

# Transporte de sedimentos em bacias hidrográficas hispano-portuguesas montanhosas: avaliação da resposta hidrológica através da aplicação do índice de conectividade

## Sediment transport in mountainous Spanish-Portuguese watersheds: evaluation of the hydrological response by applying the connectivity index

Tamires Bertocco<sup>1,2,3,\*</sup>, Tomás de Figueiredo<sup>1,2</sup>, Antonio Paz-González<sup>3</sup> & Manuel López-Vicente<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigação de Montanha (CIMO), Instituto Politécnico de Bragança. 5300-253 Bragança, Portugal

<sup>2</sup> Laboratório Associado para a Sustentabilidade e Tecnologia em Regiões de Montanha (SusTEC), Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia, 5300-253 Bragança, Portugal

<sup>3</sup> Grupo Aquaterra, Centro Interdisciplinar de Química e Biología, Universidade da Coruña, CICA-UDC. 15071 A Coruña, España

(\*E-mail: tamires.bertocco@ipb.pt)

<https://doi.org/10.19084/rca.33353>

Recebido/received: 2023.07.31

Aceite/accepted: 2023.10.16

### RESUMO

O estudo da conectividade em bacias hidrográficas é fundamental para compreender a dinâmica dos processos erosivos e de transporte e acumulação temporária de sedimentos nos diferentes elementos da paisagem. Em regiões de montanha, o relevo intensifica e impacta diretamente a erosão do solo e, conseqüentemente, a redistribuição de sedimentos. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o padrão espacial de conectividade sedimentar, a partir de uma abordagem estrutural (sem alterações temporais) e considerando a foz como área de referência do cálculo em duas bacias hidrográficas de montanha localizadas entre Portugal e Espanha que incluem lameiros. Essa configuração representa o armazenamento temporário de sedimentos nas encostas e ao longo dos riachos. Para isso, utilizou-se o Índice Agregado de Conectividade Sedimentar (AIC) nas duas bacias de estudo. Os mapas para cada entrada foram elaborados, integrando informações de diversas fontes para detalhar a heterogeneidade espacial das bacias. Isso permitiu evidenciar a ligação entre a cobertura do solo e a conectividade hidrológica nas Bacias B.08 e B.13, onde terrenos rochosos e com pouca vegetação revelaram valores elevados de AIC, indicando uma maior propensão à erosão e transporte de sedimentos. Em contrapartida, áreas com vegetação densa e com presença de lameiros apresentaram valores baixos de AIC, sinalizando menor conectividade hidrológica e potencial inferior de transporte de sedimentos. A presença dos lameiros destaca o desempenho de um papel essencial na regulação hidrológica da zona de estudo.

**Palavras-chave:** Transporte de solo; Conectividade de paisagens; Zonas de montanha; Conectividade estrutural.

### ABSTRACT

The study of connectivity in river basins is fundamental to understanding the dynamics of erosion processes and the transport and temporary accumulation of sediment in the different elements of the landscape. In mountainous regions, the relief directly intensifies and impacts soil erosion and, consequently, sediment redistribution. In this context, this work aimed to evaluate the spatial pattern of sediment connectivity, from a structural approach (without temporal changes) and consider the mouth as the reference area for the calculation in two mountain watersheds located between Portugal and Spain that include lameiros. This configuration represents the temporary storage of sediment on slopes and along streams. To do this, the Aggregate Sediment Connectivity Index (AIC) was used in the two study basins. Maps were drawn up for each input, integrating information from various sources to detail the spatial heterogeneity of the basins. This made it possible to highlight the link between land cover and hydrological connectivity in Basins B.08 and B.13, where rocky terrain with little vegetation showed high AIC values, indicating a greater propensity to erosion and sediment transport. On the other hand, areas with dense vegetation and the presence of lameiros showed low AIC values, signaling less hydrological connectivity and lower potential for sediment transport. The presence of lameiros means that they play an essential role in the hydrological regulation of the study area.

