

*Artigo de Pesquisa*

## Fatores controladores e mapeamento de feições erosivas lineares na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria - RS

### *Controlling factors and mapping of Linear Erosive Features in the Santa Maria River Basin - RS*

Carina Petsch <sup>1</sup>, Anderson Augusto Volpato Scoti <sup>2</sup>, Luís Eduardo de Souza Robaina <sup>3</sup>, Romario Trentin <sup>4</sup>

- 1 Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil. [carinapetsch@gmail.com](mailto:carinapetsch@gmail.com)  
ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-1079-0080>
- 2 Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil. [ascoti2@gmail.com](mailto:ascoti2@gmail.com)  
ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-8667-0432>
- 3 Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil. [lesrobaina@yahoo.com.br](mailto:lesrobaina@yahoo.com.br)  
ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2390-6417>
- 4 Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil. [romario.trentin@gmail.com](mailto:romario.trentin@gmail.com)  
ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-0615-2801>

Recebido: 04/08/2021; Aceito: 18/08/2022; Publicado: 01/10/2022

**Resumo:** A erosão hídrica é uma das principais causas de degradação do solo e o mapeamento da erosão linear é uma das ferramentas essenciais para o seu monitoramento. Diante disso, o objetivo desta pesquisa é mapear as feições erosivas lineares (FEL) da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria (BHRSM), sudoeste do RS, e compreender quais fatores ambientais são controladores ou desencadeadores da erosão. No oeste do RS há uma considerável preocupação associada a processos erosivos que ocupam grandes extensões e causam alterações na dinâmica do uso e alterações do meio. Os dados de geologia, solos, hipsometria, declividade, vertentes, uso da terra, canais de drenagem e estradas foram analisados em ambiente SIG. Os processos erosivos na BHRSM são inerentes ao substrato arenoso pouco consolidado, configurando um processo natural. A energia de relevo para a incisão dos fluxos hídricos é significativa, visto que as FEL estão relacionadas às declividades moderadas em porções de altitudes médias. Contudo, a ação antrópica acelera os processos erosivos. Destaca-se que o aumento da área ocupada por lavouras, dobrou no período de 20 anos, configurando uma nova paisagem e dinâmica para a BHRSM, demandando atenção especial para esta região que tende a intensificar os processos erosivos.

**Palavras-chave:** mapeamento de erosão; imagens Google Earth; sudoeste gaúcho.

**Abstract:** Water erosion is one of the main causes of soil degradation and linear erosion mapping is one of the essential tools for its monitoring. Therefore, the objective of this research is to map the linear erosive features (LEF) of the Santa Maria River Basin (BHRSM), southwest of RS, and understand which environmental factors are controlling or triggering erosion. In western RS there is a considerable concern associated with erosive processes that occupy large extensions and cause changes in the dynamics of use and changes in the environment. Data on geology, soils, hypsometry, slope, slopes, land use, drainage channels and roads were analyzed in a GIS environment. The erosive processes in BHRSM are inherent to the less consolidated sandy substrate, configuring a natural process. The relief energy for the incision of water flows is meaningful, since the LEF are related to moderate declivity in portions of medium altitudes. However, anthropogenic action accelerates erosive processes. It is noteworthy that the increase in the area occupied by crops, doubled in the period of 20 years, configuring a new landscape and dynamics for BHRSM, demanding special attention to this region that tends to intensify the erosive processes.

**Keywords:** erosion mapping; Google Earth images; southwestern Rio Grande do Sul

## 1. Introdução

A erosão hídrica é uma das principais causas de degradação do solo e afeta de maneira negativa a estrutura do solo, a retenção de água e nutrientes, o conteúdo de matéria orgânica e, por fim, a fertilidade do solo tanto em países desenvolvidos como em desenvolvimento (VALENTIN, 2005; MONTANARELLA et al., 2016). Ressalta-se assim que a erosão hídrica é a principal responsável pela degradação global do solo e declínios de produtividade (WEI et al., 2017), gerando perdas econômicas em todo o planeta (RAHMATI et al. 2016). Sartori et al. (2019) buscaram estimar somente o impacto econômico da erosão hídrica do solo na economia mundial e o valor é estimado em um custo anual de 8 bilhões de dólares para o PIB (Produto Interno Bruto) global. Sobretudo, a erosão linear do solo representa um processo significativo de remoção e transporte de material sedimentar, responsável por 10 a 94% da perda de sedimentos de uma bacia hidrográfica (POESEN et al., 2003).

O mapeamento da erosão linear é uma das ferramentas essenciais para o controle desse fenômeno, visando monitorar a degradação da terra e estudar seus impactos locais atuais e futuros (DESPRATS et al., 2013; LIU et al., 2016; AGHARAZI et al., 2017; RAZAVI-TERMEH et al., 2020). Métodos baseados em campo foram amplamente usados até que as fotografias aéreas e, posteriormente, as imagens de satélite se tornassem disponíveis para interpretação visual e também para aplicação de técnicas de processamento de imagens (SHRUTHI et al., 2015). As fotografias aéreas, em especial, foram amplamente utilizadas para o mapeamento de feições erosivas lineares - FEL - (SIRVIÖ et al., 2004; PELLIKKAA et al., 2005; BOUCHNAK et al., 2009; CONFORTI et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2013; BRAGA et al., 2017).

Atualmente, as imagens de satélite têm sido utilizadas em estudos geomorfológicos para o mapeamento de formas de relevo, incluindo aquelas resultantes da erosão do solo (BOARDMAN, 2016) e com o aumento da disponibilidade de produtos de alta resolução que se tornaram mais exequíveis (SHRUTHI, 2015). Embora as feições sejam facilmente observadas em campo, sua pequena extensão espacial usualmente as torna imperceptíveis em imagens de resolução espacial média, geralmente disponíveis de forma gratuita - e.g. imagens da série Landsat, com resolução espacial de 30 metros - (VRIELING, 2006; SHRUTHI et al., 2015).

Desde o seu início em 2005, as imagens disponíveis no Google Earth (GE) têm sido cada vez mais usadas em estudos de formas de relevo (BOARDMAN, 2016), principalmente devido à sua alta resolução espacial (BATISTA et al., 2017). Segundo Boardman (2016), o GE pode reduzir o tempo e as despesas em pesquisas voltadas ao monitoramento da erosão. Em estudos contemporâneos de erosão do solo, as imagens GE têm sido surpreendentemente pouco usadas (BOARDMAN, 2016), e limitam-se a estudos de identificação de voçorocas, em específico (KARYDAS; PANAGOS, 2020).

Após o trabalho de Boardman (2016), citam-se algumas pesquisas que reúnem esforços para o mapeamento de FEL com imagens do GE (BRAGA et al., 2017; BATISTA et al., 2018; KNIERIN et al., 2018; KARYDAS; PANAGOS, 2020). Não obstante, salienta-se que o trabalho de campo é fundamental para avaliar a acurácia dos produtos gerados remotamente. Também é possível encontrar na literatura estudos em que as imagens GE são utilizadas como suporte ao mapeamento de campo (CASTRO et al., 2010; SHRUTHI, 2014) ou em análises multi-sensores (CASTRO et al., 2010) e aliadas às imagens UAV - *Unmanned Aerial Vehicle* - (LIU et al., 2016).

Souza et al. (2017) ressaltam que é escassa a bibliografia relativa a estudos que relacionam os processos erosivos e possíveis fatores desencadeadores dos processos e suas características. A erosão hídrica é controlada por uma série de fatores que exercem influência sobre a formação e desenvolvimento da erosão linear como tipo de solo, erosividade das chuvas, escoamento superficial, erodibilidade dos solos, manejo do solo, geologia, uso do solo, gradiente de declive, aspecto de declive, curvatura, altitude, densidade de drenagem, índice de umidade topográfica (TWI), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), distância de estradas e atributos do solo (pH, porcentagem de argila, condutividade elétrica e porcentagem de silte) (VANWALLEGHEM et al., 2005, VALENTIN et al., 2005; VRIELING, 2006; AGNESI et al. 2011; LUCÀ et al., 2011, CUI et al., 2012; EL MAAOUI et al., 2012; SVORAY et al., 2012; SHRUTHI 2014; AMIRI et al 2019).

