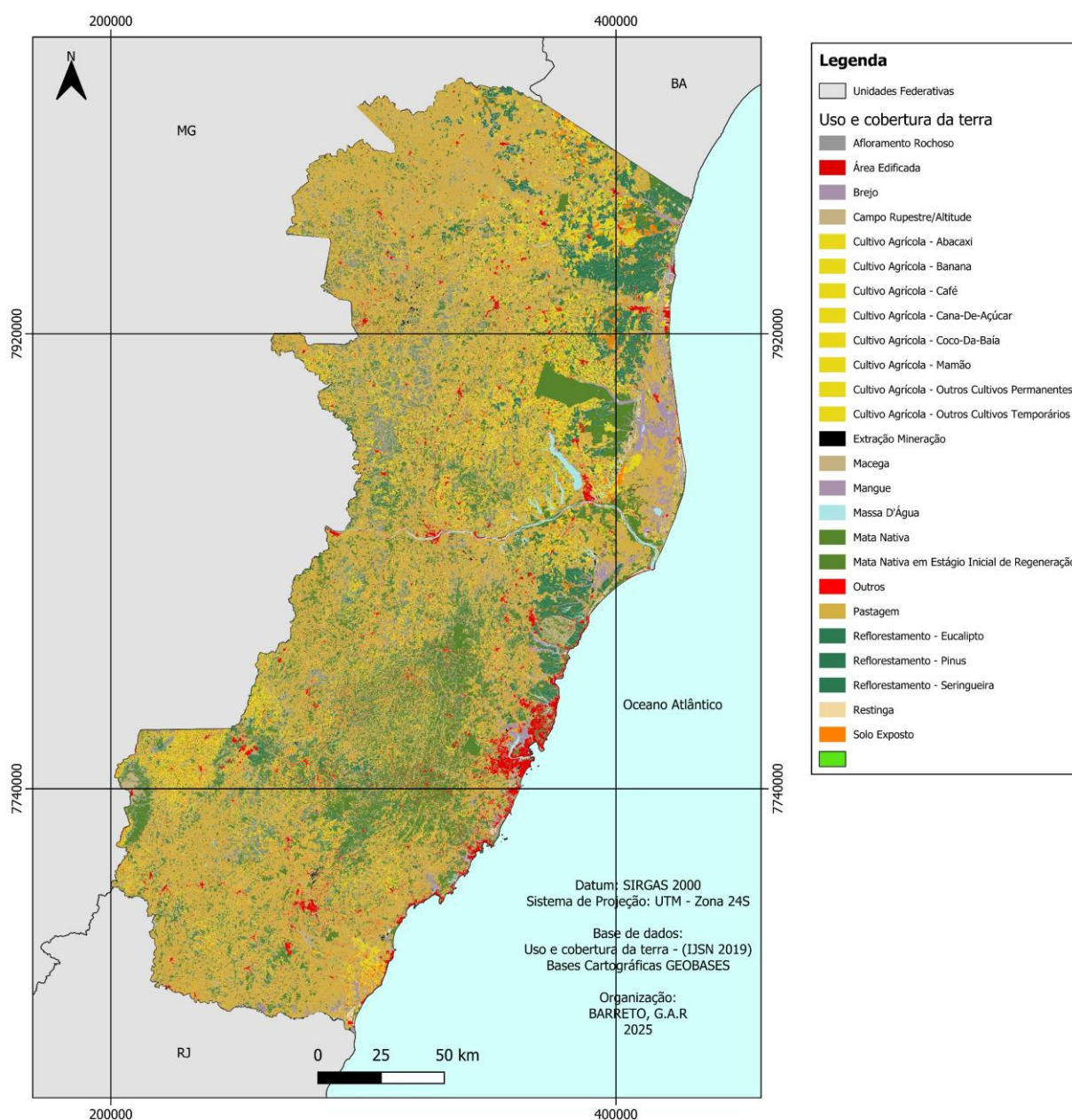


Figura 3 – Uso e ocupação do solo do Estado do Espírito Santo



METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do mapa de IC do Estado do Espírito Santo, foi utilizado um Sistema de Informação Geográfica (SIG), uma vez que o índice é distribuído espacialmente, com foco principal na influência da topografia sobre a conectividade de sedimentos, considerando também informações relacionadas ao uso e cobertura do solo, juntamente com seus respectivos fatores de proteção do solo (fator C ou impedância). O índice de conectividade proposto por Borselli *et al.* (2008) se baseia nas características físicas da área a montante e do trajeto a jusante em relação a um ponto específico.

