Fatores geoambientais responsáveis pela formação e evolução de ravinas em ambiente Mediterrâneo – estudo de caso no Centro de Portugal^a

Geo-environmental factors controlling gully distribution in a Mediterranean environment – a case-study in central Portugal

Bruno Martins (D^{*1}, Catarina Pinheiro (D^{**2}, Adélia Nunes (D^{***3}, António Bento-Gonçalves (D^{****4} e Carlos Hermenegildo (D^{****5}

¹Department of Geography and Tourism, University of Coimbra, RISCOS, CEGOT (Centre of Studies on Geography and Spatial Planning), University of Coimbra, Portugal ²Department of Geography, University of Minho, Communication and Society Research Centre, Department of Geography, University of Minho, CEGOT (Centre of Studies on Geography and Spatial Planning), University of Porto, Portugal ³Department of Geography and Tourism, University of Coimbra, RISCOS, CEGOT (Centre of Studies on Geography and Spatial Planning), University of Coimbra, Portugal ⁴Department of Geography, University of Minho, Communication and Society Research Centre, Department of Geography, University of Minho

⁵Lusofona University of Porto

^aO presente trabalho foi adaptado do artigo intitulado "Geo-environmental factors controlling gully distribution at the local scale in a Mediterranean environment" (2024), publicado na revista *Catena*, n.º 236, 107712 (https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107712) pelos mesmos autores.

Resumo

As ravinas são formas de erosão que contribuem para a perda e degradação do solo, especialmente em ambientes onde a sua conservação é difícil, como é o caso dos ambientes mediterrâneos. Por conseguinte, não é surpreendente que tenham sido feitos grandes esforços para compreender e quantificar os processos de erosão hídrica associada aos ravinamentos. O presente estudo tem como objetivo identificar os principais fatores que controlam a formação de ravinas no Centro de Portugal. Foram identificadas 38 ravinas, numa área de aproximadamente 11 km², instaladas sobre mantos de alteração muito profundos. O comprimento médio, a largura máxima e a largura média das ravinas é de 105 m, 6,8 m e 3,8 m, respetivamente. A Análise de Grupos (AG) identificou dois grupos (Gr) de ravinas, diferenciados a partir de características morfológicas e geoambientais. O grupo Gr1 integra as ravinas maiores, localizadas em vertentes de maior declive. As ravinas Gr2 localizam-se a altitudes superiores e em vertentes de menor declive. A análise de componentes principais (ACP) identificou como principais fatores de controlo, o declive, o índice de rugosidade (IR) e a severidade do incêndio, ocorrido em 2017, após um ano. Dada a dimensão das ravinas e a probabilidade de incêndios florestais recorrentes afetarem a área de estudo, devem ser implementadas com urgência algumas práticas de controlo da erosão por ravinamento.

Palavras-chave: Formação de ravinas. Fatores geoambietais. Ambiente mediterrâneo. Incêndios florestais. Centro de Portugal.

Abstract

It is known that gullies are forms of erosion that contribute to soil loss and degradation, especially in environments where soil conservation is difficult, as is the case in Mediterranean environments. It is therefore not surprising that great efforts have been made to understand and quantify the processes of water erosion associated with gullies. The study was carried out with the aim of identifying the main factors controlling gully formation in the Centre of Portugal. Thirty-eight gullies were identified, covering an area of 11 square kilometres, located on very deep blankets of alteration. The average length, maximum width and average

Cadernos de Geografia

- doi: https://dx.doi.org /10.14195/0871-1623_50_4 *
- *Email: bruno.martins@uc.pt **Email: catarina-pinheiro@mail.com

^{***}Email: adeliajnnunes@gmail.com

^{*****}Email: bento@geografia.uminho.pt

^{******}Email: p5270@ulusofona.pt

width of the gullies are close to 105 m, 6.8 m and 3.8 m, respectively. The Group Analysis (GA) identified two groups of gullies, differentiated on the basis of morphological and geoenvironmental aspects. The Gr1 group includes larger gullies located on steeper slopes. The GR2 gullies are located at higher altitudes and on less steep slopes. Principal component analysis (PCA) identified slope, roughness index and fire severity after one year as the main controlling factors. Given the size of the gullies and the likelihood of recurrent forest fires affecting the study area, some vital gully erosion control practices should be implemented as a matter of urgency.

Keywords: Gully formation. Geo-environmental factors. Mediterranean environment. Wildfire. Central Portugal.

1. Introdução

As ravinas são formas de erosão resultantes de processos hidrogeomorfológicos que contribuem para a degradação de solo (Montanarella & Panagos, 2021; Pennock, 2019), especialmente em ambientes mediterrâneos onde é reconhecida a arduidade na sua conservação. Por conseguinte, são inúmeros os estudos que têm sido desenvolvidos, nestes últimos anos, com o intuito de melhor compreender e quantificar as perdas de solo associadas a ravinamentos (Borrelli et al., 2017; De Vente et al., 2013; García-Ruiz et al., 2017; Maetens et al., 2012; Poesen et al., 2003; Sidle et al., 2019; Valentin et al., 2005; Vanmaercke et al., 2021).

As ravinas, per se, nem sempre se instalam em áreas de interesse económico. No entanto, mesmo que as perdas de solo e de produtividade de um campo agrícola devido a ravinamentos sejam consideradas, no seu conjunto, de menor importância, os efeitos secundários gerados podem traduzir-se em grandes prejuízos (por exemplo, Poesen et al., 2003; Valentin et al., 2005). O impacte é, muitas vezes, responsável pelo comprometimento, a longo prazo, da sustentabilidade na produção alimentar e numa multiplicidade de serviços ecossistémicos (por exemplo, Montgomery, 2007). Além disso, o impacte das ravinas está também associado a danos em caminhos e estradas, edifícios e outras infraestruturas. Os ravinamentos podem, ainda, associar-se a outros processos geomorfológicos como movimentos em massa (por exemplo Guerra et al., 2007; Imwangana et al., 2015). Devido a alterações ao nível do escoamento superficial e subsuperficial, podem contribuir, especialmente em ambientes áridos e semiáridos, para uma diminuição significativa da produtividade agrícola (por exemplo, Frankl et al., 2016; Poesen, 2017) e para uma redução das taxas de produção de biomassa, (por exemplo, Avni, 2005), acelerando, em casos mais graves, os processos de desertificação.

Vários estudos sugerem que as ravinas contribuem para um aumento de 20 a 80% na produção média de sedimentos (Poesen et al., 1996, 2003; Vanmaercke et al., 2012), agravando, de forma categórica, a qualidade e a disponibilidade de água (Haregeweyn et al., 2015), em resultado da maior conetividade entre as áreas de montanha, os fundos de vale e os rios ou lagos (Poesen et al., 2003). Por outro lado, as ravinas arrogam-se como um importante fator de mudança no uso e na ocupação do solo (Bakker et al., 2005; Valentin et al., 2005; Zgłobicki et al., 2015b, 2015a).

Considerando as projeções ambientais globais, as quais sugerem que o clima e os sistemas hidrológicos virão a sofrer grandes alterações nas próximas décadas (Frankl et al., 2020; Kundzewicz et al., 2014; Li & Fang, 2016), existe uma necessidade urgente de implementar programas e estratégias dedicadas à adoção de medidas mais eficazes de prevenção e controlo de ravinas (Ayele, 2016; Deng et al., 2015; Douglas & Pietroniro, 2003; Guyassa et al., 2018; Haregeweyn et al., 2015; Hartman et al., 2016), alicerçadas numa compreensão mais robusta da sua dinâmica e nos fatores de controlo (Vanmaercke et al., 2021).

