

## **Extração automatizada de lineamentos morfoestruturais relacionados a ocorrência de Voçorocas em sub-bacias no município de Cacequi - RS**

Von Ende Dotto, A. (UFSM) ; Krein Rademann, L. (UFSM) ; Trentin, R. (UFSM) ; de Souza Robaina, L.E. (UFSM)

### **RESUMO**

Este trabalho analisa os Lineamentos identificados sobre o Modelo Digital de Elevação com o objetivo de avaliar grandes estruturas tectônicas no terreno e relacionar com a existência de feições do tipo voçorocas. Identificou-se a orientação das voçorocas catalogadas utilizando a ferramenta Zonal Geometry as Table inserida na caixa de ferramentas de análise espacial do ArcGis 10.7.1. Usou-se o algoritmo Hillshade do ArcGis que cria um relevo sombreado a partir de um raster de superfície considerando o ângulo de inclinação e direção do sol e as sombras. Nesse sentido, optou-se pela definição de quatro ângulos azimutais para representar todas as direções da fonte de iluminação, sendo eles: 0 °, 45 °, 90 ° e 315 °. Os dados obtidos sugerem que há uma correlação entre a orientação dos lineamentos morfoestruturais e a distribuição das voçorocas, com uma maior incidência de erosões em áreas onde há uma maior concentração de lineamentos com orientação E-W, ENE e NNE.

### **PALAVRAS CHAVES**

*lineamentos morfoestruturais; voçorocas; orientação ; modelo digital de elevação; erosão*

### **ABSTRACT**

This work analyzes the Lineaments identified on the Digital Elevation Model in order to evaluate large tectonic structures on the ground and relate them to the existence of gully-type features. The orientation of cataloged gullies was identified using the Zonal Geometry as Table tool inserted in the spatial analysis toolbox of ArcGis 10.7.1. The ArcGis Hillshade algorithm was used, which creates a shaded relief from a surface raster considering the angle of inclination and direction of the sun and shadows. In this sense, it was decided to define four azimuthal angles to represent all directions of the light source, namely: 0 °, 45 °, 90 ° and 315 °. The data obtained suggest that there is a correlation between the orientation of the morphostructural lineaments and the distribution of gullies, with a higher incidence of erosion in areas where there is a greater concentration of lineaments with E-W, ENE and NNE orientation.

### **INTRODUÇÃO**

O mapeamento de lineamentos morfoestruturais busca a identificação de grandes estruturas tectônicas no terreno, como cristas, vales e escarpas alongadas. A realização destes mapeamentos é possível através da análise de imagens orbitais e de Modelos Digitais do Terreno, permitindo a identificação destas estruturas e compreensão da morfogênese e morfodinâmica de uma região. Lineamentos podem ser consideradas feições lineares topográficas ou tonais observáveis nas imagens, que podem representar descontinuidades estruturais (ETCHEBEHERE, SAAD e FULFARO, 2007). Mello e Ferrari (2003) destacam que a ocorrência de lineamentos pode originar formas de relevos diversificadas, como escarpas, deslocamentos de canais fluviais, basculamentos, subsidências, entre outros. Falhas e lineamentos geológicos também podem ser responsáveis pelo favorecimento da exposição de materiais mais suscetíveis a erosão causando um aumento do potencial erosivo, da intensidade das feições erosivas, bem como um controle na orientação preferencial destas feições (M. J. SELBY, 1993). Por sua vez, a erosão do solo é um dos principais problemas ambientais da atualidade, sendo um dos principais desencadeadores da degradação solo (ROBAINA e TRENTIN, 2004; LOUREIRO, 2019) tendo um grande impacto econômico (MORGAN, 2005; SARTORI et al., 2019) e ambiental (BERTONI E LOMBARDI NETO, 2012). São diversos os impactos da erosão do solo, tendo destaque para a perda de solo fértil, assoreamento dos rios,