Com base nos resultados espaciais do IC obtidos para o Estado do Espírito Santo, foi realizada uma reclassificação em seis categorias utilizando o método de quebras naturais (natural breaks) no

ArcMap, visando uma melhor distribuição espacial do índice. Essa operação, juntamente com os demais processos de modelagem necessários para obter o índice de conectividade de sedimentos para o Espírito Santo, foi conduzida utilizando o software ArcGIS™ 10.8, considerando os atributos topográficos da paisagem e o fator de proteção do solo (fator C ou impedância), uma vez que esses aspectos são usados para determinar a eficácia relativa dos sistemas de manejo de culturas em termos de perda de solo. Para o fator C, de uso e cobertura do solo, foram utilizados os valores compilados por Lobo (2022) advindos da literatura científica. O IC é definido como:

$$IC = \log_{10} \frac{D_{up}}{D_{dn}}$$

onde: D_{up} (*Upslope component*) designa a área de drenagem onde o sedimento é produzido, sendo necessário compreender a morfologia e o uso da terra e D_{dn} (*Downslope component*) designa o caminho que o fluxo percorre, bem como a rugosidade e a inclinação na superfície.

O componente D_{up} é estimado por:

$$D_{up} = \overline{W} \overline{S} \sqrt{A} \quad (2)$$

onde: \overline{W} é o fator de ponderação médio (adimensional) à montante da área de contribuição. \overline{S} é o gradiente de declive médio da área de contribuição da vertente (m/m) e A é a área de contribuição do declive (m²).

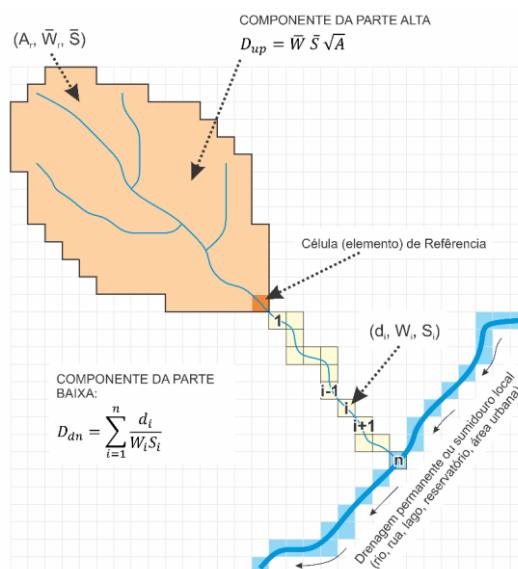
O componente D_{dn} considera o tamanho do caminho do fluxo potencial que o sedimento precisa percorrer a fim de atingir um determinado ponto. Ele é expresso por:

$$D_{dn} = \sum_i \frac{d_i}{W_i S_i} \quad (3)$$

onde d_i é o comprimento do caminho do fluxo ao longo da i-ésima célula (m), W_i e S_i são fatores de ponderação e o gradiente de inclinação da i-ésima célula respectivamente.

Esquemáticamente o cálculo do IC pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 – Ilustração esquemática para o cálculo do IC



De acordo com Borselli *et al.* (2008), para compreender e obter o IC, é necessário avaliar as características morfométricas da bacia hidrográfica. É importante observar que $W = C$, que corresponde ao fator de cobertura do solo da RUSLE. O fator C atinge seu valor máximo quando o

solo está sob maior risco de erosão (menos protegido) e diminui até zero quando o solo está totalmente protegido.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado no estudo foi disponibilizado pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – IEMA, obtido a partir das imagens do aerolevante realizado nos anos de 2007 e 2008. O MDE possui resolução espacial de 5 metros (IEMA, 2025).