Embora o número de trabalhos focados na compreensão dos processos e dos fatores associados à formação e evolução de ravinas tenha vindo a aumentar, nas últimas décadas, os seus resultados permanecem dispersos (Castillo & Gómez, 2016; Poesen et al., 2003; Torri & Poesen, 2014; Vanmaercke et al., 2016), especialmente, quando considerados os fatores locais.

Em Portugal, os trabalhos relacionados com ravinamentos têm merecido maior interesse académico nos últimos anos (Bergonse & Eusébio Reis, 2016; Martins et al., 2019, 2022; Martins et al., 2024). No entanto, são necessários mais estudos, especialmente focados no modo como os fatores locais

controlam a formação e a evolução de ravinas. De facto, a formação e a evolução de ravinas resulta de processos hidrogeomorfológicos complexos, quer pela multiplicidade de fatores, como o declive, as propriedades do solo, o coberto vegetal, a escorrência, a litologia e a ação antrópica (Deng et al., 2015; Ding et al., 2017; Poesen et al., 2003; Valentin et al., 2005; Xu et al., 2016), quer pela forma como estes fatores se relacionam entre si (Borrelli et al., 2022; Martins et al., 2022; Martins et al., 2024; Sonneveld et al., 2005; Zhou et al., 2021).

O objetivo primordial deste estudo é identificar os principais fatores que controlam a distribuição de ravinas à escala local. Para tal, foram identificadas 38 ravinas e foi tido em conta um número significativo de fatores geoambientais. Nesse sentido, as ravinas foram perspetivadas com recurso à análise de grupo e foi utilizada a Análise de Componentes Principais (ACP) para identificar os fatores que determinam a sua distribuição espacial.

Com os resultados obtidos, pretende alcançar-se um conhecimento mais aprofundado dos fatores que determinam a formação e a distribuição das ravinas, o qual poderá contribuir para a adoção de medidas mais adequadas no seu controlo, de acordo com as condições locais.

2. A área de estudo

As ravinas localizam-se na margem direita do rio Alva, no município de Oliveira do Hospital (Figura 1), numa área de fortes declives afetada por vários incêndios florestais. A área de estudo insere-se no Maciço Antigo, na denominada zona Centro-Ibérica (Dias et al., 2011). Do ponto de vista litológico, integra-se na província uranífera das Beiras, sendo essencialmente constituída por rochas granitóides, com predomínio do granito porfiróide de grão grosseiro, de natureza calco-alcalina e, por vezes, com orientação dos megacristais (JEN - Junta de Energia Nuclear, 1968).

O clima da área apresenta características mediterrâneas (Cs). A análise dos gráficos termopluviométricos das estações meteorológicas incluídas na rede oficial do IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera) indica apenas dois meses secos (julho e agosto). A precipitação anual varia entre os 1100 mm, nas vertentes de cota mais baixa, e os 1300 mm, nas de cotas superior. A precipitação ocorre, por vezes, de forma intensa e concentrada.

3. Metodologia

3.1. Recolha de dados

A identificação e delimitação das ravinas foi feita a partir de ortofotos de 2018, fornecidos pela Direção-Geral do Território, com uma resolução espacial de 25 cm, através do software ArcGIS 10.8. Foram consideradas 11 variáveis, agrupadas em 3 tipos: (i) morfologia das ravinas, que inclui a área do canal, largura máxima (Lmax), largura média (Lmed) e comprimento (Cp); (ii) variáveis geoambientais, que integram a altitude (A), a exposição (Ex), o declive (D), o índice de rugosidade (IR), a curvatura da vertente (C) e a acumulação de fluxo (AF), e (iii) variáveis cindínicas, associadas à severidade após o incêndio de 2017 (SaI), severidade um ano após o incêndio (SaI1a) e mudanças na vegetação, observadas após o incêndio (MVaI) e um ano mais tarde (MV1a). Foi, ainda, ponderada a distância relativa a estradas ou caminhos a montante das ravinas (De).

Os parâmetros topográficos foram extraídos a partir das curvas de nível, com uma equidistância de 10 m, utilizadas para criar um modelo digital de elevação (DEM) da área de estudo. A partir daí, foram determinados os seguintes parâmetros topográficos: A, D, Ex, IR, C e AF.

Para a avaliação das mudanças na ocupação do solo, recorreu-se a imagens Landsat 8 OLI/TIRS (disponíveis em https://earthexplorer.usgs.gov/). A Collection 2 Level-2 contém reflectância de superfície corrigida atmosfericamente, criada com o Land Surface Reflectance Code (LaSRC), com uma resolução espacial de 30 m. Com efeito, comparam-se as imagens para o período pré-e pós-incêndio, com datas de 28 de setembro de 2017 e 30 de outubro de 2017, respetivamente. Para melhor caracterizar a evolução da ocupação do solo foi incluída uma terceira imagem, com data de 15 de setembro de 2018, cerca de um ano após a ocorrência do incêndio. Neste estudo, a severidade do incêndio é definida como a magnitude da mudança ecológica causada pelo fogo (Key & Benson, 2006). No





Figura 1. Localização e distribuição das ravinas na área de estudo, no Centro de Portugal.

entanto, tal severidade está também relacionada com o tempo necessário para a recuperação das condições anteriores ao incêndio.

De acordo com Chen et al. (2011), quanto mais longo for o período de recuperação da vegetação, maior será a severidade. Para a determinar (Chen et al., 2011; Key & Benson, 2006), utilizou-se o Rácio de Severidade Normalizado (NBR), desenvolvido por García & Caselles (1991).

O NBR foi obtido através da seguinte fórmula:

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$
⁽¹⁾

em que NIR e SWIR são as bandas do infravermelho próximo e do infravermelho de ondas curtas do espetro eletromagnético, respetivamente.

A severidade após o incêndio (Sal) e um ano depois (Sai1a) foi avaliada através da aplicação das seguintes equações (Key & Benson, 2006):

$$BSaf = NBR_{pre-fire} - NBR_{post-fire}$$
⁽²⁾

$$BS1y = NBR_{post-fire} - NBR_{1yearpost-fire}$$
(3)

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), proposto por Rouse et al. (1974), foi derivado a partir:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$$
(4)

em que NIR e RED são as bandas do infravermelho próximo e do vermelho do espetro eletromagnético, respetivamente.

O NDVI diminui significativamente após um incêndio, pelo que se utilizou uma técnica de deteção de alterações bi-temporal para quantificar a VCaf (variação do coberto após o fogo) e a regeneração operada um ano mais tarde (VC1y), como se segue:

$$VCaf = NDVI_{post-fire} - NDVI_{pre-fire}$$
⁽⁵⁾

$$VC1y = NDVI_{1yearpost-fire} - NDVI_{post-fire}$$
⁽⁶⁾

3.2. Análise estatística

Todas as variáveis foram normalizadas, de acordo com um valor mínimo e máximo, criando-se uma escala comum que varia entre 0 e 1, através da seguinte fórmula:

$$Norm(var0 - 1) = var(valor) \min(var) / \max(var) \min(var)$$
⁽⁷⁾

Para verificar se existiam diferenças entre as ravinas, com base nos parâmetros geoambientais e morfológicos, foi utilizada a ferramenta *Grouping Analysis* (GA), disponível no ArcGIS. Trata-se de uma ferramenta automática, não supervisionada, usada para definir grupos homogéneos, tendo sido usado, neste estudo, o algoritmo K Means. A avaliação do número ótimo de grupos baseou-se na estatística pseudo F, tendo sido possível identificar 2 grupos: o Gr1 e o Gr2.