**Keywords:** Soil transport; Landscape connectivity; Mountain areas; Structural connectivity.

## INTRODUÇÃO

A erosão do solo e o transporte de sedimentos são influenciados por vários fatores, incluindo características da bacia hidrográfica, condições hidrológicas, clima e gestão do solo (Chiang, 2019). Estudos em regiões montanhosas destacam o papel da vegetação e do uso e ocupação do solo na dinâmica do escoamento superficial e na carga de sedimentos (Bakker *et al.*, 2008). Nas regiões montanhosas do norte de Portugal e noroeste da Espanha, os lameiros tradicionais desempenham um papel importante na regulação hidrológica, formação e proteção do solo, além de contribuir para a diversidade biológica e serem economicamente produtivos (Pires *et al.*, 2015; Aguiar *et al.*, 2019).

A conectividade sedimentar é de grande relevância no estudo das bacias hidrográficas em zonas de montanha, considerando a transferência de partículas de solo e sedimentos pela água ao longo da paisagem. Para quantificar essa conectividade, foram

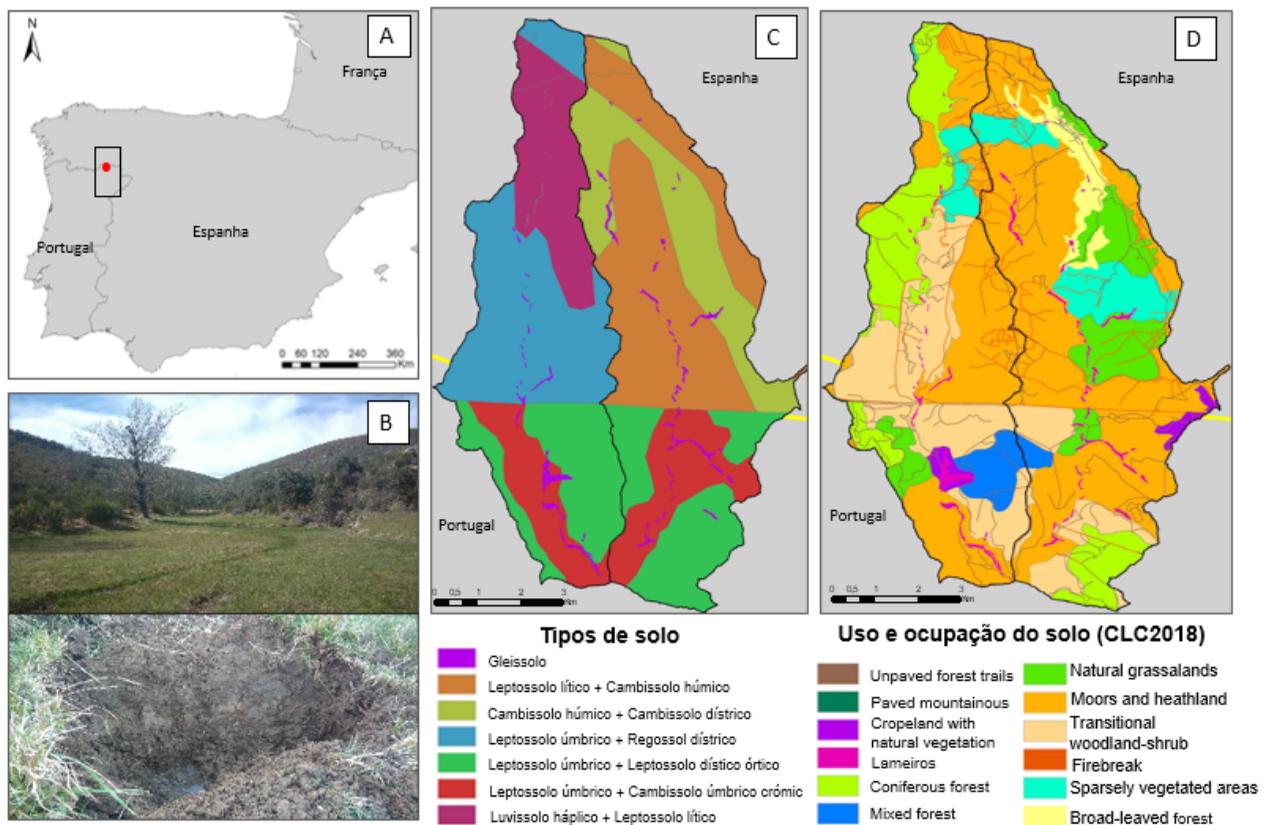
desenvolvidos índices, como o Índice de Conectividade (IC) e o Índice Agregado de Conectividade (AIC). Esses índices têm sido aplicados em estudos recentes em áreas montanhosas, permitindo uma análise abrangente da conectividade sedimentar em diferentes escalas (Cavalli *et al.*, 2013; López-Vicente *et al.*, 2020).