Para o uso e cobertura do solo, foi utilizado o mapa disponibilizado pelo Instituto Jones dos Santos Neves. O mapeamento foi realizado através da fotointerpretação das imagens do satélite Kompsat - 3/3A, coletadas nos anos de 2019-2020 (IJSN, 2024).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição espacial do Índice de Conectividade de Sedimentos (IC) no Espírito Santo (Figura 5) revela uma forte dependência da interação entre características topográficas, cobertura da terra. A conectividade é mais intensa nas regiões onde há declividades acentuadas combinadas a usos do solo com baixa rugosidade superficial (alto fator C), com destaque para os setores serranos e de transição entre o planalto e o litoral.

Os maiores índices de conectividade ($IC > -6.5231$) se concentram sobretudo nas bacias do rio Santa Maria da Vitória (9), rio Reis Magos (8), rio Itaúnas (12) e partes das bacias do rio Doce (6) e rio Itabapoana (11). Nessas áreas, o relevo é predominantemente acidentado, com altitudes entre 512 m e 2.204 m, e os usos do solo incluem agricultura intensiva, pastagens degradadas, áreas urbanas e solos expostos — todos fatores que favorecem o transporte de sedimentos até os canais fluviais.

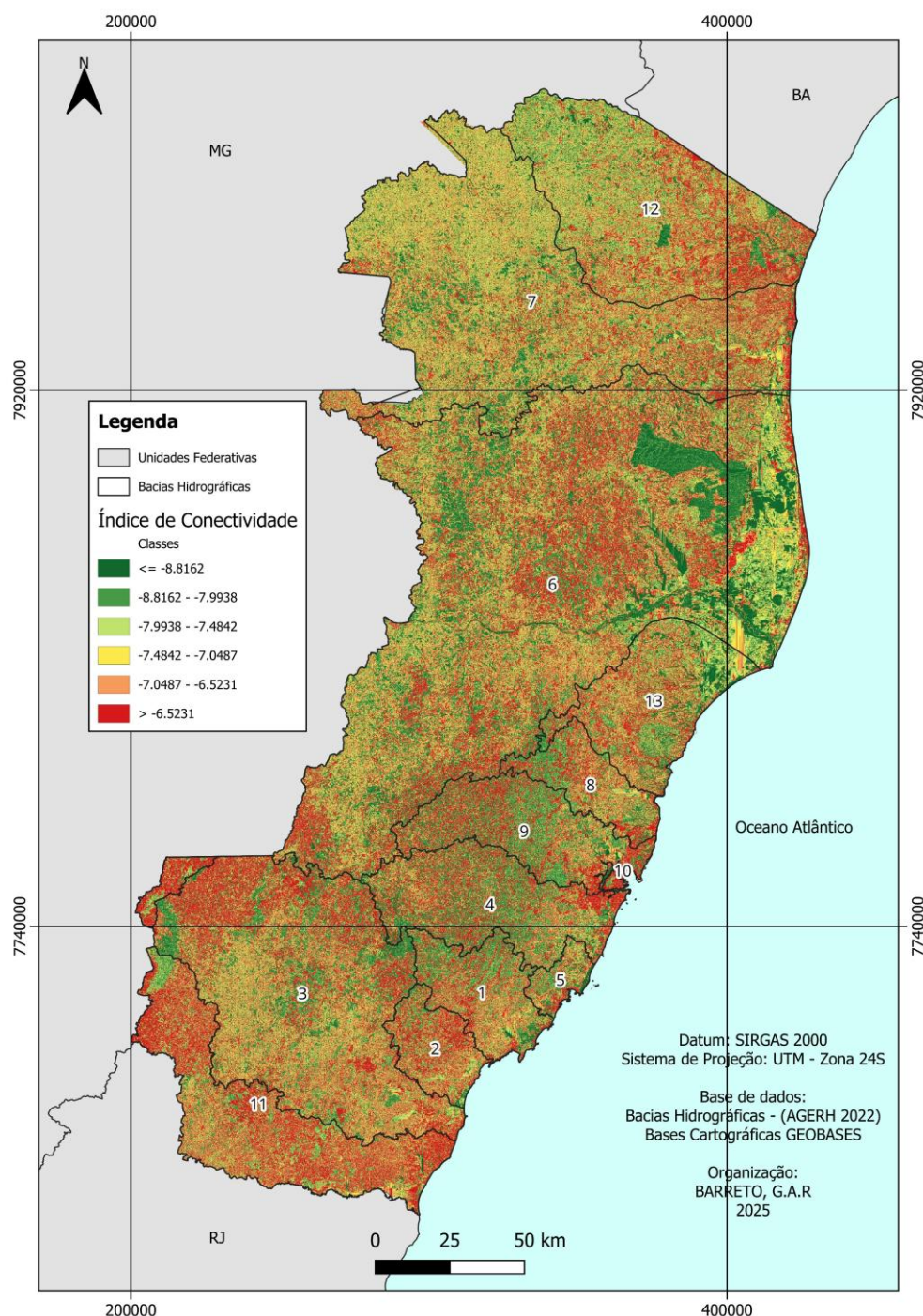
Nas regiões costeiras dessas mesmas bacias, a conectividade permanece elevada mesmo com menor altimetria, devido à ocupação urbana densa e ao uso do solo pouco protegido, como observado em trechos do litoral norte das bacias dos rios Itaúnas, São Mateus (7) e Riacho (13) e na Região Metropolitana da Grande Vitória (10).