Para detetar os fatores primários que determinam a distribuição das ravinas foi aplicada a Análise de Componentes Principais (ACP). Efetivamente, a ACP é adequada para a redução de dados e identificação das componentes subjacentes (dimensões) de um conjunto de variáveis, maximizando a quantidade de variância contabilizada nesses itens e melhorando, assim, o seu desempenho em termos de consistência.

4. Resultados

4.1. Variabilidade local dos fatores geoambientais

Na área de estudo, as ravinas localizam-se entre os 277 metros e os 522 metros de altitude (Figura 2a). De um modo geral, tendem a localizar-se em vertentes de declives próximos dos 20° (Figura 2b), embora tenham sido identificadas ravinas em declives de 7° e declives ligeiramente superiores a 30° (Figura 2b), numa vertente predominantemente virada a sul (Figura 2c).

As ravinas distribuem-se preferencialmente em setores com os valores mais elevados de rugosidade (Figura 2d) e, de forma mais aleatória, se for considerado o tipo de curvatura da vertente (Figura 2e) e a acumulação de fluxo (Figura 2f).

A severidade do incêndio de 2017, predominantemente moderada-alta, terá contribuído para uma intensa destruição da cobertura vegetal. Um ano depois, a vegetação já se encontrava em recuperação, em particular na área ocupada pelas ravinas (Figuras 2h, 2i e 2j).

4.2. Características morfológicas das ravinas

As 38 ravinas identificadas a partir dos ortofotomapas de 2018 mostram diferenças morfológicas significativas considerando a largura máxima (Lmax), a largura média (Lmed), o comprimento (Cp) e a área do canal (AC), como se pode observar no Quadro 1. O comprimento médio da totalidade das ravinas é ligeiramente superior a 100 metros, mas foram identificadas 5 ravinas com comprimento superior a 200 metros, sendo que a maior ultrapassa os 378 metros. No que diz respeito à largura média, o valor registado é de cerca de 4 metros. A diferença do rácio, obtido através do comprimento e da largura média (RCpLmed) reflete-se na área do canal. O valor mínimo ronda os 40 m² e o máximo ultrapassa os 2800 m², sendo que a média se aproxima dos 384 m² (Quadro 1).

Quadro 1.	Principais	características	morfológicas	e topográficas	das ravina	s
-----------	------------	-----------------	--------------	----------------	------------	---

	Lmed (m)	Lmax (m)	Cp (m)	RCpLmed	Declive do canal (m m–1)	AC (m ²)	с	IR	Α	Ex	AF
Máximo	11.3	31.2	378.4	33.5	32.7	2862.5	-0.9	0.5	522.8	261.0	64.4
Média	3.8	6.8	104.9	27.6	19.3	384.4	0.2	0.3	406.7	141.3	1.7
Mínimo	1.1	2.0	16.8	15.3	7.0	41.7	0.8	0.1	277.5	55.8	6.1

Lmed: Largura média; Lmax: largura máxima; Cp: comprimento; RCpLmed: rácio comprimento/largura média; AC: área do canal; C: curvatura, IR: índice de rugosidade; A: altitude; Ex: exposição, e AF: acumulação de fluxo.

Obtiveram-se correlações estatisticamente assinaláveis a partir das variáveis morfológicas consideradas (Figura 3), nomeadamente entre a AC, Lmax, Lmed, e Cp. As ravinas mais largas (Lmed e Lmax) tendem a apresentar maiores valores de AC, enquanto as ravinas mais compridas tendem a ser mais estreitas, embora continuem a estabelecer relações estatisticamente significativas com a área do canal (AC)¹.

4.3. Fatores determinantes da distribuição das ravinas

A aplicação da ferramenta *Grouping Analysis* (GA) permitiu a identificação de dois grupos de ravinas (Figura 4). A sua localização pode ser observada no mapa da Figura 4 e as principais características de cada um dos grupos sistematizam-se no Quadro 2.

O GA identificou as variáveis índice de rugosidade, declive e mudanças na vegetação após o incêndio de 2017 ($R^2 > 0,5$) como as variáveis que mais contribuem para a diferenciação dos dois grupos de ravinas. Ainda que de forma menos significativa, também a Sal1a ($R^2 > 0,4$), a C ($R^2 > 0,3$) e o AF ($R^2 > 0,2$) são variáveis diferenciadoras entre os 2 grupos.

As ravinas do Gr1 apresentam os valores mais elevados de IR, D, MV e Sal1a. Trata-se de ravinas com os valores mais elevados de AC (área do canal), Lmed (largura média) e Lmax (largura máxima),

 $^{^1\,}$ AC é área do canal; Lmax é largura máxima, Cp é comprimento e Lmed é largura média.



Figura 2. Fatores geoambientais: (a) Altitude, (b) Declive, (c) Exposição, (d) Índice de rugosidade, (e) Curvatura, (f) Acumulação de fluxo, (g) Severidade do incêndio, (h) Severidade do incêndio após 1 ano, (i) Mudança da vegetação após o incêndio, (j) Mudança da vegetação 1 ano após o incêndio.



Figura 3. Correlação de Pearson Bayesiana entre parâmetros morfológicos.



Figura 4. Localização das ravinas dos grupos Gr1 e Gr2.

Quadro 2. Aspetos morfológicos e topográficos do grupo 1 e 2 de ravinas

	Lmed (m)	Lmax (m)	Cp (m)	RCpLmed	Declive do canal (m m–1)	AC (m ²)	с	IR	Α	Ex	AF
Gr1	5.3	9.8	123.0	142.3	24.8	642.3	-0.1	0.4	388.0	134.4	14.4
Gr2	3.3	5.8	91.4	102.8	16.6	294.1	0.4	0.2	413.6	168.2	1.7

Lmed: Largura média; Lmax: largura máxima; Cp: comprimento; RCpLmed: rácio comprimento/largura média; AC: área do canal; C: curvatura, IR: índice de rugosidade; A: altitude; Ex: exposição, e AF: acumulação de fluxo. distribuídas, maioritariamente, em vertentes com valores mais elevados de AF, e com maior concavidade. As ravinas do Gr2 localizam-se preferencialmente em vertentes convexas, predominantemente expostas a sul e a este, altitudes mais elevadas, e com distâncias médias mais baixas relativamente a estradas e caminhos (De).

A análise PCA produziu quatro componentes (dimensões), considerando todas as variáveis associadas às 38 ravinas identificadas (Quadro 3). Globalmente, as quatro dimensões explicam 72,8% da variância, que é determinada pelas três primeiras, com 59% da variabilidade total. A primeira componente, com um valor explicativo de 22%, identifica o índice de rugosidade, o declive e as mudanças na vegetação após o incêndio de 2017 como as variáveis principais, com valores de extração superiores ou próximos de 0,8. As variáveis 'declive', 'curvatura', 'área de acumulação' e 'severidade' um ano após o incêndio também foram consideradas nesta componente. A componente 2, com 19%, identifica duas variáveis principais – a 'área do canal' e o 'comprimento' –, com valores de extração de 0,91 e 0,77 respetivamente. Ambas demonstram uma relação inversa com altitude (0,65). As componentes 3 e 4 alcançam uma explicação próxima dos 21% identificando a severidade do incêndio de 2017 e as mudanças observadas na vegetação como as variáveis principais, com valores de extração superiores a 0,7 e, na última componente, as variáveis exposição e declive, com cerca de 0,4 (Quadro 3A).