Diante deste contexto, o objetivo deste estudo foi caracterizar e avaliar a dinâmica hidrológica e sedimentar em duas bacias hidrográficas de montanha localizadas entre Portugal e Espanha, que incluem áreas de lameiros.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

Foram selecionadas duas pequenas bacias hidrográficas localizadas na zona transfronteiriça entre a província espanhola de Zamora e o distrito



**Figura 1** - A: Localização da área de estudo. B: Fotografias dos lameiros. C: Mapa dos tipos de solo. D: Uso e ocupação do solo, incluindo os elementos lineares da paisagem. Fonte: Adaptado de Agroconsultores (1991) e Corine Land Cover (2018).

português de Bragança (Figura 1A). As bacias são referidas como B.08 (14,54 km<sup>2</sup>) e B.13 (17,23 km<sup>2</sup>), onde a confluência dos rios que drenam as bacias hidrográficas dão origem ao rio Igrejas. A área portuguesa está situada no Parque Natural de Montesinho, região de Trás-os-Montes. Em relação às áreas de lameiros, a distribuição é bastante similar entre as bacias, especialmente na região sul, onde encontram-se 51 na B.08 e 47 na B.13. O tamanho médio dos lameiros é de aproximadamente 3056 m<sup>2</sup> na B.08 e 3949 m<sup>2</sup> na B.13. Essas características servem como base para a análise da relação entre ocupação do solo e conectividade hidrológica nessas bacias.

### Índice Agregado de Conectividade sedimentar (AIC)

Neste estudo, utilizou-se o AIC para avaliar e mapear a conectividade de sedimentos. O AIC empregado foi desenvolvido por López-Vicente e Ben-Salem (2019), com base em equações anteriores propostas por Borselli *et al.* (2008) e Cavalli *et al.* (2013). Este índice proporciona uma abordagem adequada para analisar a conectividade estrutural e funcional dos sedimentos podendo selecionar qualquer elemento da paisagem (foz, rio, barragem, albufeira, vala, estrada, etc.) como referência para o cálculo (López-Vicente *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2023). Os valores de entrada para o cálculo do AIC estão apresentados no Quadro 1.

As variáveis topográficas, como o fator de rugosidade do terreno (RT), declive (S), área (A), comprimento do fluxo (FL) e altitude, foram derivadas do Modelo Digital do Terreno (DEM) corrigido (depois de remover artefatos ou lacunas não reais), utilizando-se ferramentas disponíveis nos softwares QGIS Desktop 3.26.3 e ArcGIS© 10.8. Os valores de C (fator de gestão de vegetação e cultivo) para cada tipo de uso do solo foram obtidos a partir de estudos de síntese realizados por Panagos *et al.* (2015) para os países da União Europeia e por Marques *et al.* (2021) para Portugal.

Foram consideradas sete combinações de nove tipos de solo, utilizando-se cartografia disponível no Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG) e no Instituto Geológico e Mineiro de Espanha (IGME). Além disso, o fator Kp (permeabilidade do solo) foi obtido por meio de uma análise e síntese dos estudos de Agroconsultores (1991) e FAO (2008). Um total de 12 tipos de uso do solo foram mapeados, combinando diferentes fontes de dados, como um ortomosaico recente (PNOA, 2020) e o mapa mais atualizado do Corine Land Cover (CLC) 2018 (EEA, 2020).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram analisados com base nos valores médios do Índice Agregado de Conectividade

**Quadro 1 -** Valores médios dos principais parâmetros topográficos e entradas (S, C, RT, Kp e FL) do AIC para cada uso do solo nas duas bacias (B.08 e B.13)

