

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta dissertação
será disponibilizado somente a partir
de 11/03/2024.

**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

**ESTUDO DA EVOLUÇÃO DE VOÇOROCAS:
CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL E
SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

João Pedro Inacio Alves

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

Rio Claro - SP
2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"Júlio de Mesquita Filho"
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

JOÃO PEDRO INACIO ALVES

**ESTUDO DA EVOLUÇÃO DE VOÇOROCAS:
CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL E SIMULAÇÃO
NUMÉRICA**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Instituto de Geociências e Ciências
Exatas do Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista "Júlio de
Mesquita Filho", como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Mestre em Geociências e Meio
Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Eduardo
Hartwig

Rio Claro - SP
2023

A474e Alves, João Pedro Inacio
Estudo da evolução de voçorocas : caracterização
espaço-temporal e simulação numérica / João Pedro Inacio
Alves. -- Rio Claro, 2023
116 f. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Marcos Eduardo Hartwig

1. Erosão hídrica. 2. Modelagem numérica. 3. Voçoroca. 4.
Vertentes. 5. Espírito Santo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto potencial desta pesquisa

O solo é um dos recursos naturais mais importantes para a humanidade. Seu uso e ocupação adequados é um dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Para atingir estes objetivos é necessária a implementação de práticas de manejo que minimizem os impactos da erosão hídrica de vertentes. Portanto, este estudo contribui para o entendimento da gênese e evolução de voçorocas em encostas declivosas sustentadas por solos de alteração de gnaisses.

Potential impact of this research

Soil is one of the most important natural resources for humanity. Its appropriate use and occupation is one of the Sustainable Development Goals. To achieve these aims, it is of paramount importance to implement management practices that minimize the impacts of water erosion on soil slopes. Therefore, this study contributes to the understanding of the genesis and evolution of gullies on steep slopes formed by residual soils derived from gneissic rocks.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

JOÃO PEDRO INACIO ALVES

ESTUDO DA EVOLUÇÃO DE VOÇOROCAS:
CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL E SIMULAÇÃO
NUMÉRICA

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Instituto de Geociências e Ciências
Exatas do Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Mestre em Geociências e Meio
Ambiente.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Marcos Eduardo Hartwig
CCENS/UFES/Alegre (ES)

Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette
EESC/USP/São Carlos (SP)

Prof. Dr. Eberval Marchioro
CCHN/UFES/Vitória (ES)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro/SP, 11 de setembro de 2023

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - processo nº 161484/2021-2. Portanto, agradeço ao apoio financeiro do CNPq.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Rio Claro, pelo apoio institucional.

Ao meu orientador, professor Dr. Marcos Eduardo Hartwig, pelos seus valiosos ensinamentos e orientação durante o mestrado.

Ao professor Dr. Patrício José Moreira Pires, e aos membros do Laboratório de Geotecnia e Pavimentação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Campus de Goiabeiras, por contribuírem para a realização dos ensaios geotécnicos.

Ao professor Dr. Juan Alfredo Ayala Espinoza, que auxiliou a análise mineralógica.

Por fim, agradeço aos meus pais e familiares que sempre me apoiaram e incentivaram.

RESUMO

As voçorocas representam o estágio mais avançado do processo de erosão hídrica de encostas, podendo causar diversos problemas ambientais, econômicos e sociais. Compreender os processos responsáveis por sua evolução é de suma importância para a gestão e planejamento territorial de municípios. Neste estudo, realizou-se a caracterização de duas voçorocas desenvolvidas em uma encosta íngreme e avaliou-se a efetividade do modelo *Simulation of Water Erosion* (SIMWE) para simular a evolução de voçorocas. A área de estudos está localizada no município de Alegre, Estado do Espírito Santo. A metodologia compreendeu a descrição geológica de campo, amostragem do solo, realização de ensaios de caracterização mineralógica e geotécnica, sobrevoo de drone para a obtenção de um modelo digital do terreno (MDT) recente, análise morfométrica das voçorocas, análise de imagens históricas da área, e simulação da erosão. Em relação à simulação numérica, duas abordagens foram consideradas: um evento de chuva extremo e uma série temporal de eventos de chuva. Para o primeiro cenário, considerou-se ainda duas situações: topografia pré- e sin-voçoroca. Estimou-se que o volume total de solo erodido no período de 2007 a 2021 é superior ao de uma piscina olímpica, com uma taxa média de erosão da ordem de $198 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$. Especula-se que a ruptura dos terracetes seja um importante mecanismo de desenvolvimento das voçorocas na área de estudos. Os resultados sugerem que o horizonte A seja mais resistente a erosão, atuando como uma camada protetora dos horizontes subjacentes. A simulação do evento de chuva máxima para a topografia pré-voçoroca indicou áreas de maior potencial erosivo, mas não definiu quais dessas áreas possui maior potencial para a formação de voçorocas. Para a topografia sin-voçoroca, o modelo apresentou resultados parcialmente coerentes com as observações de campo. Portanto, a simulação para um único evento de chuva mostrou que o modelo pode auxiliar no entendimento do fluxo superficial atual da vertente, além de indicar áreas com maior potencial de erosão. Contudo, o modelo SIMWE aplicado para a série de eventos de chuva não demonstrou efetividade para simular a evolução espaço-temporal de voçorocas, apresentando propagação de erros e tempo de processamento excessivamente prolongado.

Palavras-chave: erosão hídrica; modelagem numérica; voçoroca; vertentes; Espírito Santo.

ABSTRACT

Gullies represent the most advanced stage of the process of water erosion on hillslopes, which can cause several environmental, economic and social impacts. Understanding the processes responsible for its evolution is of paramount importance for the management and territorial planning of municipalities. In this study, the characterization of two gullies developed on a steep slope was carried out, and the effectiveness of the SIMWE (Simulation of Water Erosion) model to simulate the gully evolution. The study area is located in the municipality of Alegre, State of Espírito Santo, Brazil. The methodology included field geological description, soil sampling, mineralogical and geotechnical tests, drone overflight to obtain a precise digital terrain model (DTM), morphometric analysis of gullies, analysis of historical satellite imagery, and simulation of erosion. Regarding the numerical simulation, two approaches have been considered: an extreme rain event and a rain time series. For the first, two conditions were considered: pre- and syn-gully erosion topography. It has been estimated that the total volume of eroded soil in the period from 2007 to 2021 is about the volume of an olympic swimming pool, with an erosion rate around $198 \text{ m}^3.\text{year}^{-1}$. It is speculated that rupture of terracettes are an important mechanism for gully erosion formation in the study area. The results suggest that the A horizon is less susceptible to erosion, acting as a protective layer of the underlying horizons. The simulation of the extreme rain event for the pre-gully topography indicated areas of greater erosion potential but did not define which of these areas has the greatest potential for the formation of gullies. For the syn-gully topography, the model presented results partially consistent with field observations. Therefore, the simulation for a single rain event showed that the model can help understand the current surface flow of the slope, in addition to indicating areas with greater erosion potential. However, the SIMWE model applied to the series of rain events did not demonstrate effectiveness in simulating the spatio-temporal evolution of gullies, presenting propagation of errors and excessively prolonged processing time.

Keywords: water erosion; numerical modelling; gully erosion; hillside; Espírito Santo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferenças entre um canal fluvial e uma voçoroca.	27
Figura 2 - (a) Alcova formada pela cachoeira resultante do fluxo concentrado em canal em forma de “V” que desce em queda livre para um canal mais profundo; e (b) duas alcovas formadas na cabeceira de uma voçoroca, onde o horizonte superficial do solo é mais suscetível à erosão. (fotografias coloridas digitalmente).	30
Figura 3 - Principais etapas do processo de migração da parede superior das voçorocas pela formação de alcovas e colapso do solo.	31
Figura 4 - Evolução temporal de uma voçoroca em uma encosta na cidade de Veľký Šariš (Eslováquia) com base no modelo SIMWE. Acima, variação da taxa efetiva de erosão-deposição ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Os valores negativos indicam erosão e os positivos deposição. Abaixo, variação na elevação (metros). Da esquerda para à direita, geração de degraus topográficos (<i>knickpoints</i>), migração do processo erosivo à montante e incisão do sulco e, finalmente, alargamento da voçoroca.	34
Figura 5 - Organograma dos dados de entrada e mapas de saída dos módulos r.sim.water e r.sim.sediment do modelo SIMWE.	35
Figura 6 - Organograma dos dados de entrada, principais processamentos e mapas de saída do módulo r.sim.terrain. MDT_{n-1} – modelo digital de terreno inicial; MDT_n – modelo digital de terreno ao final da iteração n; e n – número da iteração.	36
Figura 7 - Exemplo da distribuição de alguns pontos de amostragem (caminhantes) na área de estudos e seu deslocamento durante a simulação: (a) posição dos pontos após 1 min de simulação; (b) posição dos pontos após 3 min de simulação; e (c) posição dos pontos após 5 min de simulação.	37
Figura 8 - Localização da área de estudos, com indicação das voçorocas e locais de amostragem.	40
Figura 9 - Precipitação pluviométrica anual para o município de Alegre (estação pluviométrica A616 do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET) para o período de 2008 a 2021. A precipitação pluviométrica para o ano de 2020 não foi considerada devido a grandes lacunas na série de dados.	41
Figura 10 - Precipitação pluviométrica média mensal para o período de 2008 a 2021.	41
Figura 11 - Paisagem de “mares de morros” na região da área de estudos (vista para noroeste).	43