Quadro 3. Análise de componentes principais A - todas as ravinas (4 componentes); B - Gr1 (5 componentes); C - Gr2 (5 componentes)

Variáveis	Comp	onente	s (todas	s as ravinas)	Componentes (Gr1)					Componentes (Gr2)				
Vallavels	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Comprimento	0,05	0,77	-0,15	-0,29	-0,34	-0,31	0,65	0,16	0,49	0,81	0,14	-0,05	0,4	-0,05
Largura média	0,28	0,69	0,10	0,41	-0,51	0,05	-0,26	0,7	-0,15	0,7	0,44	0,13	-0,01	0,05
Área do canal	0,17	0,91	-0,05	0,05	-0,55	-0,13	0,2	0,66	0,21	0,85	0,32	0,12	0,28	0,1
Altitude	0,00	-0,65	0,18	-0,22	0,72	0,04	0,15	-0,38	0,19	-0,51	0,14	0,3	0,01	-0,53
Declive	0,86	-0,01	0,02	0,42	0,51	0,7	0,04	0,44	0,12	-0,28	0,9	0,04	-0,03	0,25
Exposição	-0,51	-0,20	0,04	0,43	-0,65	0,22	-0,39	-0,14	-0,1	-0,35	0,12	-0,13	-0,44	0,03
Curvatura da vertente	-0,67	0,25	-0,28	-0,19	-0,52	0,08	0,68	-0,13	-0,12	0,52	-0,4	-0,24	0,11	0,42
Índice de rugosidade	0,87	-0,02	0,02	0,41	0,52	0,7	0,04	0,42	0,1	-0,27	0,91	0,03	-0,04	0,25
Acumulação do fluxo	0,54	0,10	0,30	-0,40	0,34	-0,51	0,0	0,02	0,65	0,21	0,44	0,38	0,42	-0,48
Distância a estradas	0,58	-0,42	-0,04	0,21	0,79	0,48	0,0	0,1	0,03	-0,5	0,32	-0,48	0,21	0,28
Severidade após o incêndio	0,50	-0,14	-0,74	-0,15	0,25	0,47	0,75	-0,12	-0,21	-0,51	-0,09	0,00	0,76	0,08
Severidade 1 ano após o incêndio	0,75	0,02	0,26	-0,33	0,53	-0,47	0,39	0,23	-0,45	-0,19	-0,14	0,9	0,02	0,28
Mudança na vegetação após o incêndio	-0,33	0,16	0,87	0,05	0,28	-0,71	-0,34	0,25	-0,15	0,39	0,12	0,4	-0,77	0,03
Mudanças na vegetação 1 ano após o incêndio	0,82	0,01	0,16	-0,39	0,62	-0,56	0,36	0,23	-0,3	-0,27	-0,27	0,76	0,24	0,37

Método de Extração: análise de Componente Principal.

Ao considerar-se os dois grupos de ravinas, a ACP produziu uma solução com 5 componentes para ambos os grupos, com uma variância explicada de 84,4% e 79,9%, respetivamente. Em ambos os grupos, as três primeiras componentes congregam mais de 50% da variabilidade total explicada.

Para as ravinas Gr1 (Quadro 3B), a altitude e a distância em relação a estradas foram identificadas como as principais variáveis com valores de extração superiores a 0,7. A área do canal, a severidade e a mudança na vegetação 1 ano após o incêndio foram também identificadas como variáveis explicativas, embora com valores de extração mais baixos. Para a segunda componente, os maiores valores de extração foram obtidos pelo declive, índice de rugosidade e mudanças observadas na vegetação após o incêndio. As componentes 3 e 4 identificam a severidade do incêndio, a curvatura das vertentes e o comprimento das ravinas como as variáveis principais (com valores de extração próximos de 0,7) (Quadro 3B). Relativamente ao Gr2 (Quadro 3C), a primeira componente identifica as variáveis morfológicas, com valores de extração mais elevados, ou seja, a área do canal e o comprimento. A segunda componente inclui as variáveis 'índice de rugosidade' e 'declive' como as principais, com valores de extração iguais ou superiores a 0,9. As restantes componente 3 identifica como variáveis principais a severidade 1 ano após o incêndio e a mudança de vegetação 1 ano após o incêndio, a quarta componente realça as mesmas variáveis, mas imediatamente após o incêndio e, finalmente, a quinta, destaca a altitude (Quadro 3C).

5. Discussão

A formação e evolução das ravinas são influenciadas pelo clima, pela topografia, pelo grau de cobertura vegetal e pela profundidade do manto de alteração. A presença de um manto de alteração é uma condição necessária para a formação inicial de uma ravina (Sun et al., 2022; Sun et al., 2013). Na área de estudo, a presença de material resultante da meteorização do granito acelerou os processos de erosão que conduziram ao desenvolvimento de grandes canais, com tamanho muito superior ao assinalado em outras vertentes próximas da área de estudo, cuja base geológica, talhada em metassedimentos, não o permite. A ação da tectónica na área de estudo terá contribuído para uma desintegração mais rápida dos maciços rochosos e, consequentemente, para a formação de mantos de alteração mais profundos e meteorizados (Liu et al., 2021; Molnar et al., 2007).

No que respeita às características do granito, não foram detetadas diferenças significativas do ponto de vista químico-mineralógico e textural, quer no que se refere à presença de falhas e fraturas que determinem uma maior ou menor desagregação do substrato rochoso, o que poderia influenciar a distribuição das ravinas. De igual modo, não parecem existir diferenças climáticas capazes de explicar ritmos e graus de intensidade de meteorização diferenciados capazes de explicar variações substantivas nas características do manto de alteração. Deste modo, outros fatores geoambientais influenciaram as características morfológicas e a distribuição espacial das ravinas.

Com efeito, as 38 ravinas identificadas na área de estudo apresentam características morfológicas distintas, tendo sido identificados 2 grupos: o Gr1 congrega as de maiores dimensões, com valores mais altos de área do canal, largura média e máxima e comprimentos; localizam-se em vertentes mais íngremes, geralmente côncavas e apresentam valores mais altos de AF (acumulação de fluxo), Sal (severidade após o incêndio) e IR (índice de rugosidade). As ravinas Gr2 são mais pequenas e localizam-se em vertentes com menor declive, altitudes mais altas, geralmente em vertentes convexas e com maior perda de vegetação, na sequência do incêndio de 2017. O índice de rugosidade, o declive, as mudanças na vegetação e severidade um ano após o incêndio são os principais fatores geoambientais que diferenciam os grupos de ravinas. Vários autores sugerem que os efeitos erosivos associados ao escoamento se relacionam com características topográficas (Chowdhuri et al., 2021; Jiang et al., 2021; Liu et al., 2021), refletidas no comprimento de vertente, declive, curvatura e acumulação do fluxo. De acordo com Liu et al. (2021), o declive é o principal fator que determina a tensão de cisalhamento do fluxo de água, sendo por isso um dos principais fatores de formação e evolução das ravinas. Alguns estudos consideram ainda que as vertentes côncavas apresentam uma probabilidade superior de formação de ravinas quando comparadas com as vertentes convexas (Chen et al., 2016; Li & Li, 2012; Rieke-Zapp et al., 2007; Young & Mutchler, 1969), sendo as vertentes retilíneas as que apresentam menor suscetibilidade à sua formação.

Além disso, a ação combinada da topografia e da resposta hidrológica interferem na dinâmica das vertentes ao influenciarem a resistência ao cisalhamento e a erodibilidade do solo (Amare et al., 2019). Os valores associados à acumulação do fluxo ilustram a tendência para a convergência ou dispersão do fluxo de água. Após a precipitação, uma parte da água infiltra-se e outra parte converge. Se o centro para o qual o fluxo converge estiver conectado, inicia-se um processo de sulcagem, acelerando de forma substancial a formação de ravinas nestes setores comparativamente a outras áreas (Conoscenti & Rotigliano, 2020; Liu et al., 2021; Thommeret et al., 2010, 2009).