redução da qualidade do cultivo agrícola e impactos na paisagem e estruturas antrópicas (MARDEN et al., 2018; POESEN et al., 2003). A erosão por voçorocamento é considerada a forma de erosão com o maior impacto ambiental, sinalizando um desequilíbrio ambiental, se desenvolvendo quando algum limite geomorfológico é transgredido (BERGONSE; REIS, 2016). O estudo desta forma de erosão é associado à diversos fatores geomorfológicos como o clima (MUÑOZ-ROBLES et al., 2010; PETSCH et al., 2022), litologia (DA SILVA et al., 2003), solo (KASANIN-GRUBIN; BRYAN, 2007; RAHMATI et al., 2017), relevo (GALETI, 1984; BURIAN; MITUSOV; POESEN, 2015), cobertura vegetal (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2012) e intervenções antrópicas (PARKNER et al., 2006; ZEGEYE et al., 2020). O município de Cacequi, localizado no oeste do estado do Rio Grande do Sul, tem sido alvo de diversos estudos sobre erosão devido a alta ocorrência de voçorocas em seu território (CABRAL, 2004, 2018; RADEMANN; TRENTIN, 2018). Um dos principais fatores apontados para a alta incidência de voçorocas nesta área é a ocorrência de rochas sedimentares de alta suscetibilidade à erosão, se concentrando as maiores voçorocas sobre os arenitos da Formação Pirambóia de sistema eólico (DIAS, 2021), na região leste do município, que são bastante friáveis e com poucos cimentantes (RODRIGUES, 2014). O arcabouço geológico e morfoestrutura podem interferir na forma, intensidade e orientação das voçorocas em Cacequi, sendo que a hipótese de neotectônica como um dos desencadeadores dos grandes processos de voçorocamento foi investigada por Cabral et al. (2009) na área do município que compreende as bacias Sanga Areal da Limeira, Sanga da Tapera, Sanga da Vaca Velha e Arroio Areal Grande, totalizando uma área aproximada de 280km<sup>2</sup>. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar e caracterizar a orientação dos principais lineamentos morfoestruturais desta área e comparar com a ocorrência de voçorocas utilizando o banco de dados produzido por Cabral (2018).

## **MATERIAL E MÉTODOS**

A determinação da localização da área de estudo foi definida entre as bacias Sanga Areal da Limeira, Sanga da Tapera, Sanga da Vaca Velha e Arroio Areal Grande pois mesmo que haja ocorrência de voçorocas em outros setores do município, nessas bacias existe concentração de voçorocas nesse local que possibilita a delimitação de uma área de estudo com maior enfoque nesses processos erosivos. Dessa forma, a base de feições erosivas presentes na área de estudo, foi obtida pelo levantamento de voçorocas elaborado por Cabral (2018) a qual identificou essas incisões a partir de chaves de interpretação de alvo nas imagens de satélite e verificação em campo. Após a posse do catálogo de voçorocas, para estimar a orientação dessas feições, aplicou-se a ferramenta Zonal Geometry as Table inserida na caixa de ferramentas de análise espacial do ArcGis 10.7.1 que calcula as medidas de geometria (área, perímetro, espessura e as características da elipse) para cada zona do shapefile em um conjunto de dados e relata os resultados em formato tabular. Para a extração de lineamentos morfoestruturais, primeiramente, obteve-se uma um Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 30 metros (1 arc- second) proveniente da Missão Topográfica Radar Shuttle disponibilizada pelo site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Em seguida, usou-se o algoritmo Hillshade do ArcGis que cria um relevo sombreado a partir de um raster de superfície considerando o ângulo de inclinação e direção do sol e as sombras. Nesse sentido, optou-se pela definição de quatro ângulos azimutais para representar todas as direções da fonte de iluminação, sendo eles: 0 °, 45 °, 90 ° e 315 °. Através do módulo Line no software PCI Geomatica, é possível a detecção automática de feições lineares a partir do uso de diferentes valores atribuídos aos parâmetros de detecção de bordas, configuração de limiares e extração de curva. Assim, foi gerado os lineamentos do relevo sombreado para o perímetro da área de ocorrência das voçorocas e filtrado os resultados que eram sobrepostos. A orientação dos lineamentos foi estabelecida pelo mesmo procedimento para as direções das voçorocas. As orientações de cada feição são expressas em uma variação angular entre 0 e 180°. Assim, foram classificadas 6 orientações para as voçorocas e lineamentos definidos como: E-W, ENE-WSW, NNE - SSW, N - S, NNW- SSE, WNW - ESE.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A área de trabalho está sobre o substrato da Formação Pirambóia que apresenta características petrográficas como textura, composição granulométrica e estrutura que indicam suscetibilidade a processos erosivos. O substrato geológico da região de interesse é formado por rochas sedimentares