Figura 12 - Fluxograma metodológico.....	45
Figura 13 - Retirada de blocos indeformados com dimensão de 20x20x20 cm para a realização de ensaios geotécnicos: (a) amostragem do horizonte A; (b) amostragem do horizonte B; e (c) amostragem do horizonte C.	47
Figura 14 - Levantamento aerofotogramétrico: (a) calibração do drone e posicionamento para decolagem; e (b) execução do plano de voo.	48
Figura 15 - Perfil NW-SE da área de estudos, com indicação da altura do voo e o trecho da encosta sobrevoado pelo drone.	48
Figura 16 - Comparação de uma imagem da área de estudos antes e após processamento na ferramenta da plataforma PicWish.	50
Figura 17 - Ortofotomosaicos da área de estudos apresentados em perspectiva e com representação das curvas de nível: (a) ortofotomosaico do GEOBASES gerado no ano de 2007; e (b) ortofotomosaico gerado no ano de 2021 a partir das imagens de VANT.	51
Figura 18 - Erro médio e tempo de processamento em função do número de caminhantes.	53
Figura 19 - Precipitação pluviométrica excedente entre os anos de 2007 e 2021....	55
Figura 20 - Modelos Digitais de Terreno (MDTs): (a) MDT sin-voçoroca; e (b) MDT pré-voçoroca.	56
Figura 21 - Efeito da correção do MDT no resultado da modelagem numérica para um recorte da porção superior da voçoroca 2: MDT antes e após o preenchimento de vazios (acima) e valores de erosão/deposição correspondentes (abaixo) calculadas pelo modelo SIMWE. Os valores negativos (cores quentes) indicam erosão e os valores positivos (cores frias) indicam deposição.	57
Figura 22 - (a) Mapa da diferença da elevação entre as superfícies de 2007 (pré-voçoroca) e 2021 (sin-voçoroca). A linha tracejada indica a área em planta das voçorocas e a linha cheia indica o talvegue das voçorocas; (b) Mapa de declividade (graus); e (c) perfis dos talvegues das voçorocas com projeção da superfície pré- e sin-voçoroca.	60
Figura 23 - Feições observadas nas voçorocas durante as inspeções de campo: (a) alcovas e sulcos na parede superior da voçoroca 1; (b) alcovas com grandes dimensões na parte mais íngreme da voçoroca 2; (c) rachadura na parede lateral da voçoroca 2; (d) material produzido por movimento de massa preenchendo a calha da voçoroca 2, com destaque para os planos de foliação do horizonte C; e (e) material	

produzido por movimento de massa preenchendo a calha da voçoroca 2.	61
Figura 24 - Ortofotomosaico das voçorocas 1 e 2 antes e após a ocorrência de movimentos de massa provocados por precipitação.	62
Figura 25 - Recorte para a área de estudos da fotografia aérea produzida pelo Instituto Brasileiro do Café (IBC) no ano de 1970 (à esquerda) e a mesma fotografia melhorada e colorida digitalmente (à direita).	63
Figura 26 - Imagens de satélite e ortofotos aéreas da área de estudos capturadas em diferentes anos. V1 – voçoroca 1; V2 – voçoroca 2.	64
Figura 27 - Substrato litológico: (a) afloramentos no leito do Ribeirão Arraial do Café; (b) detalhe do feldspato-biotita-quartzo gnaiss milonitizado, apresentando bandamento centimétrico com porfiroclastos de k-feldspato; e (c) enclaves máficos rotacionados.	66
Figura 28 - Concentração de granada no paragnaisse na porção inferior da voçoroca 1.	67
Figura 29 - Geologia da encosta em perspectiva (acima) e em perfil (abaixo). Perfil geológico esquemático produzido conforme observações de campo.	68
Figura 30 - Horizontes do solo nas paredes das voçorocas: (a) parede lateral norte da porção superior da voçoroca 1; (b) parede lateral norte da porção intermediária da voçoroca 2; (c) parede lateral sul da porção inferior da voçoroca 2; e (d) parede superior (cabeceira) da voçoroca 2, com destaque para o horizonte C, apresentando forte heterogeneidade devido à foliação herdada da rocha de origem.	69
Figura 31 - Crostas ferruginosas presentes na porção superior da encosta: (a) solo argiloso apresentando crostas finas (< 5 mm) e duras; e (b) feições erosivas desenvolvidas sobre as crostas.	70
Figura 32 - Coluna geológica dos depósitos sedimentares: (a) talude do depósito de planície aluvial na margem do ribeirão; e (b) parede da trincheira escavada no depósito do cone de dejeção.	72
Figura 33 - Fração areia das amostras de solo dos horizontes A e B sob lupa binocular: (a) fração areia grossa do horizonte A; (b) fração areia fina do horizonte A, com destaque para a presença de quartzo subédrico; (c) fração areia fina do horizonte B; (d) fração areia média do horizonte A; e (e) fração areia média do horizonte B. Legenda: bt – biotita, cf – concreção ferruginosa, grt – granada, kfs – k-feldspato, mt – magnetita, ndl – nódulo, pl – plagioclásio, qtz – quartzo.	73
Figura 34 - Difratoograma de Raios-X da fração argila do horizonte A. Legenda: kao –	

caulinita e ill – illita.	75
Figura 35 - Diagrama de classificação textural de cada horizonte de alteração do solo.	76
Figura 36 - Curva de distribuição granulométrica dos horizontes A, B e C. Legenda: Ch – coeficiente de homogeneidade/uniformidade e Cc – coeficiente de curvatura.	77
Figura 37 - Fotografias do ensaio do torrão (<i>Crumb test</i>): (a) torrões do horizonte A; (b) torrões do horizonte B; e (c) torrões do horizonte C.	79
Figura 38 - Resultados da simulação do fluxo superficial da água para o evento de máxima precipitação: (a) mapa da altura da lâmina d'água no cenário pré-voçoroca; (b) mapa da altura da lâmina d'água no cenário sin-voçoroca; (c) mapa da vazão do fluxo d'água no cenário pré-voçoroca; e (d) mapa da vazão do fluxo d'água no cenário sin-voçoroca.	81
Figura 39 - Resultados da simulação do transporte de sedimentos e das taxas de erosão e deposição para o evento de máxima precipitação: (a) mapa do fluxo de sedimentos no cenário pré-voçoroca; (b) mapa do fluxo de sedimentos no cenário sin-voçoroca; (c) mapa da taxa de erosão-deposição efetiva no cenário pré-voçoroca; e (d) mapa da taxa de erosão-deposição efetiva no cenário sin-voçoroca.	82
Figura 40 - Altura da lâmina d'água sobreposta a ortofoto (à esquerda) e mapa da taxa de erosão-deposição (à direita) para o cenário sin-voçoroca com destaque para: (a) terço superior da encosta; (b) terço inferior da encosta e planície aluvial. Os círculos e elipses tracejadas indicam locais que a simulação apresentou compatibilidade com observações de campo. Os vermelhos indicam a presença de alcovas, os verdes indicam afloramentos de rocha alterada e os azuis indicam áreas de deposição de sedimentos	84
Figura 41 - Mapas da taxa de erosão-deposição estimada pelo modelo SIMWE para um recorte da série temporal de precipitação (à esquerda) e perfis transversais em uma área de convergência do fluxo (à direita). P_{exc} é a precipitação excedente utilizada em cada iteração.	86
Figura 42 - Mapa da diferença de elevação (cm) entre 2007 e 2021 estimada pelo modelo. A área hachurada corresponde as áreas que o modelo apresentou maiores problemas durante a simulação.	88
Figura 43 - Ravinas formadas ao longo das trilhas de gado ao lado da área de estudos.	91
Figura 44 - Terracetes rompidos na porção superior da área de estudos.	91