Por outro lado, o padrão espacial das ravinas terá sido determinado pela erosão hídrica pósincêndio, com destaque para o incêndio ocorrido em outubro de 2017 que afetou toda a área de estudo, destruindo grande parte da vegetação existente. A recorrência de incêndios florestais na área em estudo terá favorecido a formação e a evolução de ravinas já existentes, sobretudo na sequência das primeiras chuvas de outono (Franco et al., 2023; Santos et al., 2020). Também a severidade moderada-alta registada pelo fogo que afetou toda a área terá contribuído para acelerar os processos de erosão hídrica. De facto, o impacte dos incêndios florestais na resposta hidrológica e erosiva dos solos tem sido amplamente estudado nas últimas décadas (Agbeshie et al., 2022; Alexakis et al., 2021; Andreu et al., 1996; Certini, 2005; Úbeda & Outeiro, 2009). São vários os trabalhos que sugerem que uma maior severidade dos incêndios aumenta a resposta hidrológica e erosiva pós-incêndio (Vieira & Bento-Gonçalves, 2021; Vieira et al., 2015), especialmente na sequência de períodos de

precipitação mais intensos (Moody et al., 2013; Shakesby & Doerr, 2006; Zema et al., 2020). Os incêndios florestais, além de removerem a vegetação, influenciam um conjunto de propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, devido, principalmente, ao aquecimento do solo e à destruição da cobertura vegetal (Agbeshie et al., 2022; Pereira et al., 2018). Além disso, contribuem para alterações importantes no pH, na condutividade elétrica, no teor de matéria orgânica do solo, nos nutrientes disponíveis e nos iões, especialmente nos incêndios florestais de baixa e média gravidade (Murphy et al., 2006; Pereira et al., 2018, 2014; Prieto-Fernández et al., 2004). Por sua vez, os incêndios de alta severidade são responsáveis por impactes mais duradouros, que podem prolongar-se por vários anos até à recuperação total do solo. Os resultados obtidos a partir da análise ACP mostraram que o declive, a severidade um ano após o fogo, o índice de rugosidade, a distância em relação às estradas e caminhos e a altitude desempenham um papel crucial na diferenciação das ravinas do Gr1, uma vez que os valores extraídos são positivos e variam entre 0,79 e 0,70. Para o grupo Gr2, as principais variáveis geoambientais que determinam a variância observada foram o índice de rugosidade e o declive (0,91 e 0,90, respetivamente), enquanto as variáveis curvatura, altitude e severidade do incêndio emergem como secundárias, uma vez que os valores rondam os 0,50, positivos para a primeira variável e negativos para as outras duas. Vários estudos confirmam que as estradas e os caminhos são fatores primordiais na iniciação e evolução das ravinas ao contribuírem para o aumento da concentração de escoamento superficial (Adediji et al., 2013; Arabameri et al., 2019; Le Roux et al., 2022; Martins et al., 2019; Martins et al., 2024; Nyssen et al., 2002; Poesen et al., 2003; Valentin et al., 2005). Nas ravinas do Gr1 fica claro que estas são maiores quando mais próximas de caminhos e estradas. Estes resultados mostram o efeito crucial da rede rodoviária no aumento da erosão por ravinamento. Isto deve-se à perturbação antrópica da dinâmica hidrológica, a qual aumenta a acumulação de escoamento superficial e acelera a erosão do solo em grande escala. No caso do Gr2, a rede viária parece não ter um papel de relevo. Estes resultados estão em consonância com os obtidos por Igwe et al. (2020) e Valipour et al. (2021).

Para ambos os grupos de ravinas, os parâmetros topográficos foram determinantes na sua instalação e evolução. Vários estudos têm enfatizado a topografia como fator primordial na formação de ravinas, sugerindo que diferenças de rugosidade podem contribuir para ampliar os efeitos locais da topografia durante os períodos de maior precipitação (Kumari et al., 2019). Por exemplo, Gómez-Gutiérrez et al. (2015) utilizaram apenas atributos topográficos como variáveis independentes para explicar a ocorrência de ravinas em duas bacias mediterrânicas, tendo obtido um excelente valor preditivo. Este estudo mostra a forte correlação entre a topografia e outras variáveis que condicionam os processos de erosão hídrica, como o gradiente de declive local, o tipo de curvatura e o comprimento da vertente. No entanto, o controlo topográfico das ravinas pode sofrer importantes variações ao longo do tempo, condicionado pelas mudanças no uso e ocupação do solo (Gómez-Gutiérrez et al., 2009; Parkner et al., 2006), pela recuperação do solo após incêndios florestais, ou por fatores hidrometeorológicos, como a intensidade da precipitação (Vergari et al., 2013).

Na área em estudo, o incêndio de 2017 terá criado áreas diferenciadas no que respeita à severidade e destruição do coberto vegetal. Vários autores (Bracken et al., 2013; Keeley, 2009; Wilcox et al., 2003) consideram que o aumento da severidade é responsável por impactes mais acentuados na vegetação, no solo e no comportamento hidrológico. Hyde et al. (2014) demonstraram que a probabilidade de uma evolução mais acelerada das ravinas se correlaciona positivamente com as áreas afetadas por incêndios florestais de maior severidade. Com base nos resultados do nosso estudo, o impacte da severidade, ainda evidente um ano após o incêndio de outubro de 2017 (Sal1a), terá acelerado os processos erosivos e, consequentemente, a evolução das ravinas, especialmente as do Gr1, uma vez que a correlação obtida foi positiva (0,75). Para as ravinas do Gr2 a correlação é negativa (-0,51) sugerindo que a menor severidade terá tido impactes menos relevantes na destruição do coberto vegetal, contribuindo para uma desaceleração dos processos erosivos. Vários autores (Larsen & MacDonald, 2007; Lewis et al., 2017; Robichaud et al., 2013) afirmam, no entanto, que a vegetação recupera mais rapidamente em áreas afetadas por incêndios de baixa severidade comparativamente com as áreas acometidas por incêndios de baixa severidade comparativamente com as áreas acometidas por incêndios de saveridade comparativamente com as áreas acometidas por incêndios de baixa severidade comparativamente com as áreas acometidas por incêndios de saveridade nais elevada. Nesta temática, são necessários mais trabalhos que se centrem na análise das relações entre a severidade e os contextos topográficos e biofísicos, de forma

a compreender melhor a dinâmica hidrológica e as respetivas consequências ao nível dos processos erosivos responsáveis pela formação e evolução de ravinas.

6. Conclusão

Este trabalho tinha como objetivo identificar os principais fatores que controlam a formação e a evolução de 38 ravinas, numa área de 11 km². As ravinas apresentam um comprimento médio, largura máxima e largura média de 105 m, 6,8 m e 3,8 m, respetivamente. A análise de grupos permitiu a sua diferenciação em 2 conjuntos, tendo em consideração as caraterísticas morfológicas e os fatores geoambientais. As ravinas do Gr1 são em média maiores (Pa, Lmax e Lmed), localizam-se em vertentes de maior pendor, côncavas, e com valores mais elevados de IR e AF. As ravinas do Gr2 são em média mais pequenas, localizam-se a altitudes superiores, em vertentes de menor declive e maioritariamente convexas.

As componentes topográficas, refletidas no D e no IR, são os fatores determinantes para a formação de ravinas de ambos os grupos. A menor distância das ravinas em relação a estradas e caminhos assume importância primordial na formação das ravinas do Gr1. Por outro lado, a severidade atingida pelo incêndio de 2017 assinala correlações, estatisticamente significativas, com as ravinas de maior dimensão. Níveis mais elevados de severidade parecem influenciar positivamente a dinâmica hidrológica, acelerando os processos de erosão hídrica, especialmente no Gr1, enquanto a menor severidade (associada a uma menor perda de vegetação) observada no Gr2 de ravinas pode ter contribuído, de forma mais eficaz, para a mitigação da ação erosiva da chuva.