CORINE	Uso e ocupação do solo	B.08 (Oeste)						B.13 (Este)						C
		Área (%)	A (m)	S (%)	RT (0-1)	Kp (0-1)	FL (m)	Área (%)	A (m)	S (%)	RT (0-1)	Kp (0-1)	FL (m)	
122	Redes viárias e ferroviárias e espaços associados (não pavimentadas)	0.9	834.4	16.0	0.9477	0.7924	5777	0.9	868.7	14.5	0.9779	0.6072	6352	1.0000
122	Redes viárias e ferroviárias e espaços associados (pavimentadas)	----	----	----	----	----	----	0.1	902.6	18.4	0.9461	0.5407	8277	1.0000
243	Agricultura com espaços naturais e semi-naturais	1.4	732.0	24.0	0.9572	0.8166	3302	1.1	848.4	10.8	0.9803	0.7086	5472	0.1342
311	Floresta de folhosas	----	----	----	----	----	----	5.0	885.0	28.4	0.9520	0.4541	9264	0.0013
312	Floresta de resinosas	19.4	807.4	21.9	0.9733	0.7674	8602	5.2	800.0	23.4	0.9734	0.8159	2344	0.0011
313	Floresta mistas	5.0	790.5	16.5	0.9790	0.8113	3690	0.9	836.8	13.1	0.9829	0.8113	3020	0.0011
321	Vegetação herbácea natural	3.0	810.0	26.6	0.9720	0.8240	4020	13.3	851.2	19.1	0.9764	0.4849	6880	0.0491
322	Matos	33.8	852.6	20.6	0.9744	0.7935	6387	54.0	852.7	19.4	0.9767	0.5550	6514	0.1000
324	Florestas abertas, cortes e novas plantações	30.8	892.4	20.4	0.9694	0.7971	5302	8.0	834.3	14.6	0.9788	0.8112	2912	0.0500
324	Estradas de corta-fogo	1.0	887.7	11.9	0.9837	0.7886	8151	1.0	876.6	11.5	0.9856	0.4615	7190	0.0500
333	Vegetação esparsa	3.6	897.4	19.5	0.9770	0.8996	9631	9.2	873.4	19.1	0.9764	0.4630	7906	0.4500
411	Lameiros	1.1	732.3	11.3	0.9485	0.2155	3675	1.2	784.4	13.2	0.9482	0.1930	5166	0.0010

A: Altitude. S:Declive.RT:Fator de rugosidade do terreno. Kp: Permeabilidade do solo. FL: Comprimento do fluxo. C: fator de gestão de vegetação e cultivo.

Sedimentar (AIC) para diferentes usos do solo nas bacias B.08 e B.13. O Quadro 2 apresenta os valores médios, enquanto a Figura 2 mostra a distribuição espacial do AIC, destacando áreas de alta e baixa conectividade sedimentar. Essa representação ajuda a identificar padrões e tendências, considerando também a retenção temporária de sedimentos nos canais de drenagem.

Com base no Quadro 2 e Figura 2, observa-se que na bacia B.08, os usos do solo com valores mais elevados de AIC são “Vegetação esparsa” (-1.315) e “Agricultura com espaços naturais e semi-naturais” (-2.274). Esses usos podem incluir terrenos rochosos e áreas com pouca vegetação natural (10% a 50%). Essas áreas, situadas em altitudes elevadas (897,4 m e 732 m) e com declives acentuados (19.5 e 24%), possuem menor capacidade de retenção do solo e infiltração de água, resultando em aumento da erosão e transporte de sedimentos.

Semelhantemente, na bacia B.13, os usos com maiores valores de AIC são “Vegetação herbácea natural” (-0.652) e “Vegetação esparsa” (-1.849). Essas áreas também podem abranger terrenos com pouca vegetação e menor capacidade de retenção do solo. Além disso, localizam-se em zonas de altitude significativa (810 e 873,4m) e declives acentuados (26.6 e 19.1%), o que amplifica a suscetibilidade à erosão.

Por outro lado, os valores mais baixos de AIC são observados nos usos de solo “Floresta de resinosas” (-6,061) e “Floresta mista” (-6,062) na bacia B.08, e situação análoga ocorre na bacia B.13 com