Figura 45 - Ilustração de como os terracetes poderiam induzir o processo erosivo no terço médio e inferior da encosta da área de estudos.....	92
Figura 46 - Esquema ilustrativo da evolução das voçorocas estudadas.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de entrada do modelo SIMWE no módulo r.sim.terrain.	52
Tabela 2 - Coeficientes de rugosidade n de Manning e de escoamento para cada tipo de cobertura de solo.....	54
Tabela 3 - Coeficientes determinados em função das características do solo.....	55
Tabela 4 - Parâmetros morfométricos das voçorocas para o ano de 2021.	59
Tabela 5 - Composição mineralógica da fração areia dos horizontes A e B.	72
Tabela 6 – Parâmetros dos horizontes A, B e C.....	77
Tabela 7 - Resultado do teste do torrão para as amostras de solo dos horizontes A, B e C.....	79

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AnnAGNPS	<i>Annualized AGricultural Non-point Source</i>
CHILD	<i>Channel-Hillslope Integrated Landscape Development</i>
CMGeo	Central Multiusuário Geoanalítica
DAEE/IPT	Departamento de Águas e Energia Elétrica/Instituto de Pesquisas Tecnológicas
DJI	<i>Dà-Jiāng Innovations Science and Technology</i>
DRX	Difração de Raios-X
EGEM	<i>Ephemeral Gullies Erosion Model</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUROSEM	<i>European Soil Erosion Model</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
GEOBASES	Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo
GERCA	Grupo Executivo de Racionalização da Cafeicultura
GRASS	<i>Geographic Resources Analysis and Support System</i>
GULTEM	<i>Gully Thermo-Erosion and Erosion Model</i>
IBC	Instituto Brasileiro do Café
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
IEMA	Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MAV	Método do Anel Volumétrico
MDT	Modelo Digital de Terreno
RUSLE	<i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SEAG	Secretaria de Estado de Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca
SedNet	<i>Sediment River Network</i>
SfM	<i>Structure-from-Motion</i>
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIMWE	<i>Simulated of Water Erosion</i>

SSSA	<i>Soil Science Society of America</i>
TIEGEM	<i>Tillage-Induced Ephemeral Gullies Erosion Model</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USLE	<i>Universal Soil Loss Equation</i>
USPED	<i>Unit Stream Power Erosion and Deposition</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
VANT	Veículo Aéreo Não-Tripulado
WEPP	<i>Water Erosion Prediction Project</i>
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

LISTA DE SIMBOLOS

ε_w	Variável espacial do coeficiente de difusão da água [$\text{m}^{4/3} \text{s}^{-1}$]
h	Altura da lâmina d'água [m]
n	Coeficiente de rugosidade de Manning
s	Declividade (adimensional)
s_0	Vetor unitário na direção da inclinação
i_e	Taxa de precipitação excedente [m s^{-1}]
q_s	Taxa do fluxo de sedimentos [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$]
ρ_p	Massa por partícula de sedimento [kg partícula^{-1}]
c	Concentração de sedimentos [partícula m^{-3}]
v	Velocidade do fluxo [m s^{-1}]
ε_s	Constante de difusão dos sedimentos [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
ϱ	Massa de sedimento transportado pela água por unidade de área [kg m^{-2}]
D_C	Capacidade de destacamento [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
T_C	Capacidade de transporte [$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$]
d_s	Taxa de erosão-deposição efetiva [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
K_d	Erodibilidade efetiva (coeficiente da capacidade de destacamento) [s m^{-1}]
K_t	Coeficiente da capacidade de transporte efetiva [s]
τ	Tensão de cisalhamento [$\text{Pa} = \text{kg m}^{-2}$]
τ_{cr}	Tensão de cisalhamento crítica [Pa]
g_w	Pressão hidrostática unitária da água
β	Declividade da superfície [graus]
$b, m \text{ e } n$	Coeficientes empíricos
z	Elevação [m]
t	Tempo [s]
ρ_s	Densidade do sedimento [kg m^{-3}]
ε_g	Coeficiente de difusão gravitacional [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
x, y	Coordenadas de cada pixel
ED_{mNW}	Erro médio da taxa de erosão e deposição em função do número de caminhantes

ED_{NW}	Resultado da taxa de erosão e deposição para determinado número de caminhantes
$ED_{7.000.000}$	Resultado da taxa de erosão e deposição para 7 milhões de caminhantes

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Erosão do solo	23
2.2 Voçorocas	24
2.2.1 Definição.....	24
2.2.2 Tipos de voçorocas e classificações	27
2.2.3 Processo erosivo e gênese de voçorocas	29
2.4 Modelagem numérica de voçorocas	31
2.3.1 Principais modelos existentes	32
2.3.2 Modelo SIMWE	34
2.3.2.1 Características do modelo	34
2.3.2.2 Método e equações fundamentais	37
3 ÁREA DE ESTUDOS.....	39
3.1 Localização geográfica	39
3.2 Regime pluviométrico	40
3.3 Geologia	42
3.4 Geomorfologia.....	42
3.5 Pedologia	43
3.7 Uso e cobertura da terra	44
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1 Caracterização das voçorocas e do solo.....	46
4.1.1 Levantamento de informações em campo	46
4.1.2 Análises e ensaios laboratoriais do solo	48
4.1.3 Análise multitemporal de imagens de satélite e fotografias aéreas	49
4.2 Modelagem numérica	51
4.2.1 Cenários	51
4.2.2 Calibração e determinação dos parâmetros de entrada do modelo	51
4.2.3 Execução do modelo	58
4.2.4 Avaliação do modelo.....	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1 Caracterização das voçorocas	59
5.1.1 Morfologia e características das voçorocas	59

5.1.2 Análise multitemporal de imagens de satélite e fotografias aéreas	63
5.2 Caracterização do substrato litológico	65
5.3 Caracterização do solo.....	67
5.3.1 Pedologia.....	67
5.2.2 Mineralogia	72
5.2.3 Parâmetros físicos e geotécnicos.....	75
5.3 Modelagem numérica das voçorocas	80
5.3.1 Um evento de chuva	80
5.3.2 Série de eventos de chuva	86
5.3.3 Limitações do modelo SIMWE	88
5.4 Hipóteses sobre a gênese e evolução das voçorocas	89
6 CONCLUSÕES	95
REFERÊNCIAS.....	97
APÊNDICE A - FICHA DE DESCRIÇÃO DE CAMPO	112
APÊNDICE B - SÉRIE DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE.....	115
APÊNDICE C – ESTATÍSTICA DOS MAPAS RESULTANTES DAS SIMULAÇÕES PARA UM EVENTO DE CHUVA.	116

1 INTRODUÇÃO

Diversos problemas ambientais, econômicos e sociais em várias partes do mundo são decorrentes da erosão hídrica de encostas. A erosão hídrica pode causar a perda de áreas cultiváveis (VALENTIN; POESEN; YONG, 2005; GARCÍA-RUIZ, 2010; CAPRA, 2013; GARCÍA-RUIZ, 2017; BENNETT; WELLS, 2018; HASSEN; BANTIDER, 2020), danos a infraestrutura (edificações, estradas, ferrovias) (NWILO *et al.*, 2011; CAPRA, 2013; EGBOKA; ORJI; NWANKWOALA, 2019), assoreamento de rios, reservatórios e represas (GARCÍA-RUIZ, 2010; CAPRA, 2013; EGBOKA; ORJI; NWANKWOALA, 2019), eutrofização de cursos d'água e lagos, e destruição de habitats da vida selvagem (WANTZEN, 2006; CAPRA, 2013; HASSEN; BANTIDER, 2020). Para evitar esses problemas, é importante entender como os fatores geoambientais afetam os processos naturais de evolução da paisagem relacionados a erosão hídrica.

Sabe-se que a erosão hídrica de encostas pode se manifestar de várias formas, sendo as voçorocas o estágio mais avançado do processo de erosão hídrica. As voçorocas correspondem a incisões superficiais bem definidas, que podem alcançar até dezenas de metros de profundidade, largura e extensão (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA - SSSA, 2020). A erosão por voçorocas pode ser a principal fonte de sedimentos em uma bacia hidrográfica (POESEN *et al.*, 2003; VALENTIN; POESEN; YONG, 2005; CASALÍ; GIMENEZ; BENNETT, 2009; CAPRA, 2013). Dessa forma, o entendimento mais consolidado deste processo erosivo é necessário para a adoção de estratégias de conservação do solo e recuperação de áreas degradadas (NYSSSEN *et al.*, 2007; CAPRA, 2013).

Na última década, o número de estudos voltados para a compreensão das voçorocas tem aumentado bastante (CASTILLO; GÓMEZ, 2016), inclusive no Brasil (PEREIRA; RODRIGUES, 2022). Contudo, ainda existem muitas lacunas no conhecimento, sobretudo no tocante a modelagem de voçorocas, que poderia fornecer uma melhor compreensão sobre a sua evolução espaço-temporal e permitir quantificar o processo erosivo no espaço e no tempo, além de realizar estimativas sobre onde e quando uma voçoroca poderia se formar, como a feição poderia evoluir e até quando ela poderia permanecer ativa.