Em contrapartida, as menores conectividades ($IC \leq -8.8162$) aparecem em áreas com mata nativa, reflorestamentos ou mata nativa em regeneração, mesmo quando situadas em terrenos íngremes. É o caso de trechos preservados nas bacias do rio Novo (2) e do rio Benevente (1), bem como em porções elevadas da bacia do rio Itapemirim (3). Isso evidencia que a presença de cobertura vegetal eficiente é capaz de mitigar significativamente a conectividade sedimentológica, mesmo em regiões íngremes.

A bacia do rio Doce (6), por sua extensão e diversidade de uso e cobertura, apresenta comportamento variado, com setores de alta conectividade nas regiões agrícolas e de pastagem a leste, e setores de menor conectividade em áreas florestadas do centro-oeste.

Na região sudoeste do Espírito Santo, destacam-se também altos valores do Índice de Conectividade de Sedimentos, especialmente na porção serrana da bacia do rio Itabapoana (11) e parte da bacia do rio Itapemirim (3), onde se localiza o Parque Nacional do Caparaó. Nessa área, predominam altas altitudes (acima de 1.000 metros, chegando a mais de 2.000 m) e declividades acentuadas, o que aumenta o potencial de conectividade mesmo em áreas com vegetação relativamente bem conservada. O relevo favorece a mobilização de sedimentos, e, em setores onde a cobertura do solo está comprometida, como áreas agrícolas em encostas ou pastagens, os valores do índice se elevam significativamente. Assim, mesmo em áreas de importância ecológica como o Caparaó, a interação entre relevo montanhoso e uso antrópico pode resultar em zonas de alta conectividade, que exigem atenção no planejamento do uso do solo e nas ações de conservação.

Figura 5 – Índice de Conectividade de Sedimentos para o Estado do Espírito Santo



Essa análise, realizada em escala estadual, evidencia que a conectividade de sedimentos é altamente variável no espaço, sendo condicionada por uma combinação de fatores físicos, como relevo e declividade, e antrópicos, como uso e cobertura da terra. A leitura integrada por bacias hidrográficas permite identificar áreas críticas onde o transporte de sedimentos para os corpos hídricos é mais intenso, orientando decisões estratégicas para o planejamento ambiental. Destacam-se como prioritárias para ações de restauração florestal, práticas conservacionistas e controle do uso do solo as bacias dos rios Reis Magos, Santa Maria da Vitória, São Mateus e Itaúnas, que concentram

amplas áreas com altos índices de conectividade e uso intensivo do solo, em especial nas faixas litorâneas e serranas. A identificação dessas áreas críticas é essencial para a promoção de uma gestão integrada e sustentável dos recursos naturais no Espírito Santo.

As bacias dos rios Itabapoana (11) e Itapemirim (3) também merecem especial atenção em função das altas altitudes na região sudoeste e uso agrícola das encostas. Já a bacia do rio Doce (6), em função de sua extensão, apresenta um comportamento misto, com áreas críticas em faixas agrícolas, mas também com bons trechos conservados.