em que predominam arenitos muito-finos a finos, siltosos, brancos, com seleção regular e estratificações cruzadas acanaladas de baixo ângulo e sigmoidas (sets entre 1 e 3 m), além de estratificações e laminações plano-paralelas. A grande maioria dos arenitos da Formação Pirambóia apresenta-se friável e com alta porcentagem de porosidade, podendo alcançar a 35% (Caetano e Chang, 1997; STRUGALE et al., 2004). A alta porosidade dessas rochas pode ser explicadas a partir do trabalho de Gesiki (2007), que define a Formação Pirambóia de arcabouço aberto e feições de compactação física e química pouco a moderadamente eficiente. As rochas sedimentares com esse tipo de compactação podem apresentar características como uma porosidade mais elevada, uma menor densidade e resistência mecânica, e com alto grau de suscetibilidade erosiva sendo o embasamento rochoso da área caracterizado pela formação de blocos estruturais, que são definidos por um conjunto de planos de falha e fraturas que os limitam e associados a zonas de cisalhamento. Com a extração de lineamentos automatizada e o refinamento manual desse resultado, eliminação de dados redundantes, compreendeu-se uma totalidade de 568 lineamentos morfoestruturais na região de ocorrência das voçorocas nas bacias Sanga Areal da Limeira, Sanga da Tapera, Sanga da Vaca Velha e Arroio Areal Grande em Cacequi. Essas feições lineares estão associadas, em sua maioria, com lineamentos encaixantes na rede de drenagem e nas direções de encostas dissecadas nos topos de colinas. Verifica-se na Figura 02, a distribuição dos lineamentos sobrepostos às voçorocas que estão distribuídas no setor médio e alto das bacias hidrográficas compostas por erosões em estágio avançado identificado pelo formato ramificado nas cabeceiras dos cursos hídricos. Em voçorocas que são conectadas ao sistema de drenagem o número de lineamentos é mais elevado, principalmente em áreas a montante das bacias, que apresenta uma alta densidade nos traços. Pela tabela 1, pode-se observar que as voçorocas têm uma distribuição mais expressiva em direção E-W (leste-oeste), com 77 casos (25,5% do total), seguida por ENE (leste-nordeste) com 59 casos (19,7%), NNE (norte-nordeste) com 48 casos (16,1%) e N-S (norte-sul) com 32 casos (10,4%). Concomitantemente com a maioria das voçorocas, os lineamentos morfoestruturais mais frequentes estão orientados em direção E-W com 144 casos (25,3%). Em seguida, a orientação NNE apresenta 111 casos (19,5%), N-S com 104 casos (17,5%), NNW com 92 casos (15,2%), e WNW com 57 casos (10%). Esta orientação preferencial também foi encontrada no trabalho de Trentin et al. (2023), que levantou os lineamentos da Bacia do Rio Ibicuí, na qual Cacequi está inserido. Os autores salientam que as orientações NNE e E-W estão associadas ao soerguimento do arco de Rio Grande e as direções estruturais geradas durante a ruptura continental. Esses dados quantitativos sugerem que há uma relação entre a orientação dos lineamentos morfoestruturais e a distribuição das voçorocas, com uma maior incidência de erosões em áreas onde há uma maior concentração de lineamentos com orientação E-W, ENE e NNE. Dessa forma, pode ser considerado que essas áreas possuem forte controle estrutural que influenciam no comportamento do escoamento subsuperficial e a estabilidade das vertentes que condicionam o voçorocamento. É possível constatar que a orientação estrutural está relacionada com a orientação preferencial das voçorocas (Tabela 1). O escoamento superficial preferencial e fragilidade erosiva do material das encostas decorrente de falhas e lineamentos coincidem com o desenvolvimento do canal principal das voçorocas. Esta relação pode não se repetir no desenvolvimento das ramificações laterais das voçorocas, sendo necessários estudos em nível de detalhe maior estabelecer esta relação.