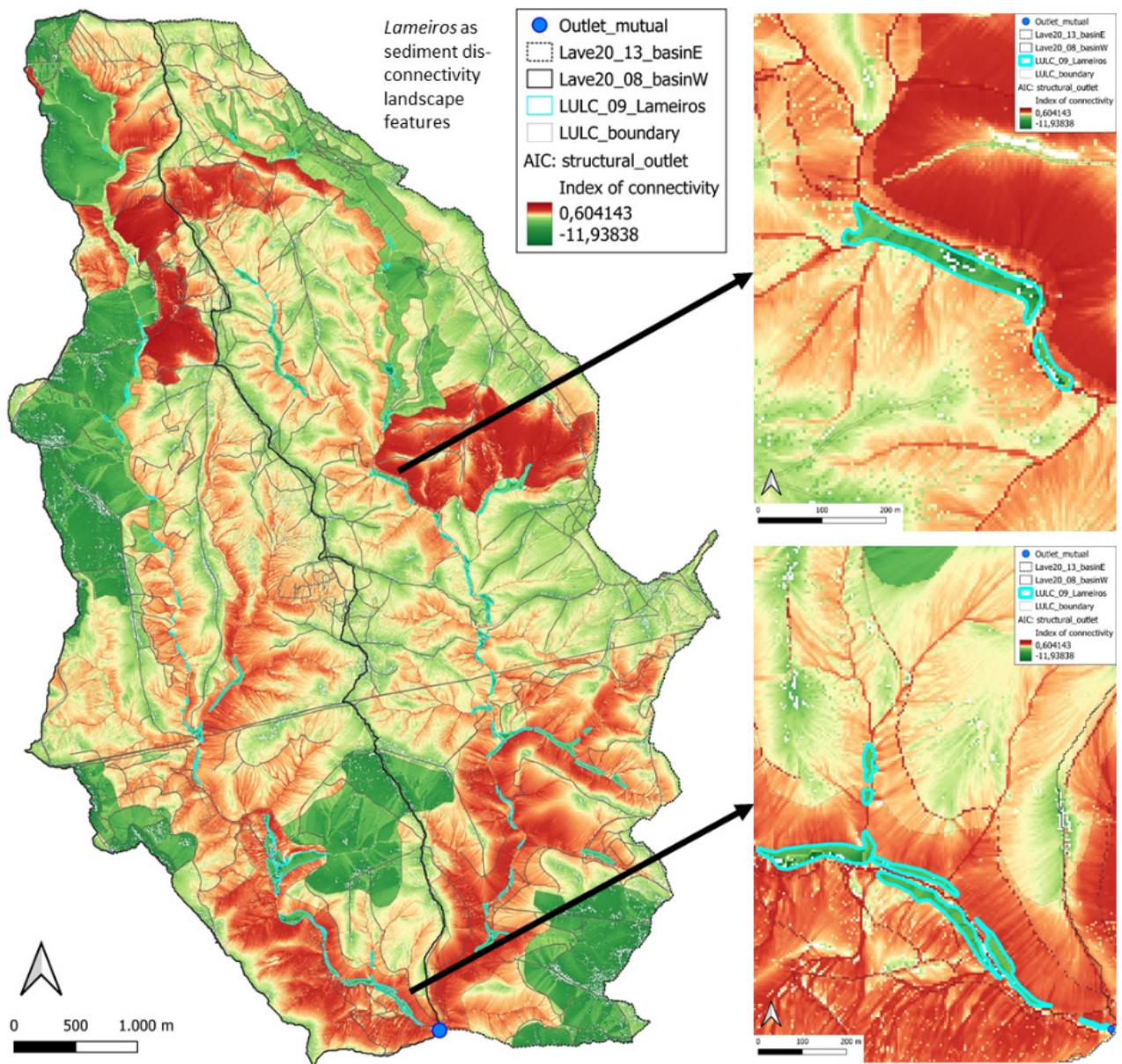
os usos de solo “Floresta de resinosas” (-6,472) e “Floresta mista” (-6,067). Esses valores indicam menor conectividade hidrológica e potencial de transporte de sedimentos nessas áreas específicas das bacias. Esse tipo de uso e ocupação representa áreas com cobertura vegetal densa, como florestas de coníferas e mistas, com alta capacidade de retenção do solo e infiltração de água, reduzindo a erosão e o transporte de sedimentos.

Especificamente, o AIC dos lameiros, apresenta valores consistentemente baixos: -5,417 na B.08 e -5,280 na B.13. Isso indica menor conectividade hidrológica e potencial reduzido de transporte de sedimentos. Esses resultados são relevantes, uma vez que esses elementos paisagísticos estão em contato com a rede de drenagem principal desde as cabeceiras dos rios até as proximidades da foz. Os lameiros desempenham um papel crucial na regulação hidrológica, conservação do solo, nutrientes e sequestro de carbono. Sua cobertura vegetal, predominantemente composta por gramíneas, contribui para a conservação do solo, prevenindo a erosão e a perda de nutrientes.