Para contornar este problema, diversos modelos numéricos de erosão do solo já foram desenvolvidos para auxiliar na tomada de decisão das medidas preventivas

e mitigadoras para conter a erosão hídrica. Muitos modelos numéricos da erosão hídrica permitem quantificar a erosão do solo e realizar previsões com base em simulações (MORGAN, 2005; MITASOVA *et al.*, 2013). No entanto, a maioria dos modelos existentes não foram desenvolvidos para simular a erosão em voçorocas, e os modelos elaborados para esse propósito, geralmente, não são capazes de simular a formação e evolução espaço-temporal das voçorocas (VANMAERCKE *et al.*, 2021), capturando apenas algumas das características dos processos erosivos que ocorrem em voçorocas (ROBERTS *et al.*, 2022).

O modelo *SIMulation of Water Erosion* (SIMWE), desenvolvido por Mitas e Mitasova (1998), baseado em sistema de informação geográfica, apresenta potencial para a modelagem espaço-temporal de voçorocas (KOCO, 2011; MITASOVA *et al.*, 2013; HARMON *et al.*, 2019). Esse modelo possibilita simular padrões de fluxo concentrado e a erosão causada pelo fluxo superficial da água em pequenas bacias hidrográficas (MITASOVA *et al.*, 2013). Apesar de apresentar potencial para simular a evolução de voçorocas, o modelo ainda é pouco conhecido e utilizado no país (DANIEL; VIEIRA; MARTINS, 2021).

O município de Alegre, localizado no sul do estado do Espírito Santo, apresenta um grande número de voçorocas de tamanhos variados, que se destacam na paisagem. No entanto, existem poucos estudos sobre estas feições no município, com destaque para os trabalhos de Marchioro, Andrade e Oliveira (2016), Hartwig e Ribeiro (2021) e Hartwig e Alves (2022).

Tal fato não é diferente nas adjacências do km 6 da rodovia ES-181, que liga a cidade de Alegre ao distrito de Café, pois ocorrem duas voçorocas esculpidas em solo residual em uma encosta íngreme. O objetivo geral deste trabalho foi caracterizar a evolução espaço-temporal das voçorocas e avaliar se o modelo numérico SIMWE é capaz de simular a evolução espaço-temporal dessas feições erosivas.

Os objetivos específicos relacionados a caracterização da evolução das voçorocas compreendem a caracterização pedológica, mineralógica e geotécnica do solo, caracterização morfológica e morfométrica das voçorocas, descrição dos processos erosivos reconhecidos em campo, e elaboração de hipóteses que expliquem a gênese e desenvolvimento das voçorocas. Enquanto o objetivo específico relacionado a avaliação do modelo SIMWE foi verificar se o modelo apresenta resultados condizentes com as observações de campo e detectar suas limitações inerentes.

6 CONCLUSÕES

No presente estudo investigou-se as características de duas voçorocas desenvolvidas em uma encosta íngreme, localizada nas proximidades da rodovia ES-181, que liga o município de Alegre ao distrito do Café, Estado do Espírito Santo. Além disso, procurou-se neste estudo, simular numericamente, a origem e evolução destas feições por meio do modelo numérico SIMWE.

As voçorocas estudadas remontam ao ano de 2007 a 2013. Estimou-se que a taxa de erosão total do solo foi da ordem de $198 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$ no período de 2007 a 2021. Embora as voçorocas tenham evoluído rapidamente, sua instalação levou várias décadas (mais de 38 anos).

A caracterização do solo e das voçorocas permitiu atingir um melhor entendimento dos processos físicos que participam na gênese e evolução das voçorocas. Os movimentos de massa associados ao rompimento de terracetes parecem ser um dos principais processos responsáveis por desencadear as voçorocas, enquanto os associados a deslizamentos e fluxo de terra são os principais mecanismos de expansão. Já os processos de erosão hídrica de encostas passam a ter maior efetividade apenas ao atingir os horizontes B e C do perfil de solo, e são responsáveis por promover o aprofundamento da voçoroca e entalhamento das paredes.

O modelo SIMWE mostrou bom desempenho para a modelagem do fluxo superficial da água (modelo hidrológico), enquanto o modelo de erosão e deposição apresentou resultados parcialmente coerentes. No cenário pré-voçoroca o modelo permitiu identificar algumas áreas de maior potencial erosivo, inclusive nas áreas de projeção das voçorocas, mas não foi capaz de definir as áreas mais prováveis para o desenvolvimento de voçorocas.

Em alguns locais de topografia mais plana o modelo simulou taxas de deposição de sedimentos que apresentam correspondência com as áreas de acumulação de sedimentos constatadas em campo. Quanto as taxas de erosão, o modelo também mostrou boa correspondência, mas com dificuldade para a simular o processo de erosão em sulcos. Porém, isso é válido apenas para a simulação de um único evento de chuva, pois a simulação para a série de eventos de precipitação apresentou limitações importantes, sendo a principal delas, a propagação de erros após cada iteração, resultando em um modelo espúrio de taxa de erosão-deposição.

As descobertas desse estudo, permitem afirmar que o modelo SIMWE pode ser utilizado para auxiliar na compreensão da dinâmica do fluxo superficial de vertentes e identificação de áreas com elevado potencial erosivo. No entanto, a complexidade do modelo e suas limitações inerentes tornam sua utilização mais complicada, sendo necessário considerar uma série de cuidados durante a obtenção dos dados de entrada e interpretação dos resultados.

Os resultados obtidos chamam a atenção para a complexidade dos processos que atuam na gênese e evolução de voçorocas desenvolvidas em encostas íngremes e em solos residuais de gnaisse, o que explica, em parte, as limitações do modelo SIMWE.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. **Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil**. São Paulo: Geomorfologia; 1970.
- AB'SÁBER, A. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 7 ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2012.
- ALBERTS, E. E.; NEARING, M. A.; WELTZ, M. A.; RISSE, L. M.; PIERSON, F. B.; ZHANG, X. C.; LAFLIN, J. M.; SIMANTON, J. R. Soil component. *In*: FLANAGAN, D. C.; NEARING, M.A. (ed.). **Water Erosion Prediction Project: hillslope profile and watershed model documentation**. West Lafayette: United States Department of Agriculture, Agricultural Research Station, National Soil Erosion Research Laboratory, n. 10, 1995. p. 1 - 47. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/midwest-area/west-lafayette-in/national-soil-erosion-research/docs/wepp/wepp-model-documentation>. Acesso em: 16 out. 2023.
- ANDERSON, R.; ROWNTREE, K.; LE ROUX, J. An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion. **Catena**, Amsterdam, v. 206, 105482, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105482>
- ANDRADE, F. M. Influências remotas na previsibilidade, estrutura e ciclo de vida da Zona de Convergência do Atlântico Sul. 2011. 149p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR13292: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR13601: avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (crumb test). Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ATCHLEY, A. L.; BIRDSELL, K. H.; CROWELL, K.; MIDDLETON, R. S.; STAUFFER, P. H. Simulating 10,000 Years of Erosion to Assess Nuclear Waste Repository Performance. **Geosciences**, v. 9, n. 3, p. 120-141, 2019. <https://doi.org/10.3390/geosciences9030120>
- AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Ocorrência de voçorocas em Gouvêia/MG: características e processos associados. **Geonomos**, v. 14, p. 75-86, 2006.
- BANFIELD, J. F. Analytical Transmission Electron Microscope Studies of Plagioclase, Muscovite, and K-Feldspar Weathering. **Clays and Clay Minerals**, New York, v. 38, n. 1, p. 77-89, 1990. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1990.0380111>
- BAPTISTA, G. M. M. **Diagnóstico ambiental da perda laminar de solos por meio de geoprocessamento**. 1997. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 1997.
- BAXTER, C.; ATMATZIDIS, D.; KRIZEK, R. Laboratory testing of chemically grouted

sand. **Geotechnical Testing Journal**, v. 12, n. 2, p. 109-118, 1989.

BENNETT, J. Concepts of mathematical modelling of sediment yield. **Water Resources Research**, Washington, v. 10, p. 485-492, 1974.
<https://doi.org/10.1029/WR010i003p00485>

BENNETT, S.; WELLS, R. Gully erosion processes, disciplinary fragmentation, and technological innovation. **Earth Surface Processes and Landforms**, Sussex, v. 44, n. 1, p. 46-53, 2018. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.4522>

BESOAIN, E. **Mineralogia de arcillas de suelos**. San José, Costa Rica: IICA, 1985. 1216 p. Disponível em: <https://repositorio.ica.int/handle/11324/12993>. Acesso em: 27 dez. 2022.

BIGARELLA, J. J.; MAZUCHOWSKI, J. Z. Visão integrada da problemática da erosão. In: **Livro guia: III Simpósio Nacional de Controle da Erosão**, Maringá - PR. ABGE - Associação Brasileira de Geologia e Engenharia, ADEAM - Associação de Defesa e Educação Ambiental, Curitiba, 1985. 332p.