CONCLUSÕES

O presente estudo realizou a aplicação do Índice de Conectividade de Sedimentos (IC) para todo o estado do Espírito Santo, revelando padrões espaciais importantes sobre o potencial de transporte de sedimentos nas bacias hidrográficas capixabas.

Os resultados indicaram que as maiores conectividades estão associadas a regiões com relevo acidentado e uso intensivo do solo, como agricultura, pastagens degradadas e áreas urbanas, especialmente nas bacias dos rios Santa Maria da Vitória, Reis Magos, Itaúnas e trechos da bacia do rio Doce. Por outro lado, áreas com cobertura vegetal preservada, mesmo em terrenos íngremes, apresentaram baixa conectividade, evidenciando o papel fundamental da vegetação na contenção da erosão e do transporte de sedimentos.

O trabalho discutiu ainda como os fatores físicos (como declividade e altitude) e antrópicos (uso e cobertura do solo) interagem para determinar os níveis de conectividade. A análise em escala estadual permitiu identificar regiões críticas que devem ser priorizadas em ações de conservação do solo, restauração florestal e planejamento ambiental. Destacam-se como áreas prioritárias para intervenção as faixas litorâneas e serranas de bacias com uso intensivo do solo e altos valores de IC, sendo fundamental a adoção de práticas conservacionistas que visem a redução da entrega de sedimentos aos corpos hídricos.

A relevância desse estudo para o Espírito Santo e para o Brasil é significativa, uma vez que fornece subsídios técnicos para o manejo sustentável dos recursos naturais e para a mitigação de impactos ambientais, como o assoreamento de rios e a perda de solos férteis. A metodologia baseada em geotecnologias, como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), pode ser replicada em outros estados e regiões do país, fortalecendo políticas públicas voltadas à gestão integrada de bacias hidrográficas. Assim, o trabalho contribui de forma concreta para o avanço da ciência aplicada à conservação ambiental e ao planejamento territorial.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.D.M.; SOUZA, J.O.P.; CORRÊA, A.C.B. (2016). *Dinâmica e caracterização fluvial da bacia do Riacho Grande, Serra Talhada-PE: abordagem da conectividade da paisagem*. Geo UERJ, v. 1, pp. 308-331.
- BORSELLI, L., et al. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. Catena, v.75, p. 268 – 277.
- BRACKEN, L. J., & CROKE, J. (2007). The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. Hydrological Processes, 21(13), 1749 – 1763.
- CAVALLI, M., et al. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. Geomorphology, v.188, p. 31–41.
- SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE – SEAMA E AGÊNCIA ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS – AGERH. (2018). Plano Estadual de Recursos Hídricos do Espírito Santo – PERH. <https://perh.es.gov.br/>
- FRYIRS, K., et al. (2007). Buffers, barriers and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades, Catena, v. 70, n. 1, p. 49-67.
- FRYIRS, K. (2013). (Dis) Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. Earth Surface Processes and Landforms, v.38, p. 30 – 46.
- HECKMANN, T., et al. (2018). Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. Earth-Science Rev. v.187, 77–101.
- INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE – IEMA. Modelo Digital de Elevação com pixel de 5 metros gerado a partir do levantamento aerofotogramétrico realizado em todo o Estado do Espírito Santo, em escala igual ou melhor a 1:25.000, nos anos de 2007 e 2008.
- INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES – IJSN. (2024). Mapeamento do uso e cobertura do solo do Espírito Santo, realizado através da fotointerpretação das imagens do satélite Kompsat - 3/3A, coletadas nos anos de 2019-2020.
- LOBO, I. A. (2022). Perda de solo por escoamento superficial: uma abordagem retrospectiva para uma bacia hidrográfica na região metropolitana da Grande Vitória (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo)
- MORGAN, R. P. C. (2005). Soil erosion and conservation. MPG Books. Reino Unido: MPG Books, 296 p.
- WOHL, E. (2019) Connectivity as an emergent property of geomorphic systems. Earth Surf, Process, Landforms, v. 44, n. 1, p. 4-26.
- ZANANDREA, F. et al. (2020). Conectividade dos sedimentos: conceitos, princípios e aplicações.