Na área de estudo, a perda de vegetação decorrente de sucessivos incêndios parece ser o precursor essencial dos processos de erosão hídrica observados; o aumento da severidade e das mudanças da vegetação (perda e ganho) contribuiu para o aumento explicativo das características topográficas como fatores de controlo na formação de ravinas. Assim, a análise da severidade do incêndio e o consequente impacte sobre a vegetação após o incêndio são fatores muito importantes na análise relativa à formação e evolução das ravinas. Isto é particularmente relevante, dada a frequência histórica de incêndios florestais na área de estudo, mas também em várias áreas do centro e norte de Portugal, onde as condições topográficas, marcadas por declives elevados, favorecem os processos de erosão do solo.

Embora este estudo procure definir um quadro atual relativo aos fatores que determinam a distribuição e formação de ravinas na área de estudo, baseado em análises geoespaciais e estatísticas, seria particularmente relevante proceder ao seu levantamento em campo, para compreender melhor as características morfológicas das ravinas consideradas, os processos de erosão, a dinâmica e os fatores de controlo da formação das ravinas. No entanto, cinco anos após o incêndio de outubro de 2017, as ravinas apresentam uma visibilidade limitada para um transepto de levantamento de campo, uma vez que estão, na sua grande maioria, cobertas por uma densa vegetação, dominada, na sua maioria, por espécies invasoras.

Embora o impacte dos processos de erosão hídrica seja reconhecido como uma ameaça para os recursos do solo da União Europeia, o papel das ravinas como fator de perda de solo continua a ser relativamente pouco compreendido (Borrelli et al., 2022) e a sua associação com os incêndios florestais pouco reconhecida. Neste contexto, uma investigação mais aprofundada centrada na formação e evolução de ravinas em áreas frequentemente afetadas por incêndios florestais deverá proporcionar uma melhor compreensão, particularmente na sua relação com o impacte sobre a vegetação e no seu contributo para a formação e evolução das ravinas. Dada a dimensão das ravinas e a recorrência de incêndios florestais na área de estudo, é urgente implementar algumas práticas de controlo da erosão, por ravinamento, particularmente após os incêndios florestais.

Acknowledgements

This research was funded by:

 Centre of Studies in Geography and Spatial Planning (CEGOT), funded by national funds through the Foundation for Science and Technology (FCT) under the reference UIDB/04084/2020; Portuguese funds through Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., under the research project "EroFire – Avaliação do Risco de erosão pós-incêndio usando marcadores moleculares", reference PCIF/RPG/0079/2018.

Bibliografia

- Adediji, A., Jeje, L. K., & Ibitoye, M. (2013). Urban development and informal drainage patterns: Gully dynamics in Southwestern Nigeria. *Applied Geography*, 40, 90–102. https://doi.org/10.1016/j. apgeog.2013.01.012
- Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, 33(5), 1419–1441.
- Alexakis, D., Kokmotos, I., Gamvroula, D., & Varelidis, G. (2021). Wildfire effects on soil quality: application on a suburban area of West Attica (Greece). *Geosciences Journal*, 25, 243–253.
- Amare, S. D., Keesstra, S. D., van der Ploeg, M. J., Langendoen, E., Steenhuis, T., & Tilahun, S. (2019). Causes and controlling factors of valley bottom gullies. Land, 8, 141. https://doi.org/10.3390/ land8090141
- Andreu, V., Rubio, J. L., Forteza, J., & Cerni, R. (1996). Postfire effects on soil properties and nutrient losses. International Journal of Wildland Fire, 6(2), 53–58.
- Arabameri, A., Cerda, A., Rodrigo-Comino, J., Pradhan, B., Sohrabi, M., Blaschke, T., & Tien Bui, D. (2019). Proposing a Novel Predictive Technique for Gully Erosion Susceptibility Mapping in Arid and Semi-arid Regions (Iran). *Remote Sensing*, 11, 2577.
- Avni, Y. (2005). Gully incision as a key factor in desertification in an arid environment, the Negev highlands, Israel. Catena, 63(2-3), 185–220.
- Ayele, G. (2016). A biophysical and economic assessment of a community-based rehabilitated gully in the Ethiopian highlands. *Land Degradation Development*, *27*, 270–280.
- Bakker, M., Govers, G., Kosmas, C., Vanacker, V., Van Oost, K., & Rounsevell, M. (2005). Soil erosion as a driver of land-use change. *Agriculture, Ecosystems and Environment, 105*(3), 467–481.
- Bergonse, R., & Eusébio Reis, E. (2016). Controlling factors of the size and location of large gully systems: A regression-based exploration using reconstructed pre-erosion topography. *Catena*, 147, 621–631. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.014
- Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., & Panagos, P. (2017). A new assessment of soil loss due to wind erosion in European agricultural soils using a quantitative spatially distributed modelling approach. Land Degradation Development, 28(1), 335–344.
- Borrelli, P., Poesen, J., Vanmaercke, M., Ballabio, C., Hervás, J., Maerker, M., Scarpa, S., & Panagos, P. (2022). Monitoring gully erosion in the European Union: A novel approach based on the Land Use/Cover Area frame survey (LUCAS). *International Soil and Water Conservation Research*, 10(1), 17–28. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.09.002
- Bracken, L. J., Wainwright, J., Ali, G. A., Tetzlaff, D., Smith, M. W., Reaney, S. M., & Roy, A. G. (2013). Concepts of hydrological connectivity: research approaches, pathways and future agendas. *Earth Sciences Reviews*, 119, 17–34.
- Castillo, C., & Gómez, J. (2016). A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, 160, 300–319. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143(1), 1–10. https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8
- Chen, D., Zhang, S., Wang, R., Pu, L., Chang, L., & Yang, J. (2016). Study on gully erosion distribution in Northeast black soil areas based on Pleiades. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 48, 138–144.
- Chen, X., Vogelmann, J. E., Rollins, M., Ohlen, D., Key, C. H., Yang, L., & Shi, H. (2011). Detecting post--fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing spectral indices and field-collected composite burn index data in a ponderosa pine forest. *International Journal of Remote Sensing*, 32(23), 7905–7927.
- Chowdhuri, I., Pal, S. C., Saha, A., Chakrabortty, R., & Roy, P. (2021). Evaluation of different DEMs for gully erosion susceptibility mapping using in-situ field measurement and validation. *Ecological Informatics*, 65, 101425. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101425
- Conoscenti, C., & Rotigliano, E. (2020). Predicting gully occurrence at watershed scale: Comparing topographic indices and multivariate statistical models. *Geomorphology*, 359, 107123.