BOARDMAN, J. Soil erosion science: Reflections on the limitations of current approaches. **Catena**, Amsterdam, v. 68, n. 2-3, p. 73-86, 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.03.007>

BOCCO, G. Gully erosion: process and models. **Progress in Physical Geography**, London, v. 15, p. 392-406, 1991. <https://doi.org/10.1177/030913339101500403>

BRANCHES, A. M. B. **Evolução temporal de uma superfície de pilha de rejeito em pasta: influência da rugosidade e do diâmetro dos sedimentos no processo erosivo**. 2015. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 2015. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/5556>. Acesso em: 16 out. 2023.

BRESSON, L. M.; VALENTIN, C. Soil surface crust formation: contribution of micromorphology. **Developments in Soil Science**, p. 737-762, 1993.
<https://doi.org/10.1016/S0166-2481%2808%2970460-4>

BULL, L. J.; KIRKBY, M. J. Gully process and modelling. **Progress in Physical Geography**, London, v. 21, n. 3, p. 354-374, 1997.
<https://doi.org/10.1177/030913339702100302>

BURKARD, M. B.; KOSTASCHUK, R. A. Initiation and evolution of gullies along the shoreline of Lake Huron. **Geomorphology**, v. 14, p. 211-219, 1995.
[https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1995Geomo..14..211B/doi:10.1016/0169-555X\(95\)00059-E](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1995Geomo..14..211B/doi:10.1016/0169-555X(95)00059-E)

CAMPO-BESCÓS, M. A.; FLORES-CERVANTES, J. H.; BRAS, R. L.; CASALÍ, J.; GIRALDEZ, J. V. Evaluation of a gully headcut retreat model using multitemporal aerial photographs and digital elevation models. **Journal Geophysical Research: Earth Surface**, Sussex, v. 118, n. 4, p. 2159-2173, 2013.
<https://dx.doi.org/10.1002/jgrf.20147>

CAPRA, A. Ephemeral gully and gully erosion in cultivated land: A review. *In*: LANNON, E. C. (ed.). **Drainage Basins and Catchment Management: Classification, Modelling and Environmental Assessment**. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers, 2013. p. 109-141.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**: Fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1988. 234p.

CARRIVICK, J. L.; SMITH, M. W.; QUINCEY, D. J. **Structure from motion in the geoscience**. Chichester: Wiley-Blackwell, 2016.

CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J. A.; MOTTA, N. O.; FRANCISCO, R. A. Processos erosivos. *In*: CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. (Orgs.). **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília: Universidade de Brasília - FINATEC, 2006. p. 39-91.

CASALÍ, J., GIMÉNEZ, R.; BENNETT, S. Gully erosion processes: monitoring. **Earth Surface Processes and Landforms**, Sussex, v. 34, n. 14, p. 1839-1840, 2009. <https://doi.org/10.1002/esp.1867>

CASTILLO, C.; GÓMEZ, J. A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. **Earth-Science Reviews**, v. 160, p. 300-319, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>

CHARKLEY, F. N.; ZHANG, K.; MEI, G. Shear strength of compacted clays as affected by mineral content and wet-dry cycles. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019, p. 1-8, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8217029>

CHEN, A.; ZHANG, D.; PENG, H.; FAN, J.; XIONG, D.; LIU, G. Experimental study on the development of collapse of overhanging layers of gully in Yuanmou Valley, China. **Catena**, Amsterdam, v. 109, p. 177-185, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.04.002>

CHERIF TAIBA, A.; MAHMOUDI, Y.; BELKHATIR, M.; BAILLE, W. Assessment of the correlation between grain angularity parameter and friction index of sand containing low plastic fines. **Geomechanics and Geoengineering**, v. 1, p. 1-17, 2019. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1648881>

CHERIF TAIBA, A.; MAHMOUDI, Y.; BELKHATIR, M.; KADRI, A.; SCHANZ, T. Experimental Characterization of the Undrained Instability and Steady State of Silty Sand Soils under Monotonic Loading Conditions. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 12, n. 5; p. 513-529, 2018. <https://doi.org/10.1080/19386362.2017.1302643>

CHO, G. C.; DODDS, J.; SANTAMARINA, J. C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York, v. 132, n. 5, p. 591-602, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:5\(591\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591))

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.

COLI, R. N.; HARTWIG, M. E.; PIRES, P. J. M. Caracterização geológico-geotécnica

de um perfil de alteração de gnaisses do Complexo Paraíba do Sul em um corte da rodovia ES-181, Alegre-ES. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 17., Simpósio sobre Jovens Profissionais, 4., 2022, Belo Horizonte.

Anais [...]. Belo Horizonte: ABGE, 2022, p. 1-9. Disponível em:

https://schenautomacao.com.br/cbge2022/envio/files/trabalho1_9.pdf. Acesso em: 16 out. 2023.

COLLINS DICTIONARIES. **Collins English Dictionary – Complete and Unabridged**, 12. ed. New York: HaperCollins, 2014.

CORRÊA, G. F. **Modelo de evolução e mineralogia da fração argila de solos do planalto de Viçosa, MG**. 1984. 187f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1984.

CUNHA, A. M.; FEITOZA, H. N.; FEITOZA, L. R.; OLIVEIRA, F. S.; LANI, J. L.; CARDOSO, J. K. F.; TRINDADE, F. S. **Mapa de reconhecimento de solos do Estado do Espírito Santo: uma atualização de legenda**. Vitória: INCRA; Incaper; UFV; ITC-NL, 2016.

DAEE/IPT. **Controle de erosão**: bases conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e territorial; orientações para o controle de boçorocas urbanas. 2. ed. São Paulo: DAEE/IPT, 1990.

DANIEL, E.; VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D. Análise dos processos erosivos e deposicionais utilizando o modelo SIMWE (Simulated of Water Erosion). **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 41, n. 1, p. 1-15, 2021.
<https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2021.185794>

DECHEN, S.; TELLES, T; FATIMA, M; MARIA, I. Losses and costs associated with water erosion according to soil cover rate. **Bragantia**, Campinas, v. 74, p. 224-233, 2015. 10.1590/1678-4499.0363.

DONAGEMMA, G. K., VIANA, J. H. M., ALMEIDA, B. G., RUIZ, H. A., KLEIN, V. A., DECHEN, S. C. F., FERNANDES, R. B. A. Análise granulométrica. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. p. 95-116. 574p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 16 out. 2023.

DONG, Y.; WU, Y.; QIN, W.; GUO, Q.; YIN, Z.; DUAN, X. The gully erosion rates in the black soil region of northeastern China: Induced by different processes and indicated by different indexes. **Catena**, Amsterdam, 182, n. 1, p. 104146, 2019.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2019.104146>

DONNAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

EGBOKA, B. C. E.; ORJI, A. E.; NWANKWOALA, H. O. Gully erosion and landslides in Southeastern Nigeria: causes, consequences and control measures. **Global Journal Engineering Sciences**, v. 2, n. 4, 2019.

<http://dx.doi.org/10.33552/GJES.2019.02.000541>.

ELLIOTT, W. J.; LIEBENOW, A. M.; LAFLEN, J. M.; KOHL, K. D. A Compendium of Soil Erodibility Data From WEPP Cropland Soil Field Erodibility Experiments 1987 & 1988. NSERL Report No. 3, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, 1989.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA.

Levantamento de reconhecimentos de solos do estado do Espírito Santo. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1978. (Boletim técnico, 45).

FARIAS, A. S.; VIEIRA, A. F. G.; BARBOSA, A. J.; TAVARES, J. S. Análise preliminar do estudo morfométrico das voçorocas na bacia Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM. *In: Simpósio Nacional de Geomorfologia*, 8., 2010, Recife. **Anais [...]**. Brasília: União da Geomorfologia Brasileira, 2010, p. 1-13.

FARRES, P. The role of time and aggregate size in the crusting process. **Earth Surface Processes**, p. 243-254, 1978.

FENDRICH, R. Erosão Urbana. *In: FENDRICH, R.; OBLADEN, N. I.; AISSE, M. M.; GRACIAS, C. M. (org.). Drenagem e controle da erosão urbana*. 4. ed. Curitiba: Champagnat, 1997. p. 15-50.

FERNANDES, J.; BATEIRA, C.; SOARES, L.; FARIA, A.; OLIVEIRA, A.; HERMENEGILDO, C.; MOURA, R.; GONÇALVES, J. SIMWE model application on susceptibility analysis to bank gully erosion in Alto Douro Wine Region agricultural terraces. **Catena**, Amsterdam, v. 153, p. 39-49, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.034>.