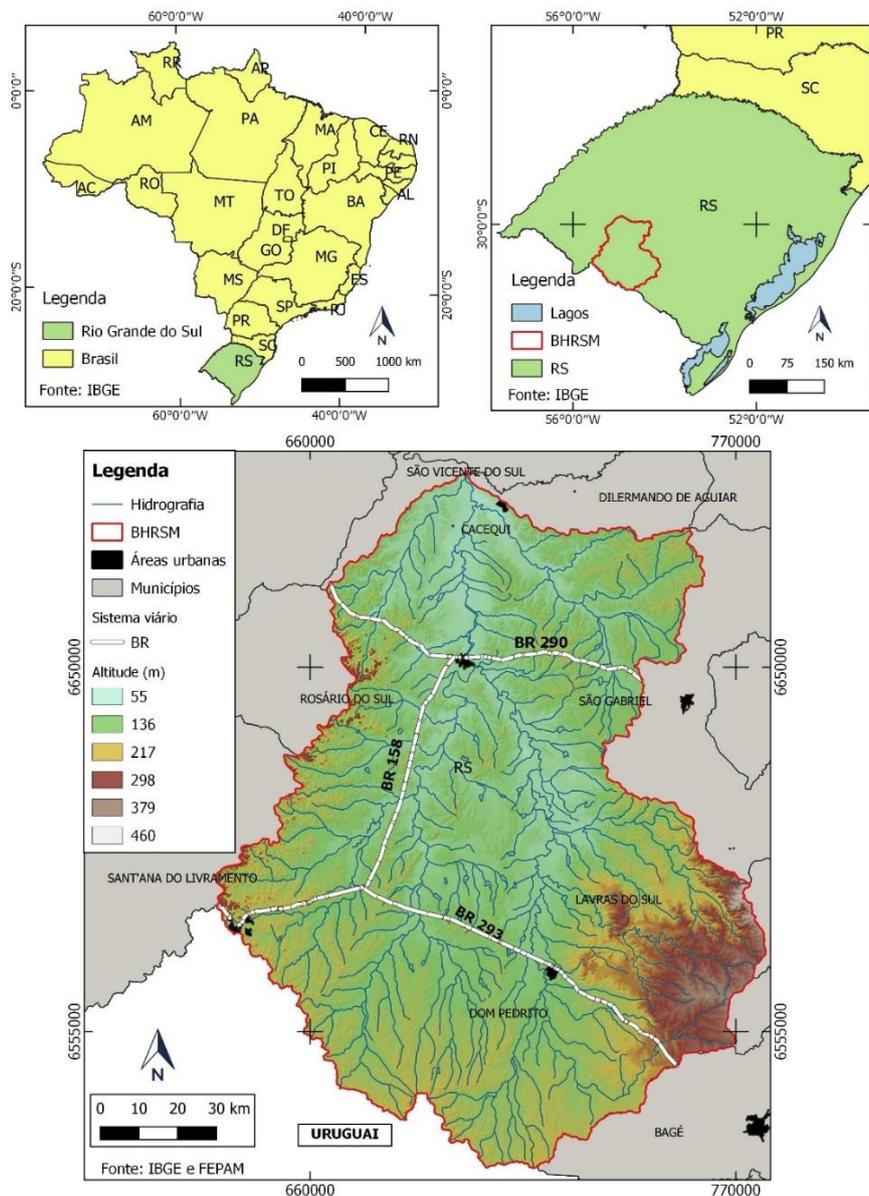
Alguns estudos foram realizados correlacionando fatores ambientais à presença de FEL (MENÉNDEZ-DUARTE et al., 2007; CASTRO et al., 2010; CONFORTI et al 2011; DESPRATS et al., 2013, BRAGA et al., 2017; KNIERIN et al., 2018; AMIRI et al., 2019; RAZAVI-TERMEH et al., 2020). Para o Rio Grande do Sul, Rademann et al. (2017) vetorizam as feições lineares com base no GE e relacionaram com a litologia. Knierin et al. (2018) associaram as FEL à hipsometria, declividade, perfis de curvatura, planos de curvatura e formas da vertente.

Alguns estudos já avaliaram os processos erosivos, seja somente para um município, ou para toda a bacia hidrográfica do rio Ibicuí (ROBAINA et al., 2002; ROBAINA et al., 2015; ROBAINA et al., 2015; RADEMANN et

al., 2017; RADEMANN et al., 2018; CABRAL et al., 2020). Contudo, ainda não foi desenvolvido um mapeamento de detalhe das feições erosivas englobando toda a Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria (BHRSM), justificando a realização dessa pesquisa. Esta bacia encontra-se espacialmente sobre três compartimentos geomorfológicos do estado do Rio Grande do Sul (IBGE 1986) e apresenta uma boa representatividade da situação atual da dinâmica de transformação de ocupação em que se insere o Bioma Pampa, conhecido pelo uso de campos nativos com gramíneas utilizadas para pastagem do gado, e que atualmente tem sido transformado em lavouras de produção agrícola (Ghersa et al., 2002; Viglizzo et al., 2011; Mengue et al., 2020), o que pode futuramente representar uma intensificação nas feições superficiais. Diante do apresentado, os objetivos deste estudo são: (i) fazer um inventário das FEL para a BHRSM utilizando dados de alta resolução espacial das imagens do GE; e (ii) identificar e discutir quais fatores ambientais são controladores e desencadeantes das feições erosivas.

## 2. Área de Estudo

Localizada no sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 29°47' a 31°36' latitude Sul e 54°00' a 55°32' longitude Oeste, a BHRSM abrange uma área de 15.740 km<sup>2</sup> (Figura 1). Seis municípios têm parte ou a totalidade de seus territórios inseridos na BHRSM, sendo eles: Cacequi, Dom Pedrito, Rosário do Sul, Santana do Livramento, São Gabriel e Lavras do Sul.



**Figura 1.** Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria, sudoeste do RS.

As altitudes variam entre 57 m em sua foz e 455 m na porção sudeste, na porção do Escudo Cristalino. Compreende em seus limites três províncias geomorfológicas, sendo elas: Planalto da Campanha, Depressão Central Gaúcha e Planalto Sul-Riograndense (IBGE 1986). Segundo Wildner et al (2006), em termos de litotipos aflorantes se destacam as sequências sedimentares da Bacia do Paraná. Os solos em sua maioria são bem desenvolvidos em termos de perfil, sendo os Argissolos os mais comuns, enquanto os solos pouco desenvolvidos (Neossolos e Cambissolos) são encontrados nas áreas escarpadas e associados a morros e morrotes (SCOTTI, 2017).

Quanto ao uso da terra, predominam as porções de campo, embora a área ocupada por lavouras esteja aumentando, segundo Scotti (2017). As tipologias climáticas encontradas na BHRSM são: Subtropical I - pouco úmido - e Subtropical II - medianamente úmido – com a temperatura média anual variando de 17 a 20° C e as precipitações ficam em torno de 1.200 – 1.500 mm anuais (ROSSATO, 2011).

### 3. Materiais e Métodos

#### 3.1 Banco de dados e informações espaciais

A base de imagens de satélite utilizada foi a do Google Satélite disponível no Sistema de Informação Geográfica QGIS 3.4, através do *plugin* QuickMap Services. Trata-se de um repositório de séries temporais de imagens de satélite de alta resolução (normalmente cerca de 0,5 m, como WorldView, Pleiades, GeoEye, etc.) em visualização RGB - visível - (KARYDAS; PANAGOS, 2020).

Os seguintes fatores foram considerados como possíveis controladores das FEL (Tabela 1): substrato geológico; fraturas e falhas geológicas; solos e erodibilidade; hipsometria e declividade; forma das vertentes; canais de drenagem; uso e ocupação da terra e estradas.

**Tabela 1.** Fatores controladores considerados, fontes, escala e dados secundários obtidos.

Dados	Fonte	Escala	Disponível em	Dado secundário obtido
Substrato geológico	CPRM	1:750.000	<a href="http://geosgb.cprm.gov.br/">http://geosgb.cprm.gov.br/</a>	Fraturas e falhas geológicas
Solos	IBGE/Streck et al. (2008) e Scotti (2017)	1:250.000	Projeto RADAM Brasil - IBGE 1986; Solos do Rio Grande do Sul	
Erodibilidade dos solos	Bibliografia		Mannigel et al. (2002), Silva e Alvares (2005) e Lopes et al. (2011)	
Hipsometria				
Declividade				
Perfil de curvatura das vertentes	SRTM 3 arc second	Resolução espacial de ~90 m	Earth Explorer ( <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> )	
Rede de drenagem	Base vetorial contínua do RS	1:50.000	Hasenack e Weber (2010)	
Uso da terra	Classificação Supervisionada - Imagens Landsat 8 OLI	Resolução espacial de 30 metros	Earth Explorer	
Sistema viário	Base Vetorial Contínua do RS.	1:50.000	Hasenack e Weber (2010)	

Organizado pelos autores

As informações sobre as litologias foram obtidas a partir dos mapeamentos desenvolvidos pela CPRM (WILDNER et al., 2006) e validadas nos trabalhos de campo. As informações de solos foram obtidas no mapeamento proposto por Streck et al (2008) e Scoti (2017) que dividiu os solos da BHRSM de acordo com o desenvolvimento pedogenético e hidromorfismo em três unidades. Essa divisão foi adotada nesta pesquisa. Os valores de erodibilidade (K) foram baseados no trabalho de Mannigel et al (2002), Silva e Alvares (2005) e Lopes et al (2011) que definiram os valores de K em médias de outros 14 autores (Tabela 2).

**Tabela 2.** Valores de erodibilidade para os solos identificados na BHRSM.

Solo	Erodibilidade - Silva e Alvares (2005)	Erodibilidade - Mannigel et al. (2002) e Lopes et al. (2011)
Planossolos	0,0097	
Neossolos	0,0351	
Luvissolos		0,022
Gleissolos	0,0361	
Chernossolos	0,0309	
Argissolos	0,0425	

Organizado pelos autores

As classes de erodibilidade do solo foram classificadas por Mannigel et al. (2002), que definiram a amplitude de K (t.h.MJ-1.mm-1) de 0,019 a 0,024 como sendo muito baixa; 0,025 a 0,030 como sendo baixa; 0,031 a 0,036 como sendo moderada; 0,037 a 0,042 sendo alta e > 0,042 os autores classificaram como muito alta.

Os trabalhos de campo com levantamento de dados, descrições e registros fotográficos, são utilizados ainda como ajuste das bases cartográficas para fins de adequação das escalas de análise. A padronização faz-se necessária para adequação dos limites espaciais das classes e associação entre camadas de mapas o que é possível através das investigações em campo.

### 3.2 Processamento dos dados

Para a elaboração do mapa de declividade e hipsometria, foi utilizado o MDE gerado a partir da missão SRTM (90 m), disponíveis em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. A classificação da declividade seguiu os pressupostos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), sendo: 0-2%, 2-5%, 5-15% e mais de 15%. Para a obtenção do Plano e Perfil utilizou-se a ferramenta *curvature*, onde as informações foram geradas em raster, e, após o plano de informação, ocorreu reclassificação nas quatro curvaturas principais: côncava-convergente, côncava-divergente, convexa-convergente e convexa-divergente.

O uso da terra foi obtido por meio de uma classificação supervisionada das imagens LandSat 8 OLI (Órbita/Ponto: 223/081 e 223/082), com passagem do sistema satélite/sensor no dia 11/03/2021. Foi utilizado o *plugin* SCP do QGIS 3.10 e o método estatístico de classificação foi o de máxima verossimilhança. A definição das classes ocorreu baseada nos trabalhos de campo em: Água, Lavouras, Campo, Floresta, Silvicultura e Depósitos recentes.

### 3.3 Processo de identificação e mapeamento das FEL

Compreende-se como feição erosiva linear, os sulcos, ravinas e voçorocas, os quais denotam a ação da erosão regressiva, no processo de desgaste e esculturação das formas de relevo. O termo FEL vem sendo utilizado em estudos geomorfológicos, como é caso dos trabalhos desenvolvidos por Yan et al (2008), Zanatta et al. (2015) e Mathias et al. (2020).