- De Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., Vanmaercke, M., Van Rompaey, A., & Boix-Fayos, C. (2013). Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand? *Earth Sciences Reviews*, 127, 16–29.
- Deng, Q., Qin, F., Zhang, B., Wang, H., Luo, M., Shu, C., Liu, H., & Liu, G. (2015). Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA: A case of Yuanmou Dry-Hot Valley. *Geomorphology*, 228, 703–713.
- Ding, L., Qin, F., Fang, H., et al. (2017). Morphology and controlling factors of the longitudinal profile of gullies in the Yuanmou dry-hot valley. *Journal of Mountain Science*, 14, 674–693. https://doi.org/ 10.1007/s11629-016-4189-7
- Douglas, I., & Pietroniro, A. (2003). Predicting road erosion rates in selectively logged tropical rain forests [Proceedings of an International Symposium Sapporo, Japan, 8-9 July 2003]. Em D. De Boer, W.
 Froehlich & T. Mizuyama (Ed.), *Erosion Prediction in Ungauged Basins, Integrating Methods and Techniques* (pp. 199–205). IAHS Press.
- Franco, M., Vieira, A., Bento-Gonçalves, A., Úbeda, X., Zema, D., & Lucas-Borja, M. (2023). Effects of wildfire, torrential rainfall and straw mulching on the physicochemical soil properties in a Mediterranean forest. *Ecological Engineering*, 192. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106987
- Frankl, A., Deckers, J., Moulaert, L., Van Damme, A., Haile, M., Poesen, J., & Nyssen, J. (2016). Integrated solutions for combating gully erosion in areas prone to soil piping: innovations from the drylands of Northern Ethiopia. Land Degradation & Development, 27(8), 1797–1804.
- Frankl, A., Nyssen, J., Vanmaercke, M., & Poesen, J. (2020). Gully prevention and control: techniques, failures and effectiveness. *Earth Surface Processes and Landforms*. https://doi.org/10.1002/esp.5033
- García, M. L., & Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International, 6*(1), 31–37.
- García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E., & Cerda, A. (2017). Ongoing and emerging questions in water erosion studies. *Land Degradation & Development*, 28(1), 5–21.
- Gómez-Gutiérrez, Á., Conoscenti, C., Angileri, S. E., et al. (2015). Using topographical attributes to evaluate gully erosion proneness (susceptibility) in two mediterranean basins: advantages and limitations. *Natural Hazards*, 79, 291–314. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1703-0
- Gómez-Gutiérrez, Á., Schnabel, S., & Contador, F. L. (2009). Gully erosion, land use and topographical thresholds during the last 60 years in a small rangeland catchment in SW Spain. Land Degradation & Development, 20, 535–550.
- Guerra, A. J., Bezerra, J. F., Fullen, M. A., Mendonça, J. K. S., Sathler, R., Lima, F. S., & Guerra, T. T. (2007). Urban gullies in Sao Luis city, Maranhao state, Brazil. Em J. Casalí & R. Giménez (Ed.), Progress in Gully Erosion Research. IV International Symposium on Gully Erosion. Universidad Pública de Navarra/Nafarroako Unibertsitate Publikoa.
- Guyassa, E., Frankl, A., Zenebe, A., Poesen, J., & Nyssen, J. (2018). Gully and soil and water conservation structure densities in semi-arid northern Ethiopia over the last 80 years. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(9), 1848–1859. https://doi.org/10.1002/esp.4360
- Haregeweyn, N., Tsunekawa, A., Nyssen, J., Poesen, J., Tsubo, M., Meshesha, D., Adgo, E., Schütt, B., & Tegegne, F. (2015). Soil erosion and conservation in Ethiopia: a review. *Progress in Physical Geography*, 39(6), 750–774.
- Hartman, B. D., Bookhagen, B., & Chadwick, O. A. (2016). The effects of check dams and other erosion control structures on the restoration of Andean bofedal ecosystems. *Restoration Ecology*, 24(6), 761–772. https://doi.org/10.1111/rec.12402
- Hyde, K. D., Wilcox, A. C., Jencso, K., & Woods, S. (2014). Effects of vegetation disturbance by fire on channel initiation thresholds. *Geomorphology*, 214, 84–96. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.013
- Igwe, O., John, U. I., Solomon, O., et al. (2020). GIS-based gully erosion susceptibility modeling, adapting bivariate statistical method and AHP approach in Gombe town and environs Northeast Nigeria. *Geoenvironmental Disasters*, 7, 32. https://doi.org/10.1186/s40677-020-00166-8
- Imwangana, F., Vandecasteele, I., Trefois, P., Ozer, P., & Moeyersons, J. (2015). The origin and control of mega-gullies in Kinshasa (DR Congo). *Catena*, 125, 38–49. https://doi.org/10.1016/j.catena.2014. 09.019
- JEN Junta de Energia Nuclear. (1968). A província uranífera do centro de Portugal. Suas características estruturais, tectónicas e metalogénicas [132p + mapa 1/250.000]. Junta de Energia Nuclear.
- Jiang, C. C., Fan, W., Yu, N. Y., & Liu, E. L. (2021). Spatial modeling of gully head erosion on the Loess Plateau using a certainty factor and random forest model. *Science of the Total Environment*, 783, 147040. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147040

- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, *18*, 116–126.
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape assessment (LA) sampling and analysis methods. Em D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti et al. (Ed.), *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System* (pp. 1–55). US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Kumari, R., Banerjee, A., Kumar, R., Kumar, A., Saikia, P., & Khan, M. L. (2019). Deforestation in India: consequences and sustainable solutions. Em *Forest Degradation Around the World* (pp. 1–18).
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., et al. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1–28. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411
- Larsen, I., & MacDonald, L. (2007). Predicting postfire sediment yields at the hillslope scale: testing RUSLE and Distributed WEPP. *Water Resources Research*, 43(1). https://doi.org/10.1029/2006WR005560
- Le Roux, J., Morake, L., van der Waal, B., Anderson, R. L., & Hedding, D. W. (2022). Intra-gully mapping of the largest documented gully network in South Africa using UAV photogrammetry: Implications for restoration strategies. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 46(5), 772–789. https://doi.org/10.1177/03091333221101057
- Lewis, S. A., Hudak, A. T., Robichaud, P. R., Morgan, P., Satterberg, K. L., Strand, E. K., Smith, A. M. S., et al. (2017). Indicators of burn severity at extended temporal scales: a decade of ecosystem response in mixed-conifer forests of western Montana. *International Journal of Wildland Fire*, 26, 755–771. https://doi.org/10.1071/WF17019
- Li, Z., & Fang, H. (2016). Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, *163*, 94–117. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.004
- Li, Z., & Li. (2012). The spatial distribution relations between erosion gully and terrain factors in the south of typical black soil zone in Northeast China. *Soil and Crop*, *1*, 148–154.
- Liu, G., Zheng, F. L., Wilson, G. V., Xu, X. M., & Liu, C. (2021). Three decades of ephemeral gully erosion studies. *Soil and Tillage Research*, *212*, 105046.
- Maetens, W., Poesen, J., & Vanmaercke, M. (2012). How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? *Earth Sciences Review*, 115(1–2), 21–36.
- Martins, B., Castro, A. C. M., Ferreira, C., Lourenço, L., & Nunes, A. (2019). Gullies mitigation and control measures: a case study of the Seirós gullies (North of Portugal). *Physics and Chemistry of the Earth*, 109, 26–30. https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.09.006
- Martins, B., Nunes, A., Meira-Castro, A., Lourenço, L., & Hermenegildo, C. (2022). Local Factors Controlling Gully Development in a Mediterranean Environment. Land, 11(2), 204.
- Martins, B., Pinheiro, C., Nunes, A., Bento-Gonçalves, A., & Laranjeira, M. (2024). Site-scale drivers of post-fire vegetation regrowth in gullies: A case study in Mediterranean Europe. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(13), 4371–4387. https://doi.org/10.1002/esp.5974
- Molnar, P., Anderson, R. S., & Anderson, S. P. (2007). Tectonics, fracturing of rock, and erosion. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 112(F3).
- Montanarella, L., & Panagos, P. (2021). The relevance of sustainable soil management within the European Green Deal. *Land Use Policy*, *100*, 104950.
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy* of Sciences, 104(33), 13268–13272.
- Moody, J. A., Shakesby, R. A., Robichaud, P. R., Cannon, S. H., & Martin, D. A. (2013). Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. *Earth-Science Reviews*, *122*, 10–37.
- Murphy, J. D., Johnson, D. W., Miller, W. W., Walker, R. F., Carroll, E. F., & Blank, R. R. (2006). Wildfire effects on soil nutrients and leaching in a Tahoe Basin watershed. *Journal of Environmental Quality*, 35(2), 479–489.
- Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret-Picot, M., Deckers, J., Haile, M., & Govers, G. (2002). Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the Northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 1267–1283. https://doi.org/10.1002/esp.404
- Parkner, T., Page, M. J., Marutami, T., & Trustrum, N. A. (2006). Development and controlling factors of gullies and gully complexes, East coast, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 187–199.
- Pennock, D. (2019). Soil Erosion: The Greatest Challenge for Sustainable Soil Management. FAO–Food; Agriculture Organization of the United Nations.
- Pereira, P., Francos, M., Brevik, E. C., Ubeda, X., & Bogunovic, I. (2018). Post-fire soil management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *5*, 26–32.