*Figura 01 - Mapa de Localização da área de estudo.*

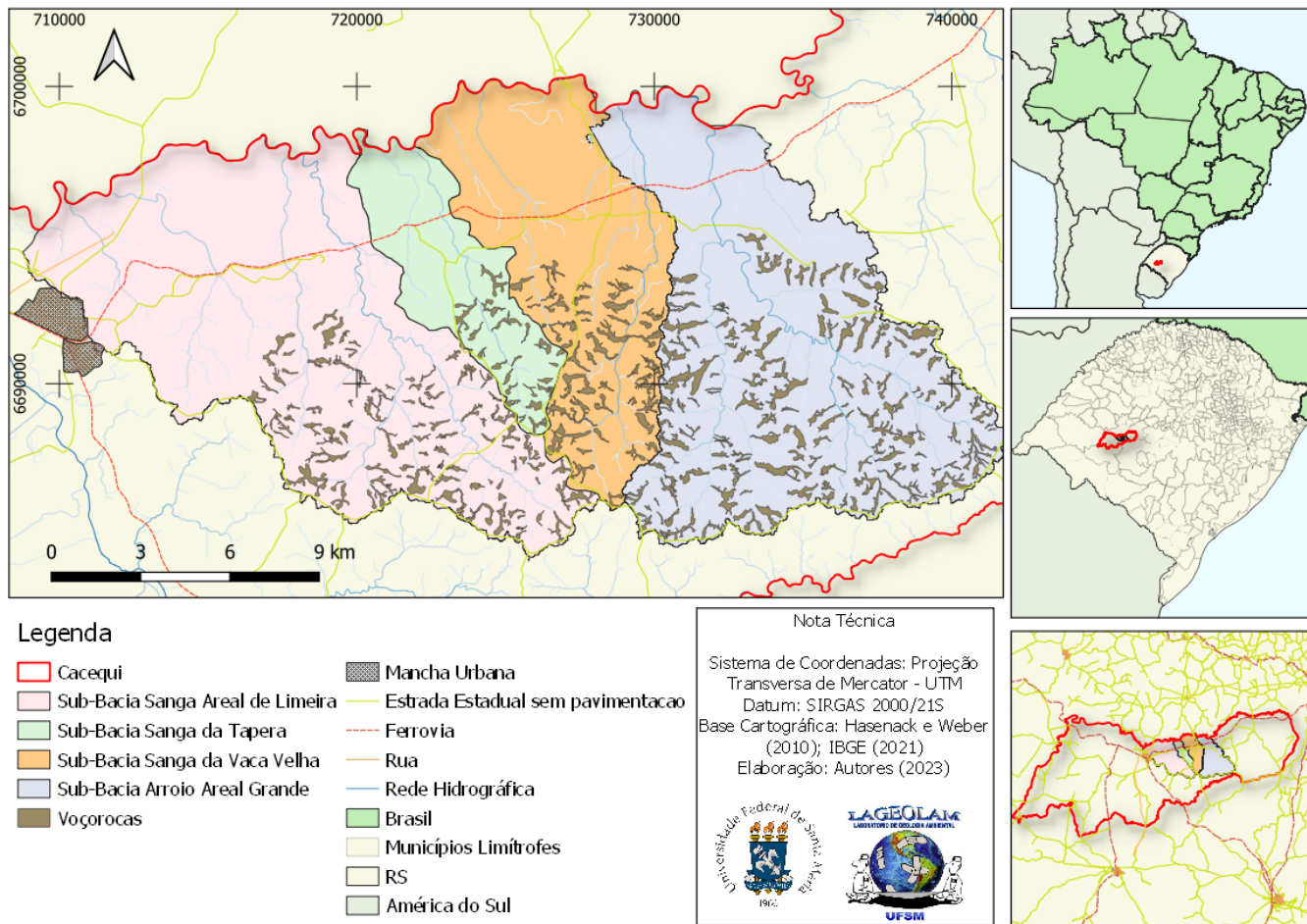
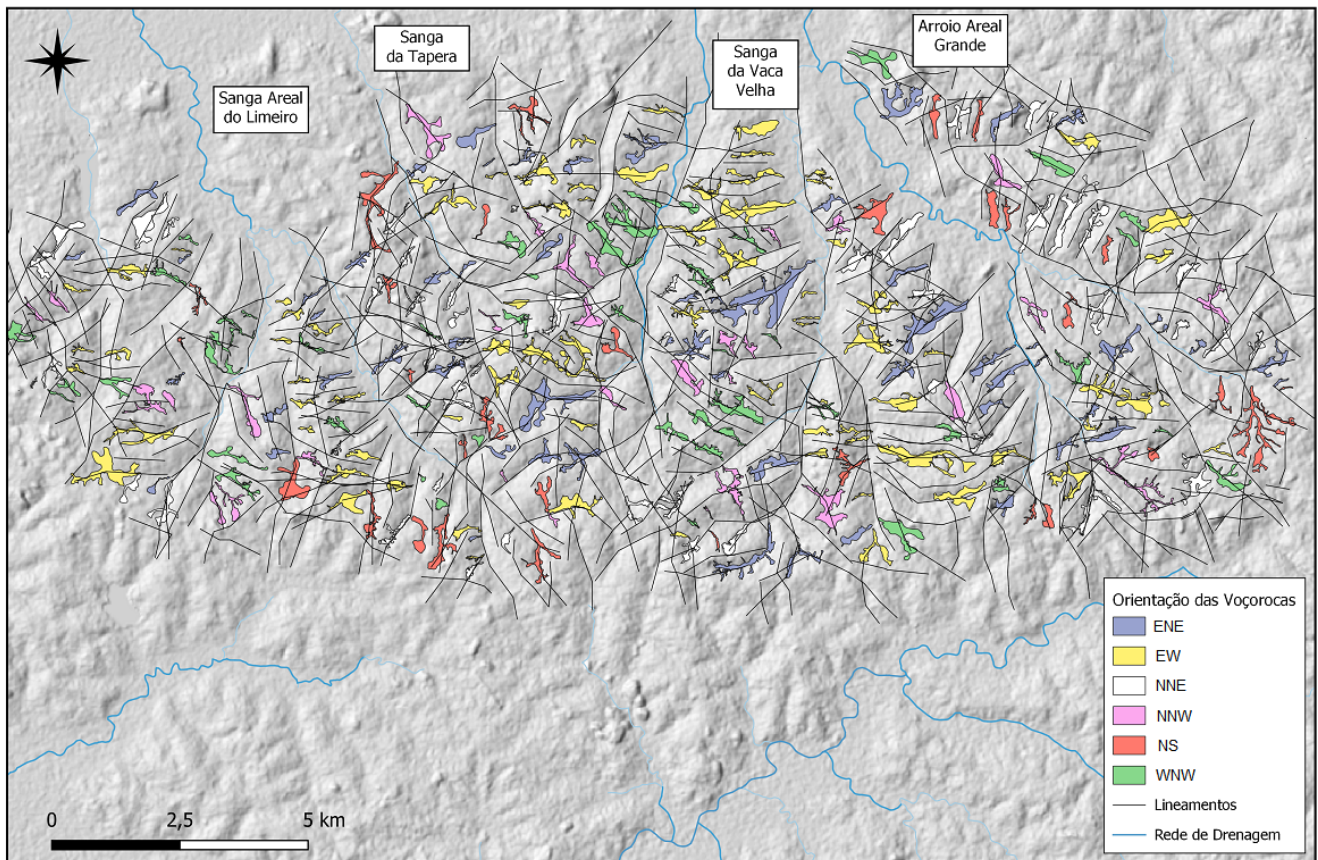