FERREIRA, V. M.; FERREIRA, R. R. M. (coord.). **Apostila Técnica de Estabilização de Voçorocas**. Nazareno: Centro Regional Integrado de Desenvolvimento Sustentável, 2009.

FLANAGAN, D. C.; LIVINGSTON, S. J. (ed.). **WEPP User Summary**. West Lafayette: United States Department of Agriculture, Agricultural Research Station, National Soil Erosion Research Laboratory, n. 11, 1995. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/midwest-area/west-lafayette-in/national-soil-erosion-research/docs/wepp/wepp-model-documentation>. Acesso em: 16 out. 2023.

FLORES-CERVANTES, J. H.; ISTANBULLUOGLU, E.; BRAS, R. L. Development of gullies on the landscape: a model of headcut retreat resulting from plunge pool erosion. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 111, p. 1-14, 2006. <https://doi.org/10.1029/2004JF000226>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. **Soil erosion by water**: Some measures for its control on cultivated lands. Rome: FAO Agricultural Paper, n. 81, 1965. 284p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=6KeL3ix6ZqQC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0. Acesso em: 16 out. 2023.

FOSTER, G. R. Understanding ephemeral gully erosion. *In: National Research*

Council. **Soil Conservation**: An Assessment of the National Resources Inventory. Washington: National Academy of Science Press, v. 2, 1986. p. 90-125.
<https://doi.org/10.17226/648>

FULLEN, M. A.; CATT, J. A. Soil Erosion. *In*: GOUDIE, A. (ed.). **Encyclopedia of Geomorphology**. London: Routledge, 2004. p. 977-981.

GANASRI, B. P.; RAMESH, H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. **Geoscience Frontiers**, Beijing, v. 7, n. 6, p. 953-961, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>

GAO, C.; LI, P.; HU, J.; YAN, L.; LATIFI, H.; YAO, W.; HAO, M.; GAO, J.; DANG, T.; ZHANG, S. Development of gully erosion processes: A 3D investigation based on field scouring experiments and laser scanning. **Remote Sensing of Environment**, v. 265, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112683>

GARCÍA-RUIZ, J. M. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. **Catena**, Amsterdam, v. 81, p. 1-11, 2010.

GARCÍA-RUIZ, J. M.; BEGUERÍA, S.; LANA-RENAULT, N.; NADAL-ROMERO, E.; CERDÀ, A. Ongoing and emerging questions in water erosion studies. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 28, n. 1, p. 5-21, 2017.
<https://doi.org/10.1002/ldr.2641>

GORDON, L. M.; BENNETT, S. J.; BINGNER, R. L.; THEURER, F. D.; ALONSO, C. V. Simulating ephemeral gully erosion in AnnAGNPS. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n. 3, p. 857-866, 2007. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23150>

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas encostas. *In*: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). **Geomorfologia**: Uma atualização de bases e conceitos. 8. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008. p. 149-209.

GUERRA, A.J.T. O início do processo erosivo. *In*: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**: conceitos, temas e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1999. p. 17-50

HANCOCK, G. R.; TURLEY, E. Evaluation of proposed waste rock dump designs using the SIBERIA erosion model. **Environmental Geology**, v. 49, p. 765-779, 2006.
<https://doi.org/10.1007/s00254-005-0127-7>

HANCOCK, G. R.; WILLGOOSE, G. R.; EVANS, K. G. Testing of the SIBERIA landscape evolution model using the Tin Camp Creek, Northern Territory, Australia, field catchment. **Earth Surface Processes and Landforms**, Sussex, v. 27, n. 2, p. 125-143, 2002. <https://doi.org/10.1002/esp.304>

HANCOCK, G.; LOWRY, J.; COULTHARD, T.; EVANS, K.; MOLIERE, D. A catchment scale evaluation of the SIBERIA and CAESAR landscape evolution models. **Earth Surface Processes and Landforms**, Sussex, v. 35, n. 8, p. 863-875, 2010. <https://doi.org/10.1002/esp.1863>

HARMON, B. A. Manual: r.sim.terrain - Dynamic landscape evolution model. Disponível em: <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/addons/r.sim.terrain.html>.

Acesso em: 16 out. 2023.

HARMON, B. A.; MITASOVA, H.; PETRASOVA, A.; PETRAS, V. r.sim.terrain 1.0: a landscape evolution model with dynamics hydrology. **Geoscientific Model Development**, v. 12, p. 2837-2854, 2019. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2837-2019>

HARTWIG, M. A.; ALVES, J. P. I. Spationtemporal analysis of gullies and environmental controlling factor in the municipality of Alegre (state of Espírito Santo, southeastern Brazil). **Geologia USP. Série Científica**, São Paulo, v. 22, n. 2, p.29-42, 2022. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v22-194316>

HARTWIG, M. E., RIBEIRO, L. P. Gully evolution assessment from structure-from-motion, southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, n. 548, p. 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09831-z>

HASSEN, G.; BANTIDER, A. Assessment of drivers and dynamics of gully erosion in case of Tabota Koromo and Koromo Danshe watersheds, South Central Ethiopia. **Geoenvironmental Disasters**, v. 7, n. 5, p.1-13, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0138-4>

HORN, A. H.; FARIA, B.; GARDINI, G. M.; VASCONCELLOS, L.; OLIVEIRA, M. R. **Geologia da Folha Espera Feliz 1:100.000**. Rio de Janeiro: CPRM/UFMG - Programa Geologia do Brasil, 2007. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/10319>. Acesso em: 16 out. 2023.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, Washington, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)

HUANG, B.; QIU, M.; LIN, J.; CHEN, J.; JIANG, F.; WANG, M.; GE, H.; HUANG, Y. Correlation between shear strength and soil physicochemical properties of different weathering profiles of the non-eroded and collapsing gully soils in southern China. **Journal of Soils and Sediments**, v. 19, p. 3832–3846, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02313-7>

HUDSON, N. W. **Soil conservation**. London: Batsford, 1985.

HUTCHINSON, D. E.; STOËSZ, A. D. Resource conservation glossary. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 31, p. 1-63, 1976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1976.03615995004000060002x>

INCAPER. **Gráficos da série histórica - Alegre/ES**. Vitória: Sistema de Informações Metereológicas do Incaper, 2022. Disponível em: <<https://meteorologia.incaper.es.gov.br/graficos-da-serie-historica-alegre>>. Acesso em: 16 out. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IRELAND, H. A.; SHARPE, C. F.; EAGLE, D. H. **Principles of Gully Erosion in the Piedmont of South Carolina**. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin,

1939.

IWASA, O. Y.; PRANDINI, F. L. Prevenção e correção de fenômenos erosivos: as boçorocas, exemplo da necessidade de diagnose. **Geologia Ciência–Técnica**, São Paulo, n. 7, p. 23-53, 1982.

JOTISANKASA, A.; SIRIRATTANACHAT, T. Effects of grass roots on soil-water retention curve and permeability function. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v. 54, n. 11, p. 1612–1622, 2017. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0281>

KÄMPF, N.; MARQUES, J. J.; CURI, N. Mineralogia de solos brasileiros. *In*: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (ed.). **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. p. 82-145.

KETEMA, A.; DWARAKISH, G. S. Water erosion assessment methods: a review. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, v. 27, n. 4, p. 1-8, 2019. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1567398>

KIRKBY, M. J.; BRACKEN, L. J. Gully processes and gully dynamics. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, p. 1841-1851, 2009. <https://doi.org/10.1002/esp.1866>

KNISEL, W. G. **CREAMS**: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. Tucson: U.S. Department of Agriculture, Conservation Research Report, n. 26, 1980. 643p.

KOCO, S. Simulation of gully erosion using the SIMWE model and GIS. **Landform Analysis**, v. 17, p. 81-86, 2011.

KRUMBEIN, W. C. Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. **Journal of Sedimentary Petrology**, v.11, n. 2, p. 64-72, 1941.

LADO, M.; BEN-HUR, M. Soil mineralogy effects on seal formation, runoff and soil loss. **Applied Clay Science**, v. 24, n. 3–4, p. 209-224, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2003.03.002>.

LAFAYETTE, K. P. V.; CANTALICE, J. R. B.; COUTINHO, R. Q. Resistência à erosão em ravinas, em latossolo argiloarenoso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 6, p. 2167–2174, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600031>

LAFLÉN, J. M.; ELLIOT, W.; SIMANTON, J. R.; HOLZHEY, C. S.; KOHL, K. D. WEPP: Soil Erodibility Experiments for Rangeland and Cropland Soils. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 46, n. 1, p. 39-44, 1991.

LAL, R. Soil erosion in the tropics: principles e management. New York: McGraw-Hill, 1990. 580p. <https://doi.org/10.5860/choice.28-4545>

LANI, J. L.; RESENDE, M.; REZENDE, S. B.; FEITOZA, L. R. **Atlas dos Ecossistemas do Espírito Santo**. Vitória: SEMA-ES/UFV-MG, 2008. 504p.