O processo de identificação das feições erosivas lineares foi feito de forma manual, por interpretação visual, considerando aspectos de formas, tonalidades, texturas e sombras, de acordo com método adotado por outros autores (OLIVEIRA et al., 2013; BOARDMAN, 2016; KNIERIN et al 2018; KARYDAS; PANAGOS, 2020). Para feições ao longo de um mesmo fluxo, porém interrompidas ainda que por alguns metros, estas foram digitalizadas como vetores separados, de acordo com a metodologia de Karydas e Panagos (2020). Por fim, foi gerado um vértice nas linhas mapeadas, correspondente à cabeceira dos canais de primeira ordem para correlacionar com as variáveis consideradas no item 3.1 As linhas de FEL só foram consideradas para a determinação da orientação das feições.

### 3.4 Avaliação da acurácia do mapeamento e trabalhos de campo

Foram realizados três trabalhos de campo para identificação das FEL: 20 de abril de 2020, 04 de agosto de 2020 e 24 de abril de 2021. Com o auxílio de GPS e câmera fotográfica, 55 pontos de FEL foram registrados para aumentar a acurácia do mapeamento. Foram registradas imagens com drones para validação das análises através da identificação e caracterização das feições e ilustração no artigo, porém não foram utilizadas durante o processo de mapeamento das FEL. Ressalta-se que os pontos coletados se localizam nos municípios de Rosário do Sul e Cacequi, ao longo das rodovias BR 158, BR 290, RS 640 e estradas secundárias.

Foi realizado um cálculo da área coberta por nuvens e sombras, no banco de dados das imagens Google Earth, e que, portanto, representam zonas não passíveis de mapeamento.

### 3.5 Processamentos estatísticos e análise dos resultados

Para gerar o histograma circular de direção das FEL foi utilizada a ferramenta “Azimute”, disponível na calculadora de campo da tabela de atributos. Em seguida, essa informação foi inserida no plugin Line direction histogram para gerar o histograma no QGIS 3.4. A partir do arquivo de localização de cabeceiras de drenagem foi gerado um mapa de concentração da FEL utilizando a ferramenta “mapa de calor (estimativa de densidade Kernel)” do QGIS 3.4, com um raio de 6000 unidades do mapa e função matemática quártica.

Para a correlação entre os dados foram criadas as seguintes etapas:

- Para associação entre as cabeceiras das FEL e os parâmetros de estradas e drenagens foi utilizada a ferramenta “distância euclidiana” do ArcGIS. A ferramenta gerou um arquivo raster de distâncias em relação às estradas e outro arquivo de distância em relação aos canais de drenagem.
- Quanto à análise dos dados, destaca-se que os vértices das cabeceiras de drenagem de primeira ordem com FEL foram combinados com todos os parâmetros utilizando a ferramenta “extract value to point” do ArcGIS. A ferramenta forneceu o valor exato de altitude, percentual de declividade, distâncias em relação às estradas e drenagens, tipo de solo, tipo de uso da terra, tipo de vertente e a Formação Geológica para cada uma das cabeceiras das FEL.

Para correlacionar a presença das FEL nas diferentes classes das variáveis de substrato geológico, solos, declividade, tipos de vertentes e usos da terra e a porcentagem total ocupada em relação a área da BHRSM, foi aplicado um cálculo de razão de frequência (Fr). A equação adaptada de Bonham-Carter (1994) é:

$$Fr = \frac{F_i/A_i}{F/A} \quad (1)$$

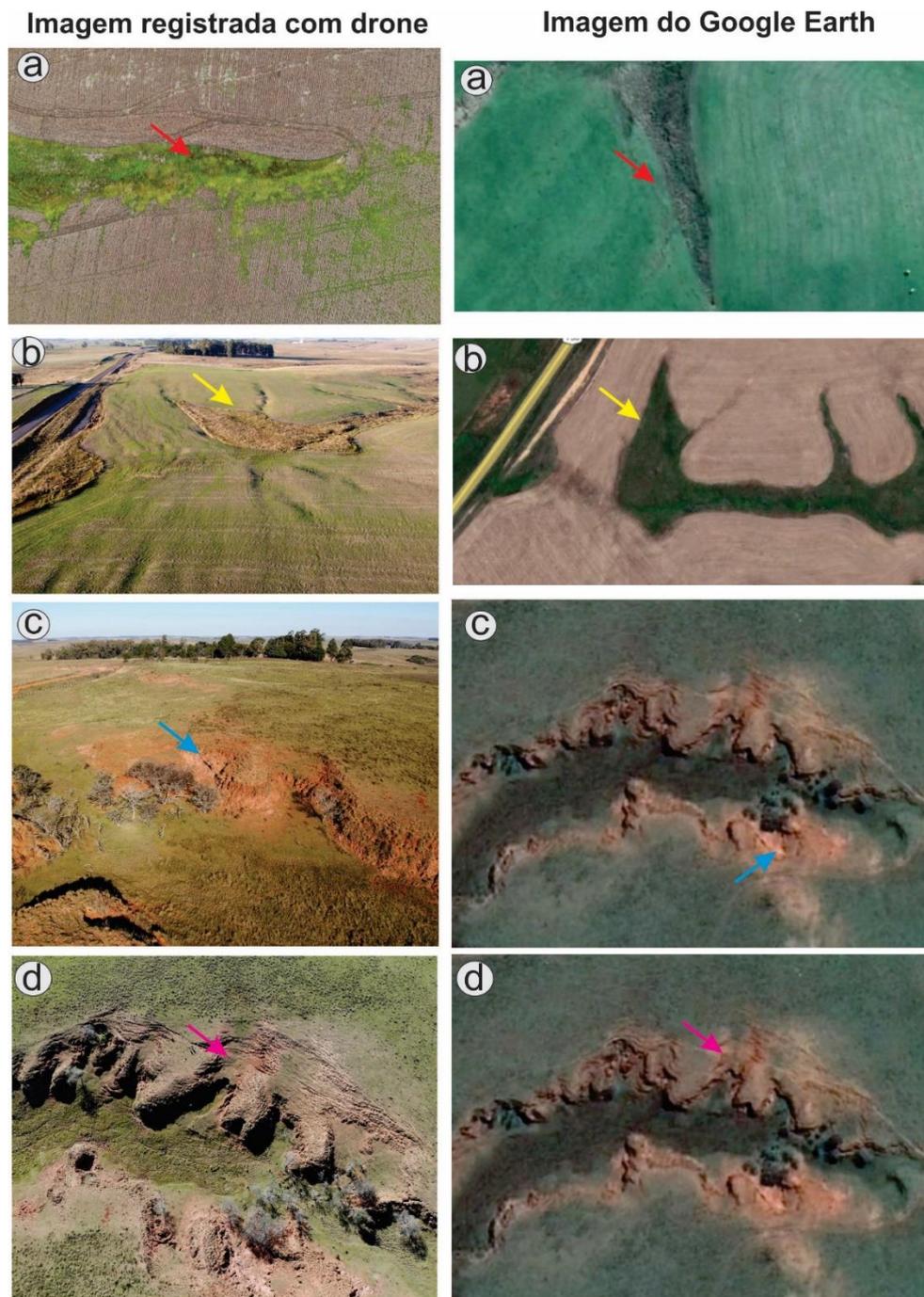
Onde  $A_i$  representa a área ocupada pela classe da variável física “i” dentro da área total da BHRSM (A);  $F_i$  representa a área de FEL na variável física “i”, considerando a área total de FEL (F).

Os valores da razão de frequência (Fr) representam o nível de correlação entre as FEL e a variável em análise (substrato geológico, solos, declividade, tipos de vertentes e usos da terra). Desta forma, para os valores de razão de frequência maiores que 1 (um), a correlação é considerada alta, enquanto valores menores que 1 (um) indica uma baixa correlação (ESPER ANGUIERI, 2013.)

## 4. Resultados e discussões

### 4.1 Caracterização geral das feições mapeadas e acurácia do mapeamento

Foram mapeadas aproximadamente 5.751 km de erosão linear mapeadas e 15.090 cabeceiras de drenagem de primeira ordem. O processo de mapeamento se iniciou com um trabalho de campo para identificação de feições erosivas. A partir dos pontos registrados, foi necessário compreender como estas feições se comportavam quanto aos elementos de tonalidade e textura na imagem de satélite, critérios fundamentais para o auxílio na interpretação visual. Destaca-se que áreas de perda de sedimentos com maior reflectância (Figura 2 C) e textura diferenciada na imagem (Figura 2 D) foram identificados com maior facilidade. A presença de vegetação também foi utilizada para auxiliar na interpretação, visto que ocasiona uma diferença de textura e tonalidade (Figura 2 A e B). Após o mapeamento realizado no SIG, foi necessário o retorno ao campo para conferência e validação do processo realizado. Somente após esta etapa, foi possível extrapolar o mapeamento para a toda a BHRSM. Todo o processo de levantamento das FEL durou cerca de um ano.



**Figura 2.** A e B – Mostram voçoroca com vegetação de cor diferenciada; C - Voçoroca ativa com presença de material com alta reflectância; D - Degraus de abatimento conferindo diferente textura à porção da voçoroca. As imagens foram adquiridas com drone Mavic Air Pro e Mini Mavic.

Quanto à acurácia do mapeamento, foi realizado o cálculo das falhas por nuvens e sombras, que indicam que 19 km<sup>2</sup> de área não estavam disponíveis na base do Google Earth, o que corresponde a 0,11% do total da área de estudo. Salienta-se, que o mapeamento foi realizado somente por uma pesquisadora, o que contribui para minimizar erros de interpretação da imagem e posterior vetorização das FEL.

#### 4.2 Fatores determinantes para a ocorrência das feições erosivas lineares

A critério de organização dos resultados e desenvolvimento das discussões, iremos apresentar primeiramente os fatores físicos que caracterizam a BHRSM, e posteriormente aspectos ligados à questão antrópica.