Tabela 01 - Orientação dos lineamentos e voçorocas.

<b>ORIENTAÇÃO</b>	<b>VOÇOROCAS</b>	<b>LINEAMENTOS</b>
<b>E-W</b>	77 (25,5%)	144 (25,3%)
<b>ENE</b>	59 (19,7%)	71 (12,4%)
<b>NNE</b>	48 (16,1%)	111 (19,5%)
<b>N - S</b>	32 (10,4%)	104 (17,5%)
<b>NNW</b>	33 (11%)	92 (15,2%)
<b>WNW</b>	49 (16,4%)	57 (10%)

Figura 02 - Lineamentos Morfoestruturais sobrepostos a Voçorocas nas s





## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de novas técnicas para os estudos geomorfológicos a partir de geotecnologias possibilitam uma maior praticidade na obtenção de informações geoespaciais. A extração automatizada de lineamentos morfoestruturais apresentou um resultado de feições satisfatórias e coerentes com as características fisiográficas da área de estudo. A orientação das voçorocas levantadas por Cabral (2018) coincide com a orientação dos lineamentos morfoestruturais em direção predominantemente Leste- Oeste. Logo, o controle estrutural e geológico são fatores condicionantes para a gênese e evolução das incisões erosivas presentes na área de estudo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, CNPQ e a FAPERGS pelo apoio financeiro a realização do trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

BERGONSE, R.; REIS, E. Controlling factors of the size and location of large gully systems: A regression-based exploration using reconstructed pre-erosion topography. *CATENA*, v. 147, p. 621-631, dez. 2016.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. São Paulo: Ícone, 8ª ed., 2012.

BURIAN, L.; MITUSOV, A. V.; POESEN, J. Relationships of attributes of gullies with morphometric variables. *Geomorphometry*, 2015.

CABRAL, I. DE L. L. DEPRESSÕES INTERFLUVIAIS E VOÇOROCAS ARTICULADAS À REDE DE DRENAGEM: O EXEMPLO DAS BACIAS DOS RIOS IBICUIZINHO, AREAL DO PAREDÃO, CACEQUI, SANTA MARIA E IBICUÍ. São Paulo, p. 201, 2004.

CABRAL, I. L. L.; PRADO, R. J.; CABRAL, T. L. Indicadores morfodinâmicos que sugerem movimentos neotectônicos no divisor de águas dos rios Ibicuí/Jacuí - depressão periférica-RS. XII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. Anais... La Plata, 2009.

CABRAL, T. L. Distribuição e classificação de voçorocas por meio de indicadores morfométricos em sub-bacias no município de Cacequi - RS. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T. A Formação Pirambóia na região de Anhembi (SP), com base em dados de subsuperfície. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 3, 1993, Rio de Janeiro. Boletim de Resumos... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1993, p. 74. (b).

DA SILVA, T. P. et al. A influência de aspectos geológicos na erosão linear - médio-baixo vale do Ribeirão do Secretário, Paty do Alferes (RJ). Geosul, v. 18, n. 36, p. 20, 2003.