LANI, J. L.; REZENDE, S. B.; RESENDE, M. Estratificação de ambientes com base nas classes de solos e outros atributos na bacia do rio Itapemirim, Espírito Santo. **Revista Ceres**, v. 48, n. 276, p. 239-261, 2001.

LE ROUX, J.; VAN DER WAAL, B. Gully erosion susceptibility modelling to support avoided degradation planning. **South African Geographical Journal**, Johannesburg, v. 102, n. 3, p. 406-420, 2006.
<https://doi.org/10.1080/03736245.2020.1786444>

LIAO, Y.; YUAN, Z.; ZHUO, M.; HUANG, B.; NIE, X.; XIE, Z.; TANG, C.; LI, D. Coupling effects of erosion and surface roughness on colluvial deposits under continuous rainfall. **Soil and Tillage Research**, v. 191, p. 98-107, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.016>.

LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. B.; CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C. Variabilidade temporal da precipitação mensal em Alegre-ES. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 2, p. 327-332, 2008. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/47444401_Variabilidade_temporal_da_precipitacao_mensal_em_Alegre_ES. Acesso em: 16 out. 2023.

MARCHIORO, E.; ANDRADE, E. E.; OLIVEIRA, J. C. Evolução espaço-temporal de voçorocas no Espírito Santo: estudo de caso nos municípios de Afonso Cláudio e Alegre. **Revista Brasileira de Geomorfologia (Online)**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 191-204, 2016. <https://doi.org/10.20502/rbg.v17i1.712>

MARCHIORO, E.; RIBEIRO, L. Voçoroca no Brasil: uma abordagem espaço-temporal entre os anos 2000 e 2020. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, 2023.
<https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v24i00.2417>

MARCHIORO, E.; SILVA, G. M.; CORREA, W. S. C. A Zona de Convergência do Atlântico Sul e a precipitação pluvial do município de Vila Velha (ES): Repercussões sobre as inundações. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, v. 31, p. 101-117, 2016. <https://doi.org/10.11606/rdg.v31i0.108447>

MARTINS FILHO, M. V. **Erodibilidade inter e intra-sulcos de um Latossolo Vermelho-escuro textura argilosa da região de Jaboticabal – SP**. 1994. 143f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

MCNEAL, B. L.; COLEMAN, N. T. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 30, p. 308-312, 1966. <https://doi.org/10.2136/sssaj1966.03615995003000030007x>

MEIS, M. R. M.; COELHO NETTO, A.L.; MOURA, J. R. S. As descontinuidades nas formações coluviais como condicionantes nos processos hidrológicos e de erosão acelerada. In: Simpósio Nacional de Controle da Erosão, 3, 1985, Maringá. **Anais [...]**. Maringá: ABGE. 1985. p. 75-87.

MELFI, A. J.; CERRI, C. C.; KRONBERG, B. I.; FYFE, W. S.; MCKINNON, B. Granitic weathering: a Brazilian study. **European Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 34, n. 4, p. 841-851, 1983. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1983.tb01076.x>

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do sol. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p.963-969, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000300052>

MITAS, L.; MITASOVA, H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. **Water Resources Research**, Washington, v. 34, n. 3, p. 505-516, 1998. <https://doi.org/10.1029/97WR03347>

MITASOVA, H.; BARTON, M.; ULLAH, I.; HOFIERKA, J.; HARMON, R. GIS-Based Soil Erosion Modeling. *In*: SHRODER, J.F. (ed.). **Treatise on Geomorphology**. San Diego: Academic Press, v. 3, 2013. p. 228-258. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00052-X>

MITASOVA, H.; THAXTON, C.; HOFIERKA, J.; MCLAUGHLIN, R.; MOORE, A.; MITAS, L. Path sampling method for modeling overland water flow, sediment transport, and short term terrain evolution in Open Source GIS. **Developments in Water Science**, v. 55, p. 1479-1490, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0167-5648\(04\)80159-X](https://doi.org/10.1016/S0167-5648(04)80159-X)

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behaviors**. 3 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2005.

NAFISI, A.; KHOUBANI, A.; MONTROYA, B.; EVANS, T. M. The effect of grain size and shape on mechanical behavior of MICP sand I experimental study. *In*: Proceedings of International Symposium on Bio-mediated and Bio-inspired Geotechnics, 2018, Atlanta. **Anais [...]**. Atlanta, 2018.

NASCIMENTO, M.C. **Mapeamento das áreas de preservação permanente e dos conflitos de uso da terra na bacia hidrográfica do rio Alegre, ES**. 2009. 128f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/111>. Acesso em: 16 out. 2023.

NASCIMENTO, R. E. N. **Resistência à erosão e perdas de nutrientes de um latossolo compactado e/ou consolidado**. 2021. 66p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2021. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/214110/nascimento_ren_me_jabo.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 16 out. 2023.

NATIONAL COMMITTEE ON SOIL AND TERRAIN - NSSH. **National Soil Survey Handbook**. Washington: Natural Resources Conservation Service, US Department of Agriculture, 2008.

NOVAES, M. S. **História do Espírito Santo**. Vitoria: Fundo editorial do Espírito Santo, 1970.

NWILO, P. C.; OLAYINKA, D. N.; UWADIEGWU, I.; ADZANDEH, A. E. An assessment and mapping of gully erosion hazards in Abia state: A GIS approach.

Journal of Sustainable Development, v. 4, n. 5, 2011.
<http://dx.doi.org/10.5539/jsd.v4n5p196>

NYSSSEN, J.; DESCHEEMAER, K.; HAREGEWEYN, N.; MITIKU, H.; DECKERS, J.; POESEN, J. (ed.). **Lessons Learnt from 10 Years Research on Soil Erosion and Soil and Water Conservation in Tigray**. Mekelle: Zala-Daget Project. Mekelle University, K.U. Leuven. Relief Society of Tigray, Africa Museum and Tigray Bureau of Agriculture and Rural Development, 2007.

OLIVEIRA, E. C. V. **Gênese e condicionantes na formação de terracetes do sudeste de Minas Gerais**. 2018. 79f. Monografia (Graduação em Geologia), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

OLIVEIRA, M. A. T. Erosion Disconformities and Gully Morphology: A Threedimensional Approach. **Catena**, Amsterdam, v.16, n. (4-5). p.413-423, 1989.

OLIVEIRA, M. A. T.; LEMOS, R.; PINTO, L. R. Pode uma voçoroca resultar da evolução de voçorocas conectadas e desconectadas?. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 2023. <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2372>

OLIVEIRA, M. A.T.; MEIS, M. R. M. Relações entre geometria do relevo e formas de erosão linear acelerada, Bananal (SP). **Geociências**, v. 4, p. 87-99, 1985.

OLIVEIRA, V.; COSTA, A. M. R.; AZEVEDO, W. P.; CAMARGO, M. N.; LARACH J. O. I. Levantamento exploratório de solos - folhas SF.23/24, Rio de Janeiro/Vitória. *In: Brasil - MME*. Secretaria Geral. Rio de Janeiro: Projeto Radambrasil, p. 385-552, 1983. (Levantamento de recursos naturais, 32).

OLIVEIRA, Z. C. **Abertura do caminho de Arripiados à ultima cachoeira do Rio Itapemirim**: A saga de uma expedição desbravadora e a origem do topônimo da cidade de Alegre-ES. Alegre: A Palavra, 2009.

PACHECO, A. A. **Pedogênese e distribuição espacial dos solos da bacia hidrográfica do Rio Alegre – ES**. 2011. 104f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

PACHECO, A. A.; KER, J. C.; SCHAEFER, C. E. C. R.; FONTES, M. P. F.; ANDRADE, F. V.; MARTINS, E.; OLIVEIRA, F. S. Mineralogy, Micromorphology, and Genesis of Soils with Varying Drainage Along a Hillslope on Granitic Rocks of the Atlantic Forest Biome, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170291>

PEDROSA-SOARES, A. C.; WIEDMANN-LEONARDOS, C. M. Evolution of the Araçuaí Belt and its connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil. *In: Cordani, U.; Milani, E. L.; Thomaz, A.; Campos, D. A. (ed.) Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro: SBG, p. 265-285, 2000.

PEREIRA, J. S.; RODRIGUES, S. C. Estudos sobre Voçorocas: uma avaliação da produção científica brasileira (2009/2019). **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 34, 2022. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-65923>

PEROOR, R, HOWARD, EJ, BRAUN, T, CHESAL, T; CHATAUT, S. Integration of field erosion measurements with erosion models and 3D civil design tools for development of erosion resistant cover systems. *In: International Conference on Mine Closure*, 13., 2019, Perth. **Proceedings** [...] Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019. p. 1561-1574.

https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1915_122_Peroor

PICHLER, E. Boçorocas. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 3-16, 1953. Disponível em: <https://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/BSBG/article/view/12553/12114>. Acesso em: 30 dez. 2022.