### 4.2.1 Substrato geológico

As litologias que compõem o substrato da BHRSM estão representadas por rochas do Maciço cristalino e por seqüências de rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná, além de sedimentos quaternários (WILDNER et al., 2006). O Maciço cristalino ocorre em uma pequena porção, à SE da BHRSM (Figura 3). Os valores de Fr são, relativamente baixos nessa porção, sendo que os maiores valores foram encontrados nas áreas com ocorrência do Granito Dom Pedrito com FR de 0,408 e vulcânicas da Formação Hilário com FR de 0,327.

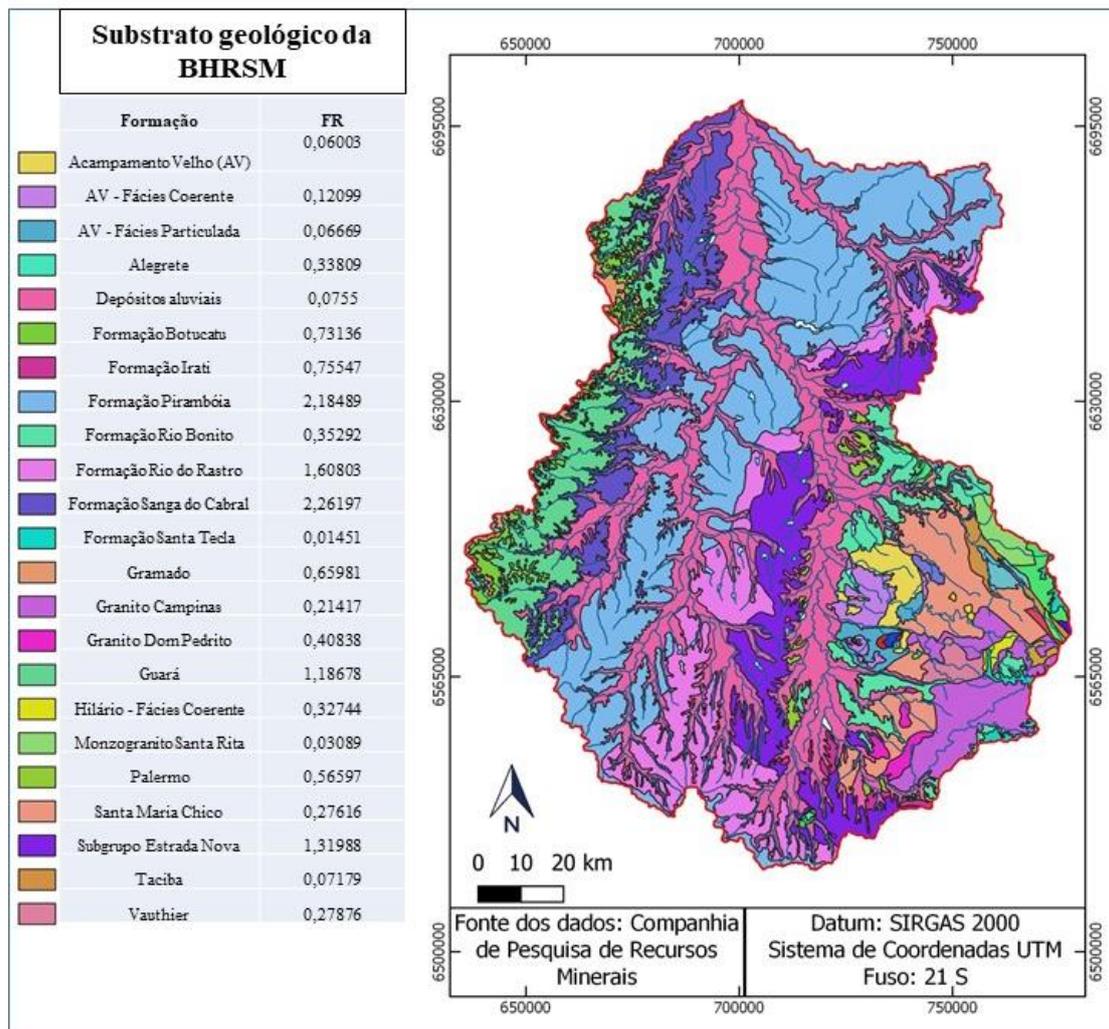


Figura 3. Mapa geológico e respectivas frequências de FEL encontradas.

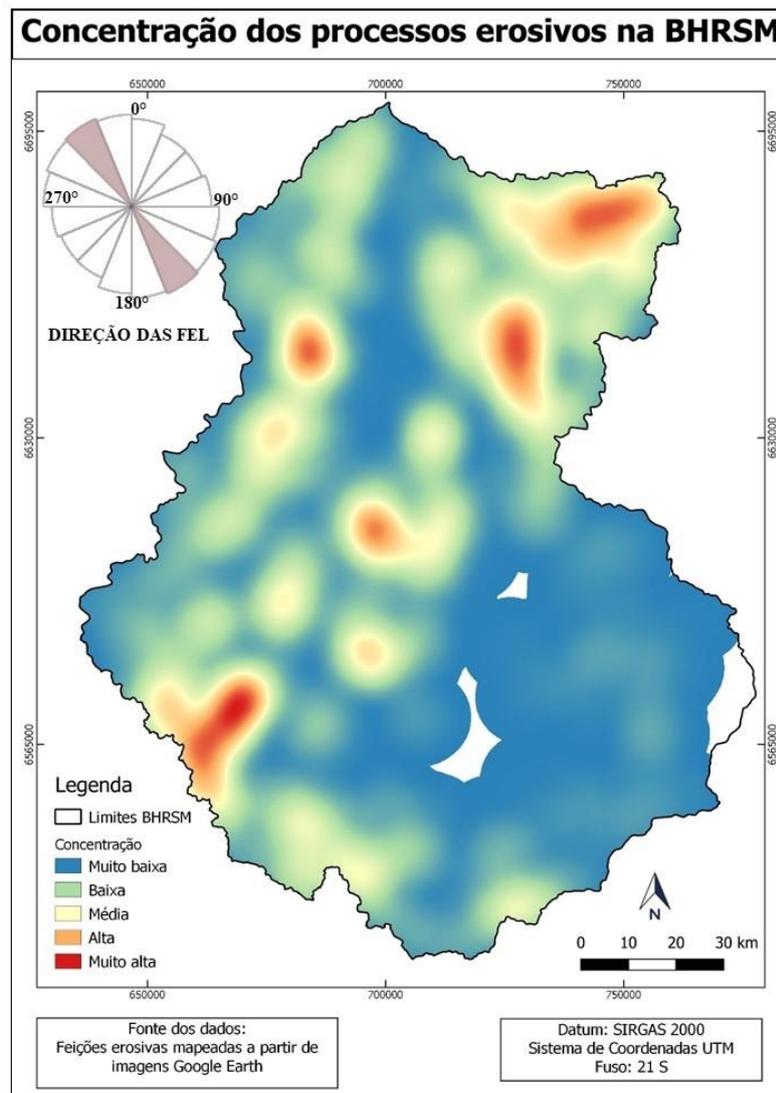
As seqüências de rochas sedimentares da Bacia do Paraná ocorrem no centro-Sul da bacia. A Formação Rio Bonito apresenta valores de Fr = 0,35, enquanto o Subgrupo Estrada Nova, com Fr de 1,32, são seguidos por arenitos e lamitos, distribuídos ao longo de faixas laterais da Formação Rio do Rastro com Fr = 1,60. Estes afloramentos dão lugar, na direção oeste, a uma espessa sucessão flúvio-eólica. Essas seqüências se destacam pelos maiores valores encontrados de Fr, sendo 2,26 para as rochas da Formação Sanga do Cabral e 2,18 para as rochas da Formação Pirambóia. É amplamente documentado por outros autores que essas duas litologias estão mais sujeitas à erosão por se tratarem de rochas friáveis (ROBAINA et al., 2010; ROBAINA et al., 2015, RADEMANN et al., 2017; RADEMANN et al., 2018).

Aflorantes no oeste da bacia (Figura 3), encontram-se rochas da Formação Guará, com Fr = 1,18. Robaina et al. (2015) destacam que estes arenitos demarcam uma porção de exposição de materiais arenosos, friáveis e resultantes da erosão aquosa e eólica. Associado à Serra do Caverá, que forma o divisor da bacia no limite oeste, ocorrem derrames de basalto e andesito basáltico que se associam a arenitos do sistema eólico da Formação Botucatu. As rochas vulcânicas pertencem às Fácies Alegrete, com Fr = 0,338, e a Fácies Gramado, com Fr = 0,660.

#### 4.2.2 Fraturas e falhas geológicas

Analisando o contexto de lineamentos da região, Zalán et al. (1990) apontam a direção NO-SE e NE-SO como representativas de áreas de falhas e fraturas para a bacia do rio Paraná e Robaina et al (2002) ressaltam que a direção das voçorocas em Cacequi (RS) segue reativações tectônicas ligadas ao desenvolvimento da referida bacia hidrográfica: “fraturamentos resultantes da direção NE - SO e NO - SE, formam uma malha separando blocos nas superfícies das erosões” (ROBAINA et al., 2002. p.119). Ao passo que, Cabral et al (2020) apontam as direções E-O e NE como as predominantes para voçorocas em Cacequi (RS). Nesse viés, Robaina e Trentin (2019) ressaltam que para toda a bacia hidrográfica do Ibicuí também há forte controle estrutural nas FEL, com direções predominantes de N45(+/-15) E, nordeste e N(45+/- 15)O e noroeste. Diante disso, destaca-se que as FEL da BHRSM se desenvolvem em áreas controladas por falhas da Bacia do Paraná, sendo que as voçorocas acabam se desenvolvendo por erosão remontante, seguindo justamente as áreas de fraqueza estrutural.

Em relação aos lineamentos estruturais, a tendência predominante das feições é NO-SE ou SE-NO (Figura 4). De todas as FEL mapeadas que correspondem a 16.343 vetores, 4.876 possuem as referidas direções, ou seja, aproximadamente 37%. Também se destaca que os maiores comprimentos de FEL estão abarcados nessa direção mencionada, presumindo que os fluxos concentrados nestes planos de fraqueza proporcionam uma facilidade na incisão e formação de ravinas e voçorocas, assim como o maior desenvolvimento e comprimento também. A direção NE-SO ocorre em aproximadamente 29% das FEL, a direção N-S está em cerca de 17% das FEL e L-O em aproximadamente 15% das FEL.