DIAS, D. F. Utilização da análise hierárquica ponderada para os estudos dos processos erosivos lineares na bacia hidrográfica do Rio Ibicuí - RS. Tese de Doutorado—Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2021.

ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R.; FULFARO, V. J. Análise de bacia aplicada à prospecção de água subterrânea no planalto ocidental paulista, SP. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 26, n. 3, p. 229-247, 2007.

GESICKI, Ana Lúcia Desenzi. Evolução diagenética das formações Pirambóia e Botucatu (sistema aquífero Guarani) no Estado de São Paulo. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

KASANIN-GRUBIN, M.; BRYAN, R. Lithological properties and weathering response on badland hillslopes. CATENA, v. 70, n. 1, p. 68–78, jun. 2007.

LOUREIRO, H. A. S. Diagnóstico de erosão por voçorocas: experimentos com geotecnologias e solos na bacia do Alto rio Piraí - Rio Claro-RJ. Tese de Doutorado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

M. J. SELBY. Hillslope materials and processes. Second Edition ed. New York, NY: Oxford University Press, 1993.

MARDEN, M. et al. Badass gullies: Fluvio-mass-movement gully complexes in New Zealand's East Coast region, and potential for remediation. Geomorphology, v. 307, p. 12–23, abr. 2018.

MELLO, C. L.; FERRARI, A. L., Neotectônica. Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Apostila do curso de Neotectônica 9. 2003.

MORGAN, R. P. C. Soil erosion and conservation. 3rd ed ed. Malden, MA: Blackwell Pub, 2005.

MUÑOZ-ROBLES, C. et al. Factors related to gully erosion in woody encroachment in south-eastern Australia. CATENA, v. 83, n. 2–3, p. 148–157, nov. 2010.

PARKNER, T. et al. Development and controlling factors of gullies and gully complexes, East Coast, New Zealand. Earth Surface Processes and Landforms, v. 31, n. 2, p. 187–199, fev. 2006.

PETSCH, C. et al. Erosividade da bacia hidrográfica do rio Santa Maria (RS): tendências e espacialização. Boletim de Geografia, v. 39, p. 348–368, 24 fev. 2022.

POESEN, J. et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *CATENA*, v. 50, n. 2-4, p. 91-133, jan. 2003.

RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R. RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS COM OS PROCESSOS EROSIVOS NO MUNICÍPIO DE CACEQUI, RIO GRANDE DO SUL. *Revista Georaguaia*, p. 17, 2018.  
RAHMATI, O. et al. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*, v. 298, p. 118-137, dez. 2017.

ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; Degradação dos solos: Problema ambiental no Sudoeste Gaúcho. *Interface*, Porto Nacional, TO. v.1, n.1, p. 29-41, maio 2004.  
RODRIGUES, A. D. Caracterização faciológica e estratigráfica dos depósitos flúvio-eólicos da Formação Pirambóia, permo-triássico da bacia do Paraná, oeste do Rio Grande do Sul. Mestrado em Geociências—Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

SARTORI, M. et al. A linkage between the biophysical and the economic: Assessing the global market impacts of soil erosion. *Land Use Policy*, v. 86, p. 299-312, jul. 2019.

STRUGALE, Michael et al. Compartimentação estrutural das Formações Pirambóia e Botucatu na região de São Jerônimo da Serra, estado do Paraná. *Brazilian Journal of Geology*, v. 34, n. 3, p. 303-316, 2008.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S.; RADEMANN, L. K. Extração automática de lineamentos morfoestruturais na bacia do rio Ibicuí, RS. In... XIX Simpósio Brasileiro de Geografia Física. Rio de Janeiro, 2023.

ZEGEYE, A. D. et al. Bank stability and toe erosion model as a decision tool for gully bank stabilization in sub humid Ethiopian highlands. *Ecohydrology & Hydrobiology*, v. 20, n. 2, p. 301-311, abr. 2020.