- Pereira, P., Ubeda, X., Martin, D., Mataix-Solera, J., Cerda, A., & Burguet, M. (2014). Wildfire effects on extractable elements in ash from a Pinus pinaster forest in Portugal. *Hydrological Processes*, 28(11), 3681–3690.
- Poesen, J. (2017). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. Earth Surface Processes and Landforms, 43. https://doi.org/10.1002/esp.4250
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. CATENA, 50(2–4), 91–133. https://doi.org/10.1016/s0341-8162(02)00143-1
- Poesen, J., Vandaele, K., & Van Wesemael, B. (1996). Contribution of gully erosion to sediment production. Em Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives: Proceedings of an International Symposium Held at Exeter, UK, from 15 to 19 July 1996 (p. 251, Vol. 236). IAHS Press.
- Prieto-Fernández, Á., Carballas, M., & Carballas, T. (2004). Inorganic and organic N pools in soils burned or heated: immediate alterations and evolution after forest wildfires. *Geoderma*, 121(3–4), 291–306.
- Rieke-Zapp, D., Poesen, J., & Nearing, M. (2007). Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1063–1076. https://doi.org/10.1002/esp.1469
- Robichaud, P. R., Lewis, S. A., Wagenbrenner, J. W., Ashmun, L. E., & Brown, R. E. (2013). Post-fire mulching for runoff and erosion mitigation part I: effectiveness at reducing hillslope erosion rates. *Catena*, 105, 75–92. https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.11.015
- Santos, L. M., Correia, A. J. P. M., & Coelho, P. A. L. F. (2020). Post-wildfire slope stability effects and mitigation: a case study from hilly terrains with unmanaged forest. SN Applied Sciences, 2, 1883. https://doi.org/10.1007/s42452-020-03660-8
- Shakesby, R. A., & Doerr, S. H. (2006). Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. Earth-Science Reviews, 74(3-4), 269–307.
- Sidle, R. C., Jarihani, B., Kaka, S. I., Koci, J., & Al-Shaibani, A. (2019). Hydrogeomorphic processes affecting dryland gully erosion: Implications for modelling. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43(1), 46–64.
- Sonneveld, M. P. W., Everson, T. M., & Veldkamp, A. (2005). Multi-scale analysis of soil erosion dynamics in Kwazulu-Natal, South Africa.
- Sun, L., Liu, Y. F., Wang, X. T., Liu, Y., & Wu, G. L. (2022). Soil nutrient loss by gully erosion on sloping alpine steppe in the northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Catena*, 208, 105763.
- Sun, L. Y., Fang, H. Y., Qi, D. L., Li, J. L., & Cai, Q. G. (2013). A review on rill erosion process and its influencing factors. *Chinese Geographical Science*, 23(4), 389–402.
- Thommeret, N., Bailly, J. S., & Puech, C. (2010). Extraction of thalweg networks from DTMs: application to badlands. *Hydrology and Earth System Sciences*, *14*(8), 1527–1536.
- Thommeret, N., Bailly, J. S., & Puech, C. (2009). Robust badlands thalwegs network extraction from DTM for topological characterisation. *Geomorphometry*.
- Torri, D., & Poesen, J. (2014). A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Earth Sciences Review*, *130*, 73–85.
- Úbeda, X., & Outeiro, L. R. (2009). Physical and chemical effects of fire on soil. Em *Fire effects on soils and restoration strategies* (pp. 121–148). CRC Press.
- Valentin, C., Poesen, J., & Li, Y. (2005). Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena*, *63*(2–3), 132–153.
- Valipour, M., Mohseni, N., & Hosseinzadeh, S. R. (2021). Factors affecting topographic thresholds in gully erosion occurrence and its management using predictive machine learning models. *Earth Sciences Research Journal*, 25(4), 423–432. https://doi.org/10.15446/esri.v25n4.95748
- Vanmaercke, M., Maetens, W., Poesen, J., Jankauskas, B., Jankauskiene, G., Verstraeten, G., & de Vente, J. (2012). A comparison of measured catchment sediment yields with measured and predicted hillslope erosion rates in Europe. *Journal of Soils and Sediments*, 12(4), 586–602.
- Vanmaercke, M., Panagos, P., & Vanwalleghem, T. (2021). Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art. *Earth-Science Reviews*, 218, 103637. https://doi.org/10.1016/j. earscirev.2021.103637
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Van Mele, B., Demuzere, M., Bruynseels, A., Golosov, V., & Fuseina, Y. (2016). How fast do gully headcuts retreat? *Earth Science Reviews*, 154, 336–355.
- Vergari, F., Della Seta, M., Del Monte, M., Fredi, P., & Lupia Palmieri, E. (2013). Long-and short-term evolution of several Mediterranean denudation hot spots: the role of rainfall variations and human impact. *Geomorphology*, 183, 14–27. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.002

- Vieira, A., & Bento-Gonçalves, A. (2021). Soil Conservation: a General Perspective. Em A. Vieira & A. Bento-Gonçalves (Ed.), Soil Conservation: Strategies, Management and Challenges. Nova Science Publishers.
- Vieira, D. C. S., Fernández, C., Veja, J. A., & Keizer, J. J. (2015). Does soil burn severity affect the post-fire runoff and interrill erosion response? A review based on meta-analysis of field rainfall simulation. *Journal of Hydrology*, 523, 452–462. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.071
- Wilcox, B. P., Breshears, D. D., & Allen, C. D. (2003). Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland: effects of scale and disturbance. *Ecological Monographs*, 73, 233–239.
- Xu, M., Li, Q., & Wilson, G. (2016). Degradation of soil physicochemical quality by ephemeral gully erosion on sloping cropland of the hilly Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*, *155*, 9–18.
- Young, R. A., & Mutchler, C. K. (1969). Effect of slope shape on erosion and runoff. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, *12*, 231–233.
- Zema, D. A., Nunes, J. P., & Lucas-Borja, M. E. (2020). Improvement of seasonal runoff and soil loss predictions by the MMF (Morgan-Morgan-Finney) model after wildfire and soil treatment in Mediterranean forest ecosystems. *Catena*, 188, 104415.
- Zgłobicki, W., Baran-Zgłobicka, B., Gawrysiak, L., & Telecka, M. (2015a). The impact of permanent gullies on present-day land use and agriculture in loess areas (E. Poland). *Catena*, *126*, 28–36.
- Zgłobicki, W., Kołodynska-Gawrysiak, R., & Gawrysiak, L. (2015b). Gully erosion as a natural hazard: the educational role of geotourism. *Natural Hazards*, 79(1), 159–181.
- Zhou, Y., Zhang, B., Qin, W., Deng, Q., Luo, J., Liu, H., Yang, D., Wang, H., & Zhao, Y. (2021). Primary environmental factors controlling gully distribution at the local and regional scale: An example from Northeastern China. *International Soil and Water Conservation Research*, 9(1), 58–68. https://doi. org/10.1016/j.iswcr.2020.08.004