**Figura 4.** Concentração dos processos erosivos na BHRSM, com destaque para a porção de rochas sedimentares. A direção das FEL (NO-SE ou SE-NO) correspondem a falhamentos e fraturas da bacia hidrográfica do Paraná.

#### 4.2.3 Solos e erodibilidade

Considerando o primeiro nível de classificação, os solos da BHRSM estão representados por Gleissolos, Planossolos e Chernossolos, Neossolos litólicos, Neossolos Flúvicos Argissolos e Luvisolos. Os Neossolos apresentam os menores valores de Fr, sendo que os Neossolos litólicos possuem Fr de 0,17 e os Neossolos Flúvicos não apresentam FEL, dispensando valores de Fr.

Nos solos com hidromorfismo, os Planossolos possuem correlação de  $Fr=0,13$ , visto que são de baixa erodibilidade. Os Gleissolos, apesar de apresentarem erodibilidade moderada ( $0,036 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ ) segundo classificação de Mannigel et al. (2002), tiveram Fr baixo, de 0,02.

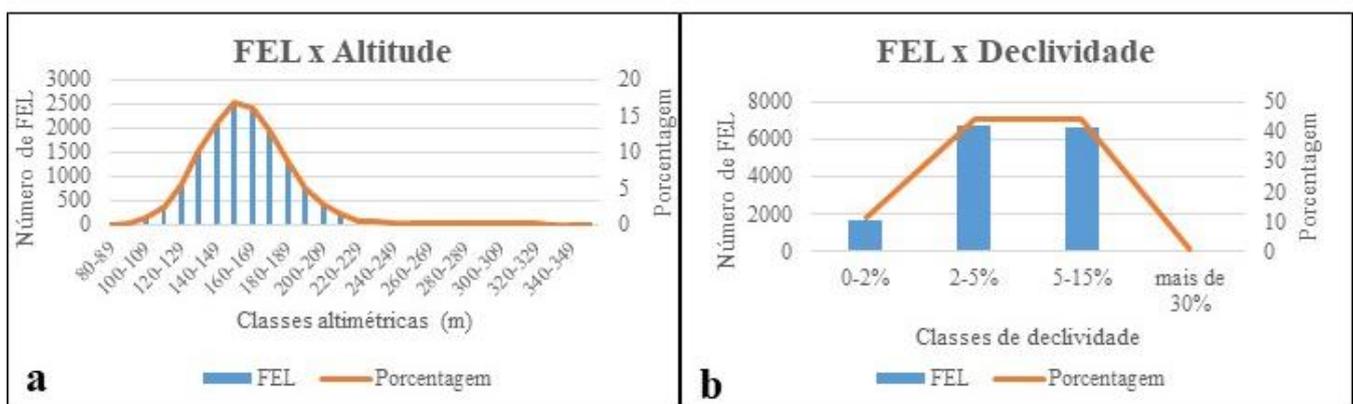
Os Chernossolos, caracterizados pelo teor de matéria orgânica no horizonte superficial possuem alta relação com os processos de erosão linear, com Fr de 1,44. Esta correlação pode ser explicada por se tratar de áreas de nascentes da BHRSM, o que pode estar associado à energia de relevo e poder incisivo dos fluxos hídricos em áreas de maior declividade (discutido na seção 4.2.4). Destaca-se também que os Chernossolos se encaixam na classe de alta erodibilidade.

Os Argissolos são solos bem desenvolvidos com horizonte B textural e são considerados de alta erodibilidade, segundo classificação de Mannigel et al. (2002), e tiveram um Fr de 1,53. Os Luvisolos, por sua vez, que se caracterizam por B textural e argilas de alta atividade, apresentam significativa relação com os processos erosivos lineares na bacia, possuindo Fr de 1,25.

#### 4.2.4 Hipsometria e declividade

A predominância das FEL ocorre entre as altitudes de 150 a 159 m, correspondendo a 2.536 cabeceiras de bacias de drenagem. Na classe de 160-169 m, foram mapeadas 2.444 cabeceiras de drenagem e na classe de 140-149 m, foram identificadas 2.118 cabeceiras de drenagem (Figura 5 A). As classes acima de 220 m possuem juntas menos de 2,5% das FEL e, mesmo que nessas áreas as declividades sejam mais acentuadas, há maior destaque para outras formas de transporte de material. Comparado a outros estudos, tal como no município de Unistalda (RS), Knierin et al. (2018) também observaram o padrão de erosão em altitudes inferiores a 200 m. As porções mais altas (>200 m) da BHRSM correspondem ao Escudo Cristalino e à Serra do Caverá, em áreas de Neossolos Litólicos e afloramentos rochosos, portanto, áreas com menor possibilidade de desenvolvimento de FEL.

Quanto à declividade, a maioria das cabeceiras de drenagem com FEL se encontram nas classes entre 2-5% e 5-15%, respectivamente com 6.685 e 6.620 feições (Figura 5 B). Porém, ao ser calculado o valor de frequência, há mais FEL para a classe de 5-15%, com  $Fr=2,60$ . Para Unistalda (RS), Knierin et al. (2018) observaram as feições erosivas se desenvolvendo principalmente na classe de 5-15% e para Cacequi (RS), Rademann et al. (2018) também verificaram o mesmo resultado. Trentin e Robaina (2015) ressaltam que declividades superiores a 5%, de maneira geral, propiciam o desenvolvimento da erosão.



**Figura 5.** Frequência observada das cabeceiras de drenagem com FEL, de acordo com a classe hipsométrica (a), e da declividade (b).

#### 4.2.5 Perfil de curvatura na BHRSM

Verifica-se a prevalência de cabeceiras de FEL nas vertentes côncavo-convergentes com  $Fr=1,22$  e convexo-convergentes com  $Fr=1,34$ , observando um forte controle estabelecido pela curvatura horizontal. As vertentes convergentes são caracterizadas por concentrar os fluxos de matéria e energia e, conseqüentemente, desencadear processos erosivos nas nascentes (Figura 6). Os resultados vão ao encontro de outros estudos. Knierin et al. (2018) também identificaram em Unistalda/RS a predominância de processos erosivos em perfis côncavos e planos convergentes; e Cabral et al. (2020) destacaram que as feições erosivas de Cacequi/RS se desenvolvem em vertentes com bases convexas, em maiores declividades e pequenos comprimentos de rampa, favorecendo o aumento da velocidade de escoamento.

Destaca-se que para a BHRSM somente 23% das vertentes são do tipo convergente, havendo predominância das vertentes com perfil divergente. Ocorre a predominância de vertentes côncavo-divergentes ocupando cerca de 76% da área, com um  $Fr=0,92$  para presença de FEL. Embora não se trate de um perfil que favoreça a concentração do escoamento superficial, é importante mencionar que os outros parâmetros podem influenciar esse escoamento, tais como declividade, solos e geologia, além de intervenções antrópicas relacionadas ao uso da terra ou à implantação de estradas (apresentados nas próximas seções). Os esquemas dispostos à esquerda (Figura 6) demonstram a incisão das FEL associadas à rede de drenagem (será aprofundado na seção 4.2.6).

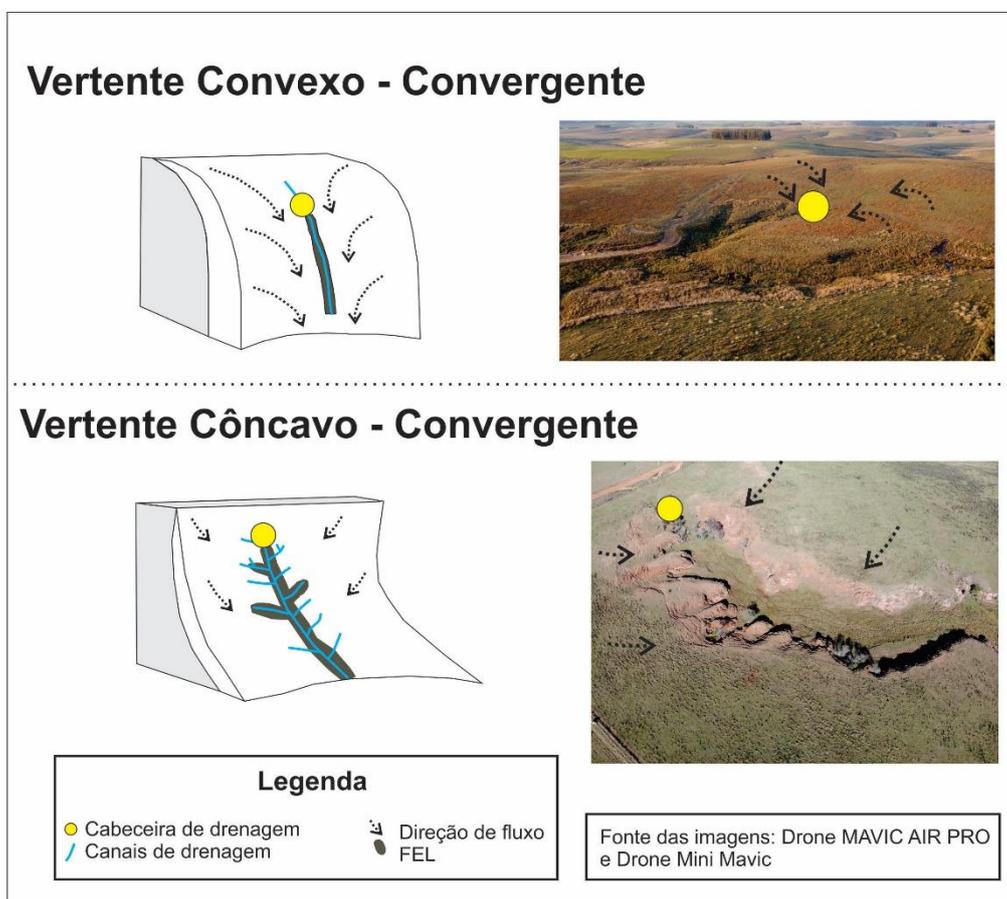
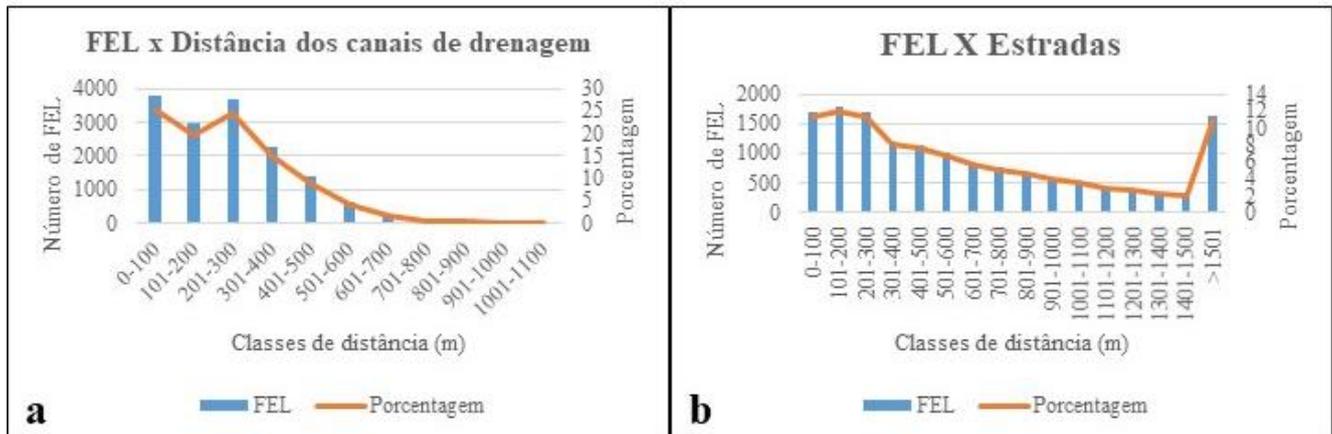