Uma distinta discrepância nos valores de AIC é observada para o uso e ocupação do solo “Vegetação herbácea natural” entre as bacias B.08 e B.13: -2,908 e -0,652, respectivamente. Essa diferença pode ser atribuída a fatores específicos de produção, incluindo o Kp (fator de rugosidade) e o FL. Na bacia B.08, onde o Kp (0,824) é menor e o FL é mais curto (3669 m), a menor rugosidade do terreno e o percurso mais curto da água podem aumentar a

**Quadro 2 - Resultados do Índice Agregado de Conectividade sedimentar (AIC) para cada uso e ocupação do solo por bacia**

CORINE	Uso e ocupação do solo	B.08	B.13
Código	Tipo	AIC (média)	
122	Redes viárias e ferroviárias e espaços associados (não pavimentadas)	-3,0685	-2,8812
122	Redes viárias e ferroviárias e espaços associados (pavimentadas)	----	-3,4342
243	Agricultura com espaços naturais e semi-naturais	-2,2737	-3,0055
311	Floresta de folhosas	----	-4,7433
312	Floresta de resinosas	-6,0616	-6,4719
313	Floresta mistas	-6,0607	-6,0670
321	Vegetação herbácea natural	-2,9081	-0,6517
322	Matos	-2,651	-3,0038
324	Florestas abertas, cortes e novas plantações	-3,1037	-3,0660
324	Estrada de corta-fogo	-3,452	-3,7786
333	Vegetação esparsa	-1,3145	-1,8486
411	Lameiros	-5,4166	-5,2802



**Figura 2** - Mapa do Índice Agregado de Conectividade sedimentar (AIC).

conectividade hidrológica e o transporte de sedimentos, resultando em um valor de AIC mais baixo. Por outro lado, na bacia B.13, onde o  $K_p$  (0,4849) é maior e o FL (6527 m) é mais longo, a maior rugosidade do terreno e o percurso mais extenso da água podem reduzir a conectividade hidrológica e o transporte de sedimentos, levando a um valor de AIC mais alto.

Dessa forma, apesar de declividade e altitude semelhantes a usos de solo com valores mais elevados de AIC, a presença eficiente de vegetação em reter

água e proteger o solo prevalece sobre esses fatores topográficos, resultando em valores de AIC mais baixos e menor conectividade hidrológica.

Esses resultados refletem e estão em consonância com um estudo realizado em uma área montanhosa do Mediterrâneo, que revelou uma relação entre uso e ocupação do solo e produção de sedimentos coletados de uma estação experimental (Nadal-Romero, 2013). Da mesma forma, foi observado que as alterações no uso e cobertura do solo da bacia impactaram as características hidrológicas, conforme

demonstrado em uma investigação em uma região montanhosa (Mangi *et al.*, 2022). Adicionalmente, as taxas de produção de sedimentos confirmam e refletem diferentes fontes de erosão ao longo do tempo, associadas ao uso e ocupação do solo (Kasai *et al.*, 2005).

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos fornecem percepções importantes sobre a conectividade hidrológica e o transporte de sedimentos nas bacias B.08 e B.13. Os usos do solo com valores mais altos de AIC nessas bacias são caracterizados por terrenos rochosos, pouca vegetação natural, altitudes elevadas e declives acentuados, resultando em maior suscetibilidade à erosão e transporte de sedimentos. Em contraste, os usos do solo com valores mais baixos de AIC possuem cobertura vegetal densa, o que promove a retenção de água e a proteção do solo, apesar de características topográficas semelhantes.

Destaca-se especialmente a importância dos lameiros, que apresentam valores mais baixos de AIC, indicando menor conectividade hidrológica e menor potencial de transporte de sedimentos. Essas áreas desempenham um papel essencial na regulação hidrológica, conservação do solo e sequestro de carbono, graças à sua vegetação composta principalmente por gramíneas. Portanto, é crucial preservar e gerir adequadamente essas áreas para garantir a qualidade da água e proteger os solos contra erosão e perda de nutrientes.