PIJL, A.; REUTER, L. E.; QUARELLA, E.; VOGEL, T. A.; TAROLLI, P. GIS-based soil erosion modelling under various steep-slope vineyard practices. **Catena**, Amsterdam, v. 193, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104604>

POESEN, J. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. *In: Wicherek, S. (ed.). Farmland Erosion in Temperate Plains Environment and Hills*. Amsterdam: Elsevier, p. 221-239, 1993.

POESEN, J.; GOVERS, G. Gully erosion in the loam belt of Belgium: typology and control measures. *In: BOARDMAN, J., FOSTER, D. L., DEARING, J. A. (ed.). Soil Erosion on Agricultural Land*. Chichester: Wiley, 1990. p. 513-530.

POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, Amsterdam, v. 50, p. 91-133, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)

POESEN, J.; VANDAELE, K.; VAN WESEMAEL, B. Gully erosion: importance and model implications. *In: Boardman, J., Favis-Mortlock, D. T. (ed.) Modelling Soil Erosion by Water Springer-Verlag*, Berlin: NATO-ASI Series, v. 1-55, 1998. p. 285-311.

PRADO, H. **A pedologia simplificada**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1995.

REBERTUS, R. A.; WEED, S. B.; BUOL, S. W. Transformations of Biotite to Kaolinite During Saprolite-Soil Weathering. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 3, p. 810-819, 1986. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030049x>

REZENDE, S. B.; RESENDE, M. Solos dos Mares de Morros: Ocupação e Uso. *In: VENEGAS, V. H. A.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (ed.). O Solo nos Grandes Domínios Morfoclimáticos do Brasil e o Desenvolvimento Sustentado*. Viçosa: SBCS; UFV, DPS, 1996.

ROBERTS, M. E.; BURROWS, R. M.; THWAITES, R. N.; HAMILTON, D. P. Modelling classical gullies - A review. **Geomorphology**, v. 407, n. 108216, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108216>.

ROTTA, C. M. S.; ZUQUETTE, L. V. Processos erosivos. *In: ZUQUETTE, L. V. (org.). Geotecnia Ambiental*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, v. 1, 2015. p. 113-152.

ROWE, P. W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of

particles. *In: Proceedings of Royal Society A*. Math, Physi. and Eng. Sciences, The Royal Society, v. 269, n. 1339, 1962.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 16 out. 2023.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, v. 43, p. 137 - 154, 2008. <https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.1.11>

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA, ABASTECIMENTO, AQUICULTURA E PESCA - SEAG. **Plano Estratégico de Desenvolvimento da Agricultura Capixaba: novo PEDEAG 2007-2025**/Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca. Vitória: SEAG, 2008.

SELBY, M. **Hillslope Materials & Processes**. New York: Oxford University Press, 1993. 451p.

SHIT, P. K.; BHUNIA, G. S.; MAITI, R. Assessing the performance of check dams to control rill-gully erosion: small catchment scale study. **International Journal of Current Research**, v. 5, n. 4, p. 899-906, 2013.

SINGER, M. J.; OSTER, J. D. **Water penetration problems in California soils**. Davis: Land, Air, and Water Resources, Dep. of Land, Air, and Water Resources, University of California, 1984.

SJÖRS, A. B. **Erosion History of Ragen and Nyalunya Area, Nyando District, Kenya**. Sweden: Uppsala University, 2001.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA - SSSA. **Glossary of Soil Science Terms**. Soil Science Society of America. Madison, 2008. Disponível em: <https://www.soils.org/publications/soils-glossary#>. Acesso em: 30 dez. 2022.

Soil Survey Division Staff. **Soil survey manual**. Washington: U.S. Dept. of Agriculture Handbook, 1993.

STAKLAND, S. K. **Effect of mica content on surface infiltration of soils in Northwestern Kern County California**. Utah State University ProQuest Dissertations Publishing, 2010. 1487852.

THAXTON, C. S. **Investigations of grain size dependent sediment transport phenomena on multiple scales**, PhD thesis, North Carolina State University, 2004. Disponível em: <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/3339>. Acesso em: 30 dez. 2022.

THWAITES, R. N.; BROOKS, A. P.; PIETSCH, T. J.; SPENCER, J. R. What type of gully is that? The need for a classification of gullies. **Earth Surface Processes and Landforms**, Sussex, v. 47, n. 1, p. 109-128, 2022.

<http://dx.doi.org/10.1002/esp.5291>

TORRI, D.; BORSELLI, L. Water erosion. *In*: SUMNER, M. E. (ed.). **Handbook of Soil Science**. Washington: CRC Press, 2000.

TUCKER, G. E.; HANCOCK, G. R. Modelling landscape evolution. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 35, p. 28-50, 2010. <https://doi.org/10.1002/esp.1952>

USDA, SOIL CONSERVATION SERVICE. **Ephemeral gully erosion model EGEM**, Version 2.0 DOS User Manual, 1992.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; YONG, L. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, Amsterdam, v. 63, n. 2-3, p. 132-153, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>

VANDEKERCKHOVE, L.; POESEN, J.; GOVERS, G. Medium-term gully headcut retreat rates in southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements. **Catena**, Amsterdam, v. 50, n. 2-4, p. 329-352, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00132-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00132-7)

VANMAERCKE, M.; PANAGOS, P.; VANWALLEGHEM, T.; HAYAS, A.; FOERSTER, S.; BORRELLI, P.; ROSSI, M.; TORRI, D.; CASALI, J.; BORSELLI, L.; VIGIAK, O.; MAERKERL, M.; HARENGEWEYN, N.; DE GEETER, S.; ZGŁOBICK, W.; BIELDERS, C.; CERDA, A.; CONOSCENTI, C.; FIGUEIREDO, T.; EVANSS, B.; GOLOSOV, V.; IONITA, I.; KARYDAS, C.; KERTÉSZ, A.; KRASA, J.; LE BOUTEILIER, C.; RADONE, M.; RISTIC, R.; ROUSSEVA, S.; STANKOVIANSKY, M.; STOLTE, J.; STOLZ, C.; BARTLEY, R.; WILKINSON, S.; JARIHANI, B.; POESEN, J. Measuring, modelling and managing gully erosion at large scales: A state of the art. **Earth-Science Reviews**, v. 218, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103637>

VAZ, L. F. Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. **Solos e Rochas**, v. 19, n. 2, p. 117-136, 1996.

VERHEIJEN, F. G. A.; JONES, R. J. A.; RICKSON, R. J.; SMIT, C. J. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. **Earth-Science Reviews**, v. 94, n. 1-4, p. 23-38, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.02.003>

VIEIRA, A. F. G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM):** Principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais. 2008. 223 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

VIEIRA, V. S. **Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Carta Geológica Cachoeiro de Itapemirim, Folha SF24Z-V-A**. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 1997.

WAHBA, G. **Spline models for observational data**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1990. <https://doi.org/10.1137/1.9781611970128>

WANTZEN, K. M. Physical pollution: effects of gully erosion on benthic invertebrates in a tropical clear-water stream. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater**

Ecosystems, v. 16, n. 7, 2006. <https://doi.org/10.1002/aqc.813>

WELLS, R. R.; BENNETT, S. J.; ALONSO, C. V. Effect of soil texture, tailwater height, and pore-water pressure on the morphodynamics of migrating headcuts in upland concentrated flows. **Earth Surface Processes and Landforms**, Sussex, v. 34, n. 14, p. 1867-1877, 2009. DOI:10.1002/ESP.1871

WELLS, R. R.; MOMM, H. G.; RIGBY, J. R.; BENNETT, S. J.; BINGNER, R. L.; DABNEY, S. M. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows. **Catena**, Amsterdam, v. 101, p. 114-121, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.004>.

WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

WOODWARD, D. E. Method to predict cropland ephemeral gully erosion. **Catena**, Amsterdam, v. 37, n. 3-4, p. 393-399, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00028-4)

YILMAZ, K.; ÇELİK, İ.; KAPUR, S.; RYAN, J. Clay Minerals, Ca/Mg Ratio and Fe-Al-Oxides in Relation to Structural Stability, Hydraulic Conductivity and Soil Erosion in Southeastern Turkey. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**. v. 29, n. 1, p. 29-37, 2005. <https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol29/iss1/4>

ZACHAR, D. **Soil erosion**: Developments in Soil Science. Amsterdam: Elsevier, v. 10, 1982. 547p.

ZHANG, Y.; ZHAO, Y.; LIU, B.; WANG, Z.; ZHANG, S. Rill and gully erosion on unpaved roads under heavy rainfall in agricultural watersheds on China's Loess Plateau. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 284, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106580>