Figura 6. Esquema mostrando as formas das vertentes com a presença de FEL.

#### 4.2.6 Canais de drenagem

Cerca de 25% das FEL encontram-se em cabeceiras de drenagem, associadas a uma faixa de 0-100 m dos canais da BHRSM (Figura 7 A); por outro lado, 20% estão localizadas a uma distância entre 101-200 m destes canais e 25% foram mapeadas entre 201-300 m; finalmente, 15% se localizam entre 401-500 m, e somente 15% das FEL encontram-se localizadas na faixa entre 501-700 m das cabeceiras. Após a linha de 701 m de distância dos canais de drenagem, não há FEL próximas, o que demonstra a forte associação destas feições ao sistema de drenagem.

Esta associação contribuiu para expandir a conectividade na paisagem, ou seja, relação entre as feições erosivas e os cursos de água, aumentando assim o potencial de transferência de sedimentos para os cursos d'água. São áreas de fluxo concentrado em porções de solos friáveis, que em eventos de precipitação carregam grande quantidade de sedimentos para os canais de drenagem perenes, ocasionando assoreamento e mudanças na morfologia fluvial. Associado às condições morfológicas e morfométricas, tem-se um sistema de fraturas (seção 3.2.2) onde a rede de drenagem se instalou, pois, os talwegues se aprofundam e avançam conforme a erosão remontante. Esse processo é natural na BHRSM e está associado à sua morfodinâmica, podendo ser acelerado por ações antrópicas.



**Figura 7.** Frequência observada das cabeceiras de drenagem com FEL, de acordo com a distância em relação aos canais de drenagem (a) e distância em relação as estradas (b).

No estudo sobre feições erosivas lineares supracitado de Knierin et al. (2018), ressaltou-se a ocorrência de processos erosivos associados à rede de drenagem e aqueles conectados à base de morros, morrotes e/ou cornijas. Observa-se que as FEL na BHRSM estão associadas a canais de primeira ordem (Figura 8 B e 8 C; Figura 9 C), na sua maioria. A associação de FEL com morros e morrotes ocorre somente nas porções sudoeste (Figura 8 A) da BHRSM, na serra do Caverá.



**Figura 8.** FEL se desenvolvendo próxima a morrote (a); próxima à reservatório (b) e; em canais de drenagem intermitentes (c).

4.2.7 Uso e ocupação da terra

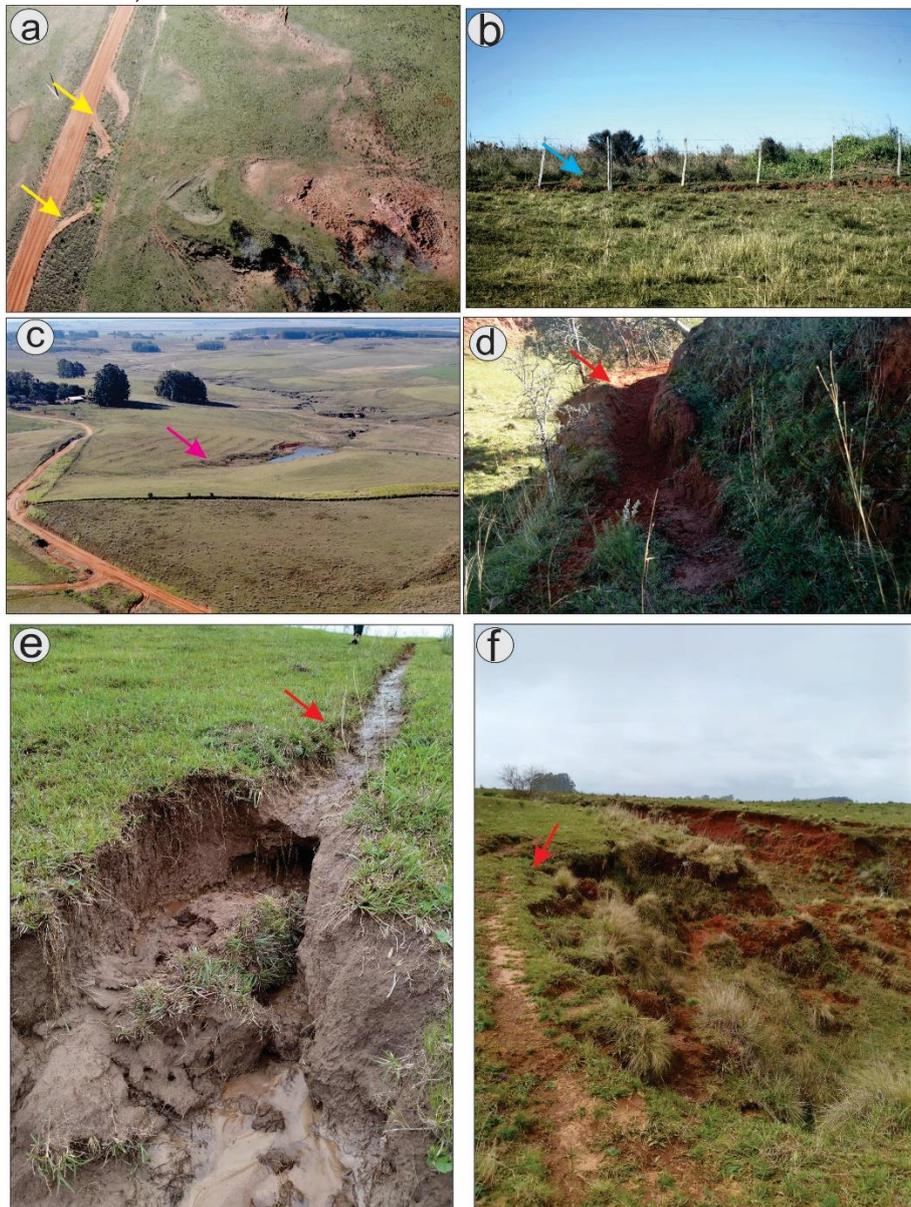
O maior valor de Fr foi encontrado para as porções de campo, sendo de 1,37, o que também foi observado em trabalho de campo na BHRSM, ao observar-se o papel da erosão causada pelos animais, tais como o gado. É comum observar que os caminhos criados pelo gado, ao provocar a compactação do solo, atuam como canais de facilitação do escoamento superficial (Figura 9 D e E). Em algumas margens de voçorocas é possível visualizar a desestabilização dessas porções, em função da passagem do gado, fomentando o desenvolvimento de degraus de abatimento (Figura 9 F).

Para as áreas de culturas temporárias obteve-se um Fr=0,72, representando menor correlação. Contudo, destaca-se que Scoti et al. (2015) e Scoti (2017) já abordaram que é possível verificar uma transição das áreas de campo para lavouras. Comparando o mapeamento de 2001 feito por Scoti (2017) com o desta pesquisa em 2021,

as áreas com lavouras dobraram - ocupavam 13% da BHRSM e atualmente correspondem a 26%; enquanto as áreas de campo representavam 67% e em 2021 foram reduzidas para 55% da BHRSM. Em campo, observou-se que algumas propriedades não faziam uso da técnica de manejo do plantio direto, fomentando o transporte de sedimentos pela erosão laminar e linear. Destaca-se a necessidade da adoção de plantio direto em todas as propriedades, evitando o período de exposição do solo proveniente das culturas temporárias, visto que as características naturais do solo já implicam na fragilidade à erosão. Para a categoria de silvicultura o  $Fr$  registrado foi de 0,06 e para florestas foi de 0,14, destacando que são tipos de uso da terra que ocupam pequenas áreas da BHRSM (305 km<sup>2</sup> e 943 km<sup>2</sup>, respectivamente).

#### 4.2.8 Estradas

Mais de 56% das cabeceiras das FEL foram encontradas nas proximidades de estradas (0-600 m). Especificamente, 23% das cabeceiras foram encontradas na classe entre 0-200 m das estradas (Figura 7 B); 19% entre 201-400 m de distância das estradas e 14% das cabeceiras em uma faixa entre 401-600 m. Entre 600-1000 m, são encontrados cerca de 19% das cabeceiras com FEL. Acima de 1.000 m, aproximadamente 25% das FEL são presentes nas cabeceiras, demonstrando a pouca influência das estradas para o desenvolvimento da erosão linear em nessas porções prevalecendo, portanto, outros fatores ambientais como determinantes (e.g. declividade, hipsometria, curvatura da vertente e solos).