Uma investigação futura explorará a importância da conectividade funcional e estrutural, considerando o escoamento e a rede de drenagem como foco da simulação. Essas abordagens aprofundarão o entendimento da conectividade hidrológica nas bacias estudadas, estabelecendo uma relação mais sólida entre os resultados apresentados e um artigo que está em desenvolvimento, contribuindo para a gestão e preservação dessas áreas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agroconsultores (1991) - *Carta dos solos, carta do uso actual da terra e carta da aptidão da terra do nordeste de Portugal*. Projecto de desenvolvimento rural integrado de Trás-os-Montes, University of Trás-os-Montes and Alto Douro.
- Aguiar, C.; Monteiro-Henriques, T.; Pires, J. & Bastos, P. (2019) - Tipologia dos lameiros de Trás-os-Montes. *In: 40ª Reunião de Primavera da SPPF*, p. 49.
- Bakker, M.M.; Govers, G.; van Doorn, A.; Quetier, F.; Chouvardas, D. & Rounsevell, M. (2008) - The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: The importance of landscape pattern. *Geomorphology*, vol. 98, n. 3-4, p. 213-226. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.12.027>
- Borselli, L.; Cassi, P. & Torri, D. (2008) - Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena*, vol. 75, n. 3, p. 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Cavalli, M.; Trevisani, S.; Comiti, F. & Marchi, L. (2013) - Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, vol. 188, p. 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>
- Chiang, L.C.; Wang, Y.C. & Liao, C.J. (2019) - Spatiotemporal variation of sediment export from multiple Taiwan watersheds. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, n. 9, art. 1610. <https://doi.org/10.3390/ijerph16091610>
- EEA – European Environment Agency (2020) - *Corine Land Cover (CLC) 2018*, version 2020\_20u1. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=metadata>
- FAO (2008) - *Base Referencial Mundial Del Recurso Suelo: Un Marco Conceptual Para Clasificación, Correlación y Comunicación Internacional*. Roma, Italy. FAO. <http://www.fao.org/3/a0510s/a0510s.pdf>
- Kasai, M.; Brierley, G.J.; Page, M.J.; Marutani, T. & Trustrum, N.A. (2005) - Impacts of land use change on patterns of sediment flux in Weraamaia catchment, New Zealand. *Catena*, vol. 64, n. 1, p. 27-60. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.014>
- López-Vicente, M. & Ben-Salem, N. (2019) - 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*, vol. 651, p. 179-191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.170>
- López-Vicente, M.; González-Romero, J. & Lucas-Borja, M.E. (2020) - Forest fire effects on sediment connectivity in headwater sub-catchments: Evaluation of indices performance. *Science of the Total Environment*, vol. 732, art. 139206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139206>
- Mangi, H.O.; Onywere, S.M.; Kitur, E.C.; Lalika, M.C. & Chilagane, N.A. (2022) - Hydrological response to land use and land cover change on the slopes of Kilimanjaro and Meru Mountains. *Ecohydrology & Hydrobiology*, vol. 22, n. 4, p. 609-626. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2022.08.002>
- Marques, S.M.; Campos, F.S.; David, J. & Cabral, P. (2021) - Modelling sediment retention services and soil erosion changes in Portugal: A spatio-temporal approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol.10, n. 4, art. 262. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040262>
- Nadal-Romero, E.; Lasanta, T. & García-Ruiz, J.M. (2013) - Runoff and sediment yield from land under various uses in a Mediterranean mountain area: long-term results from an experimental station. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 38, n. 4, p. 346–355. <https://doi.org/10.1002/esp.3281>
- Panagos, P.; Borrelli, P.; Meusburger, K.; Alewell, C.; Lugato, E. & Montanarella, L. (2015) - Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*, vol. 48, p. 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>
- Pires, J.; Aguiar, C.; Soutinho, A.; Fernandes, A.; Bernardo, A.; Fernández-Núñez, E. & Moreira, N. (2015) - Diversidade florística e produtividade de pastagens de montanha (lameiros). *In: XXXVI Reunião de Primavera da SPPF: livro de resumos*. Bragança, Instituto Politécnico. ISBN 978-972-745-184-5
- PNOA (2020) - *Plan Nacional de Ortofotografía Aérea*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Instituto Geográfico Nacional. <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/busquedaSerie.do?codSerie=POA10>
- Wu, Z.; Baartman, J.E.M.; Pedro Nunes, J. & López-Vicente, M. (2023) - Intra-annual sediment dynamic assessment in the Wei River Basin, China, using the AIC functional-structural connectivity index. *Ecological Indicators*, vol. 146, art. 109775. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109775>