**Figura 9.** A - estrutura construída para o escoamento da precipitação em estrada secundária, justamente próxima à montante de voçoroca; B - erosão se desenvolvendo paralelamente a cerca para contenção do gado; C - FEL ligada a reservatório, em canal de primeira ordem; D e E - FEL se desenvolvendo em área de campo (a seta em vermelho indica caminho percorrido pelo gado, compactação do solo e concentração de escoamento superficial); F – Caminho criado pelo gado na margem de uma voçoroca, contribuindo para o abatimento de degrau. Imagens A e C foram adquiridas com drone Mavic Air Pro.

Em campo é possível observar que em alguns pontos das rodovias e estradas secundárias ocorrem cabeceiras com FEL, resultantes da concentração do fluxo das águas pluviais em canaletas ou canais de escoamento (Figura 9 A), enquanto também se observa que a própria erosão remontante ocorre nessa regressão das cabeceiras de vales, até o ponto da estrada. Sendo assim, pode afetar o tráfego dos moradores, conforme observado no município de Cacequi (RS), onde foi encontrada uma demarcação de “cuidado” na estrada em função da grande voçoroca formada na porção marginal (29°58'37.21"S; 54°37'2.48"O).

Ademais, conforme exposto por Poesen (1993) e Augustin e Aranha (2006) outros elementos lineares podem influenciar na formação de fluxos concentrados como fronteiras de lotes, cercas (Figura 9 B) e caminhos percorridos pelo gado (Figura 9 D, E e F), principalmente porque as FEL se desenvolvem predominantemente em áreas de campo, de acordo com a seção anterior.

## 5. Conclusões

Quanto ao método, destaca-se que apesar de ser extremamente demorado, levando meses entre o processo de vetorização e avaliação em campo, houve resultados significativos devido à escala espacial de detalhe atingida. Portanto, ressalta-se que as chaves de interpretação baseadas em textura, tonalidade, reflectância e posição na paisagem são fundamentais para garantir a acurácia do mapeamento, aliando assim as observações de campo ao geoprocessamento.

Destaca-se que os processos erosivos na BHRSM são associados aos tipos de rochas presentes na área, com substrato arenoso pouco consolidado, configurando um processo natural, conforme mostrado na seção sobre geologia e solos. Além do condicionante litoestrutural, por meio do desenvolvimento de FEL em porções de fraturas geológicas, observa-se que há uma associação com a energia de relevo ao fomentar o aumento da velocidade de escoamento hídrico sobre arenitos friáveis. A energia de relevo para a incisão dos fluxos hídricos é preponderante quando se discute a relação com o solo, visto que a força da percolação da água acaba causando processos de dismantelamento dos solos, principalmente nas porções de média vertente. As porções com maior Fr estão relacionadas às declividades entre 5-15% e abaixo de 200 m de altitude.

Apesar de se tratar de um fenômeno natural, a presença humana acelera os processos erosivos. A presença do gado e a construção de cercas se mostraram como características determinantes para a ocorrência do processo erosivo linear, em porções da categoria de uso e ocupação denominadas campo, assim como as estradas concentram mais de 50% das FEL nas suas imediações (0-600 m). Ademais, as atividades agrícolas podem causar alterações no período de solo coberto, sazonalmente, e mudanças nos teores de nutrientes e matéria orgânica, diante da intensificação da transição do uso de campos para lavouras de soja. Verificou-se que a área ocupada por lavouras dobrou no período de 20 anos – quando comparado com a pesquisa de Scoti (2017) - configurando novas condições de uso e ocupação para a BHRSM, demandando monitoramento para os próximos anos visando acompanhar a adaptação dos sistemas hidrossedimentológicos a este novo cenário.

Como trabalhos futuros, sugere-se que ocorram investigações focadas na determinação do fator de erodibilidade dos solos para a BHRSM e na obtenção de dados geomorfométricos em escala de maior detalhe. Outrossim, considera-se uma valiosa contribuição científica, a continuidade desta pesquisa no que tange a realização da classificação somente das voçorocas para toda a BHRSM.

**Contribuições dos Autores:** Carina Petsch: Conceituação, Análise Formal, Aquisição de Financiamento, Pesquisa, Metodologia, Recursos, Validação, Redação; Anderson Augusto Volpato Scoti: Conceituação, Análise Formal, Pesquisa, Metodologia, Validação, Redação; Luís Eduardo de Souza Robaina: Análise Formal, Pesquisa, Metodologia, Redação; Romário Trentin: Análise Formal, Pesquisa, Metodologia, Redação.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (process 19/2551-0001234- 9).

**Conflito de Interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesse

## Referências

1. AMIRI, H.; POURGHASEMI, H. R.; GHANBARIAN, G. A.; AFZALI, S. F. Assessment of the importance of gully erosion effective factors using Boruta algorithm and its spatial modeling and mapping using three machine learning algorithms. *Geoderma*, v. 340, p. 55-69, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.12.042
2. AGHARAZI, H.; DAVIDDIRAD, A. A.; KHOSROBAGI, S.; SHADFAR, S.; NIKCHAH, S.; NAJIM, A. Gully erosion Sufficiency mapping at Robatturk Watershed (Iran) using an artificial neural network model. *International Journal of Computer Science and Network Security*, v. 17, n. 4, p. 14, 2017. DOI: 10.1080/19475705.2020.1753824
3. AGNESI, V.; ANGILERI, S.; CAPPADONIA, C.; CONOSCENTI, C.; ROTIGLIANO, E. Multi-parametric GIS analysis to assess gully erosion susceptibility: a test in southern Sicily, Italy. *Landforms Analysis*, v. 7, p. 15–20. 2011.
4. BATISTA, D. C. L.; VIEIRA, A. F. S. G.; MARINHO, R. R. Utilização do "Google Earth Pro" no mapeamento de voçorocas na área urbana de Manaus (AM), Brasil. *Geosaberes*, v. 10, n. 20, p. 1-12, 2018. DOI: 10.26895/geosaberes.v10i20.689
5. BOUCHNAK, H.; FELFOUL, M.S.; BOUSSEMA, M. R.; SNANE, M. H. Slope and rainfall effects on the volume of sediment yield by gully erosion in the Souar lithologic formation (Tunisia), *CATENA*, v. 78, n. 2, p. 170-177, 2009. DOI: 10.1016/j.catena.2009.04.003.
6. BONHAM CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Oxford: Pergamon, 1994, 391 p.
7. BOARDMAN, J. The value of Google Earth™ for erosion mapping, *CATENA*, v. 143, p. 123-127, 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.03.031.
8. BRAGA, L.; FERREIRA, R. S.; UAGODA, R. Mapeamento de feições erosivas e análise dos fatores controladores da erosão na bacia hidrográfica do Ribeirão Contagem-DF. *Espaço & Geografia*, v. 20, n. 1, 2017.
9. CABRAL, T. L.; NUMMER, A. V.; BATEIRA, C. V. de M. Indicadores morfométricos como suporte para a classificação de voçorocas em sub-bacias hidrográficas no município de Cacequi, RS. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.21, n.1, p.139-154, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i1.1670
10. CASTRO, U. N.; NEVES, S. R. A.; SILVA, L. F. T. C.; MENDES, S. P. M.; GUERRA, A. J. T. Mapeamento de feições erosivas e cicatrizes de escorregamento por unidades de relevo na sub-bacia do rio Sana (Macaé – RJ). *Revista de Geografia*. v. especial VIII SINAGEO, n. 3, 2010. DOI: 10.51359/2238-6211.2010.228896
11. CONFORTI, M.; AUCELLI, P.P.C.; ROBUSTELLI, G.; SCARCIGLIA, F. Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy). *Natural Hazards*, v. 56, p. 881–898, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9598-2>
12. CUI, P.; LIN, Y.; CHEN, C. Destruction of vegetation due to geo-hazards and its environmental impacts in the Wenchuan earthquake areas. *Ecological Engineering*, v. 44, p. 61–69, 2012. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.03.012
13. DESPRATS, J.; RACLOT, D.; ROUSSEAU, M.; CERDAN, O.; GARCIN, M.; LE BISSONNAIS, Y.; BEN SLIMANE, A.; FOUCHÉ, J.; MONFORT-CLIMENT, D. Mapping linear erosion features using high and very high resolution satellite imagery. *Land Degradation & Development*, v. 24, p. 22-32, 2013: DOI: 10.1002/ldr.1094
14. EL MAAOUI M.A.; FELFOUL M. S.; BOUSSEMA M.R; SNANE, M.H. Sediment yield from irregularly shaped gullies located on the Fortuna lithologic formation in semi-arid area of Tunisia. *CATENA*, v. 93, p. 97–104, 2012. DOI: 10.1016/j.catena.2012.02.004
15. ESPER ANGLIERI, M. Y. Debris flow susceptibility mapping in a portion of the Andes and Preandes of San Juan, Argentina using frequency ratio and logistic regression models. *Earth Sciences Research Journal*, v. 17, n. 2, p. 159-167, 2013.
16. Esri Inc. ArcMap (versão 10.4.1). Redlands, Estados Unidos, 2016.
17. GHERSA C.M., FERRARO D.O., OMACINI M., MARTÍNEZ-GHERSA M.A., PERELMAN S., SATORRE E.H., SORIANO A. Farm and landscape level variables as indicators of sustainable land-use in the Argentine Inland-Pampa. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 93, n. 44199, p. 279-293. 2002. DOI: 10.1016/S0167-8809(01)00351-6.
18. HASENACK, H.; WEBER, E. **Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul. Escala 1:50.000**. Porto Alegre: UFRGS, 2010.
19. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de recursos naturais (Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim). 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1986
20. KARYDAS, C.; PANAGOS, P. Towards an Assessment of the Ephemeral Gully Erosion Potential in Greece Using Google Earth. *Water*, v. 12, n. 2, p. 603, 2020. DOI: 10.3390/w12020603

21. KNIERIN, I. da SILVA; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. de S. Relação dos processos erosivos lineares com os atributos do relevo no município de Unistalda - RS. **GeoUERJ**, n. 32, p. e23397, 2018. DOI: 10.12957/geouerj.2018.23397
22. LIU, K.; DING, H.; TANG, G.; NA J.; HUANG, X.; XUE, Z.; YANG, X.; LI, F. Detection of Catchment-Scale Gully-Affected Areas Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on the Chinese Loess Plateau. **ISPRS International Journal of Geo-Information**. v.5 (12), p. 238, 2016. DOI: 10.3390/ijgi5120238
23. LOPES, F. B. L.; ANDRADE, E. M.; TEIXEIRA, A. S.; CAITANO, R. F.; CHAVES, L. C. G. Uso de geoprocessamento na estimativa da perda de solo em microbacia hidrográfica do semiárido brasileiro. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 5, n. 2, p. 88-96, 2011.
24. LUCÀ, M. CONFORTI, G. ROBUSTELLI. Comparison of GIS-based gullying susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. **Geomorphology**, 134 (2011), pp. 297-308. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.07.006
25. MANNIGEL, A. R.; CARVALHO, M. P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002. DOI: 10.4025/actasciagron.v24i0.2374
26. MATHIAS, D. T.; LUPINACCI, C. M.; NUNES, J. O. R. Identificação dos fluxos de escoamento superficial em área de relevo tecnogênico a partir do uso de modelos hidrológicos em SIG. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 820-831, 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-49431
27. MENÉNDEZ-DUARTE, R.; MARQUÍNEZ, J.; FERNÁNDEZ-MENÉNDEZ, S.; SANTOS R. Incised channels and gully erosion in Northern Iberian Peninsula: Controls and geomorphic setting, **CATENA**, v. 71, n. 2, p. 267-278, 2007, DOI: 10.1016/j.catena.2007.01.002
28. MENGUE, V. P.; FREITAS, M. W. D.; SILVA, T. S.; FONTANA, D. C.; SCOTTÁ, F.C. LAND-USE and land-cover change processes in Pampa biome and relation with environmental and socioeconomic data. **Applied Geography**, v. 125, p. 1-12, 2020. DOI: 10.1016/j.apgeog.2020.102342.
29. MONTANARELLA, L. et al; World's soils are under threat. **Soil**, n. 2. 2016. DOI: 10.5194/soil-2-79-2016.
30. OLIVEIRA, B. E. N.; MATRICARDI, E. A. T.; CHAVES, H. M. L.; BIAS, E. S. Identificação dos processos erosivos lineares no Distrito Federal através de fotografias aéreas e geoprocessamento. **Geociências**. v. 32, n. 1, 2013.
31. POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **CATENA**, v. 91 p. 91-133,2003. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00143-1
32. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System (versão 3.4). 2021. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>.
33. RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. de S. Relação das variáveis ambientais com os processos erosivos no município de Cacequi, Rio Grande do Sul. **Revista Geoaraguaia**. v. 8 n. 2, 2018.
34. RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. de S. **Relação do substrato litológico com os processos erosivos no município de Cacequi, Rio Grande do Sul**. In: Peres Filho, A.; AMORIM, R. R. (org.). Campinas: UNICAMP - XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física. 2017, p. 6545-6549, DOI: 10.20396/sbgfa.v1i2017.2575
35. RAHMATI, O.; HAGHIZADEH, A.; POURGHASEMI, H.R.; NOORMOHAMADI, F. Gully erosion susceptibility mapping: the role of GIS-based bivariate statistical models and their comparison. **Natural Hazards**, v. 82, p. 1231-1258, 2016. DOI: 10.1007/s11069-016-2239-7
36. RAJESH B.V.; SHRUTHI, N. K.; JETTEN, V.; STEIN, A. Object-based gully system prediction from medium resolution imagery using Random Forests. **Geomorphology**, v. 216, p. 283-294, 2014. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.04.006
37. RAZAVI-TERMEH, S. V.; SADEGHI-NIARAKI, A.; CHOI, S. Gully erosion susceptibility mapping using artificial intelligence and statistical models. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 11:1, p. 821-844, 2020. DOI: 10.1080/19475705.2020.1753824
38. ROBAINA, L. E. de S.; FERNANDES NETO, S.; PAULA, P. M.; PEREIRA, V. P. Processo erosivo acelerado no RS: voçorocamento no município de Cacequi. **GEOGRAFIA**, v. 27, n.2, p. 109-120, 2002.
39. ROBAINA, L.E.S.; TRENTIN, R.; BAZZAN, T.; RECKZIEGEL, E.W.; VERDUM, R.; DE NARDIN, D. Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: proposta de classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.11, n.2, p.11-23, 2010. DOI: 10.20502/rbg.v11i2.148
40. ROBAINA, L.E.S.; TRENTIN, R. Estudo das erosões lineares profundas e o uso do solo na bacia do rio Ibicuí/RS. In: BERRETA, M.S.R.; LAURENT, F. (ed.) **Mudanças nos sistemas agrícolas e territórios no Brasil**. 1ª Ed. Porto Alegre - RS: Uergs, Université Le Mans, 2019. p. 178-2005. DOI: 10.21674/9788560231.178-205
41. ROBAINA, L.E.S.; TRENTIN, R.; LAURENT, F.; SCCOTI, A. A. V. Zoneamento morfológico da bacia hidrográfica do rio ibicuí e sua relação com processos superficiais e o uso do solo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 1, p. 63-77, 2015. DOI: 10.20502/rbg.v16i1.630
42. ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011. 240p.

43. SARTORI, M., PHILIPPIDIS, G., FERRARI, E., BORRELLI, P., LUGATO, E., MONTANARELLA, L., PANAGOS, P. A linkage between the biophysical and the economic: Assessing the global market impacts of soil erosion. *Land Use Policy*, v. 86, p. 299-312, 2019. DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.05.014
44. SCCOTI, A. A. V. **Zoneamento geoambiental da bacia hidrográfica do rio Ibicuí da Armada-RS: potencialidades e suscetibilidade**. (Mestrado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2015.
45. SCCOTI, A. A. V. **Estudo e zoneamento geoambiental com auxílio de sig na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria: sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017. 153p.
46. SHRUTHI, R.B.B.; KERLE, N.; JETTEN, V.; ABDELLAH, L.; MACHMACH, I. Quantifying temporal changes in gully erosion areas with object oriented analysis, *CATENA*, v. 128, p. 262-277, 2015. DOI: 10.1016/j.catena.2014.01.010
47. SILVA, A. M.; ALVARES, C. A. Levantamento de informações e estruturação de um banco dados sobre a erodibilidade de classes de solos no estado de São Paulo. *Geociências*, v. 24, n. 1, p. 33-41, 2005.
48. SOUZA, N.C.; PITOMBO, C. CUNHA, A.L.; LAROCCA, A.P.C.; ALMEIDA FILHO, G.S. Modelo de classificação de processos erosivos lineares ao longo de ferrovias através de algoritmo de árvore de decisão e geotecnologias. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 23, n. 1, p.72 - 86, 2017. DOI: 10.1590/S1982-21702017000100005
49. STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S.. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 222 p.
50. SVORAY, T. MICHAÏLOV, E. COHEN, A. ROKAH, L. STURM. A. Predicting gully initiation: comparing data mining techniques, analytical hierarchy processes and the topographic threshold. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 37 (6), p. 607-619. 2012. DOI: 10.1002/esp.2273
51. TRENTIN, R.; ROBAINA, L.E.S.; SILVEIRA, C. T. Compartimentação geomorfométrica da bacia hidrográfica do rio Itú/RS. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.16, n.2, p.219-237, 2015. DOI: 10.20502/rbg.v16i2.460
52. VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. *CATENA*, v. 63, p. 132-153, 2005. DOI: 10.1016/j.catena.2005.06.001
53. VANWALLEGHEM, T.; POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. *Geomorphology*, v. 69, p. 76-91, 2005. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.12.003
54. VIGLIZZO, E. F.; FRANK, F. C.; CARREÑO, L.V.; JOBBÁGY, E. G.; PEREYRA, H.; CLATT, J.; PINCÉN D.; RICARD M. F. Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*, v. 17, n. 2, p. 959-973. 2011. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02293.
55. VRIELING, A. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *CATENA*, v. 65, n. 1, p. 2-18, 2006. DOI: 10.1016/j.catena.2005.10.005
56. WEI, S.C.; ZHANG, X.P.; MCLAUGHLIN, N.B.; CHEN, X.W.; JIA, S.X.; LIANG, A.Z.; Impact of soil water erosion processes on catchment export of soil aggregates and associated SOC. *Geoderma*, v. 294, p. 63-69, 2017. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.01.021
57. WILDNER, W; RAMGRAG, G. E.; LOPES R. C.; IGLESIAS, C. M. F. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Escala 1:750000. CPRM, Serviço Geológico do Brasil. Porto Alegre, RS. 2006.
58. YAN, L. J.; YU, X. X.; LEI, T.W; ZHANG. Q. W.; QU, L. Q. Effects of transport capacity and erodibility on rill erosion processes: a model study using the Finite Element method. *Geoderma*, v. 146, p. 114-120, 2008. DOI: 10.1016/j.geoderma.2008.05.009
59. ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; APPI, V. T.; NETO, E. V. S.; CERQUEIRA, J. R.; MARQUES, A. The Paraná Basin, Brazil. In : LEIGHTON, M. W.; KOLATA, D. R.; OLTZ, D. F.; EIDEL, J. J. **Interior cratonic basins**. Tulsa, Okla.: American Association of Petroleum Geologists, 1990, p. 681-708. (American Association of Petroleum Geologists). Memoir, 51.
60. ZANATTA, F. A. S.; LUPINACCI, C. M.; BOIN, M. N. O uso da terra e alterações do relevo na alta bacia do ribeirão Areia Dourada, Marabá Paulista (SP): um estudo a partir de princípios da Antropogeomorfologia. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. v. 16, n.1, p. 3-17, 2015. DOI: 10.20502/rbg.v16i1.560



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.