

**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.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Erosão do solo

A erosão do solo é um processo de desagregação e transporte de partículas do solo ou de fragmentos de rocha pela ação das chuvas, gravidade, vento, e outros agentes naturais ou antropogênicos (SELBY, 1993; VERHEIJEN *et al.*, 2009; GANASRI; RAMESH, 2016), que ocorre quando há um desequilíbrio entre vegetação, solo e clima (LAL, 1990). O processo erosivo como um todo ocorre em duas etapas. Na primeira, ocorre a desagregação e remoção das partículas e na segunda etapa, ocorre o transporte dessas partículas até que a capacidade de transporte do meio seja insuficiente para deslocá-las (FENDRICH, 1997; GUERRA, 2008; MORGAN, 2005), resultando numa terceira etapa, que caracteriza o processo de deposição de sedimentos.

Em áreas com clima tropical, como é o caso do Brasil, os principais processos de degradação do solo são ocasionados pela erosão hídrica que ocorre em nível de vertente (DECHEN *et al.*, 2015). Os processos hidrológicos atuam na vertente através dos mecanismos de infiltração e escoamento da água, gerando fluxo em superfície e subsuperfície (GUERRA, 2008; SELBY, 1993). Contudo, antes mesmo da água da chuva escoar pela superfície, pode acontecer a erosão por salpicamento ou respingo, também conhecida como *splash*. Esse processo é gerado pelo impacto das gotas de chuva no solo e sua intensidade depende da energia cinética das gotas de chuva e da erodibilidade do solo, podendo ocasionar a ruptura dos agregados e formar crostas na superfície do solo através do rearranjo e compactação das partículas (FARRES, 1978; LAL, 1990; BRESSON; VALENTIN, 1993; FENDRICH, 1997; GUERRA, 1999; ROTTA; ZUQUETTE, 2015). Esse processo resulta em uma “película de selamento”, que reduz significativamente a permeabilidade superficial e, conseqüentemente, resulta no aumento do fluxo superficial.

O escoamento superficial é iniciado quando a intensidade da chuva excede a taxa de infiltração do solo (HORTON, 1945). A água pode se deslocar de diferentes formas de acordo com a topografia local, podendo gerar dois tipos de fluxo: “laminar” e “linear” (GUERRA, 1999; BIGARELLA; MAZUCHOWSKI, 1985). O fluxo laminar ocorre quando o escoamento superficial se distribui pela vertente de forma dispersa (sem se concentrar em canais), sendo responsável pela erosão em entressulcos

(*inter-rill*), enquanto o fluxo linear ocorre devido ao escoamento superficial concentrado, em função das irregularidades do terreno, sendo responsável pela erosão em sulcos (*rill*) (BAPTISTA, 1997; CARVALHO *et al.*, 2006).

O processo de remoção e transporte das partículas de solo gerado pela força de cisalhamento do fluxo passa a ser mais influente quando é concentrado em sulcos. Quando o fluxo adquire maior velocidade e turbulência o processo erosivo se intensifica, podendo gerar incisões lineares na superfície do solo na forma de ravinas e voçorocas, sendo este último o estágio mais avançado e complexo da erosão hídrica (DAEE/IPT, 1990; FERREIRA; FERREIRA, 2009).

Além dos processos citados anteriormente, ainda pode ocorrer a erosão interna ao solo devido ao fluxo subsuperficial da água, conhecida como *piping*. O *piping* (ou erosão tubular) consiste na dissolução ou dispersão de partículas e carreamento das mesmas pelo interior do solo, formando “tubos” (*pipes*) (LAL, 1990; GUERRA, 2008). Esse processo pode atuar na formação e desenvolvimento das voçorocas através da coalescência e colapso dos túneis formados pela erosão, podendo resultar em grandes voçorocas (DAEE/IPT, 1990; SJÖRS, 2001; MORGAN, 2005; SELBY, 1993; LE ROUX; VAN DER WAAL, 2006; SHIT; BHUNIA; MAITI, 2013).

2.2 Voçorocas

No Brasil, o termo voçoroca ou boçoroca, tem origem indígena, sendo uma expressão tupi-guarani que significa “terra rasgada” (PICHLER, 1953).

Internacionalmente, o termo mais conhecido é *gully erosion*, devido à sua utilização em artigos publicados em língua inglesa. O uso mais antigo conhecido desse termo remonta ao ano de 1650, sendo originário da palavra francesa “goulet”, no sentido figurado de uma passagem estreita, e derivada do latim “gula”, significando garganta (COLLINS DICTIONARIES, 2014). Segundo Thwaites *et al.* (2022), além desses, outros termos são encontrados na literatura, tais como *barrancos*, *torrentera*, *calanchi*, *ovrag*, *dongas*, *ravines*, *wadis*, *gulches*, *draws*, *trenches*, *ramps*, *lavaka*, entre outros, listados por Zachar (1982).

2.2.1 Definição

Houve diversas tentativas de definir voçorocas nas perspectivas agrícola e

geomorfológica (THWAITES *et al.*, 2022). Assim, surgiram diferentes definições pela necessidade de caracterizar estas feições adequando-as aos diferentes tipos de voçorocas que ocorriam em cada local. Porém, a criação de diferentes definições para descrever voçorocas características de cada local resultou em definições contraditórias, confusas ou imprecisas. Isso gera confusão na compreensão e comunicação sobre os processos e formas relacionadas a erosão por voçorocas.

Marchioro e Ribeiro (2023) discutem sobre esse problema, também presente no Sinageo e na Revista Brasileira de Geomorfologia, destacando que isso pode dificultar a categorização intra-geomorfologia e entre as demais áreas do conhecimento científico nacional e internacional.

Inicialmente, surgiram definições mais conceituais e com diferentes possibilidades de interpretações, como a definição adotada pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos da América (*Soil Conservation Service* – SCS) que, segundo Fullen e Catt (2004), se baseava na capacidade de um cão-da-pradaria conseguir ou não saltar sobre a erosão, considerando a largura como característica determinante. Outras definições que levavam em conta a capacidade de equipamentos agrícolas atravessarem uma feição erosiva também foram adotadas por pesquisadores, como a Organização de Alimento e Agricultura (Food and Agriculture Organization – FAO, 1965), Hutchinson e Stoësz (1976), Hudson (1985) e Torri e Borselli (2000), sobretudo, em pesquisas focadas na erosão de áreas agrícolas.

Definições mais sofisticadas, com base na área da seção transversal, foram adotadas para padronizar um limiar do que seria considerado uma voçoroca, sendo reconhecido como voçoroca, uma incisão com área da seção transversal máxima igual ou maior que 0,1 m² ou 929 cm² (POESEN, 1993; TORRI; BORSELLI, 2000; MORGAN, 2005). Outros estudiosos preferiram considerar a profundidade da voçoroca como limiar para definir a feição erosiva, caracterizando-se como voçorocas as erosões com profundidade máxima igual ou maior que 0,5 m (BENNET, 1974; NSSH, 2008; SSSA, 2020).

No Brasil, Guerra (1999) assume o critério de profundidade e largura para definir voçorocas, assumindo que voçorocas são incisões no solo bem definidas, com largura e profundidade superiores a 0,5 m, podendo atingir centenas de metros de comprimento. Contudo, devido a presença de solos muito espessos no país, que

permitem a existência de voçorocas de dezenas de metros de profundidade, alguns trabalhos sugerem um valor de no mínimo 1,5 m de profundidade para a feição ser considerada como voçoroca (VIEIRA, 2008; FARIAS *et al.*, 2010).

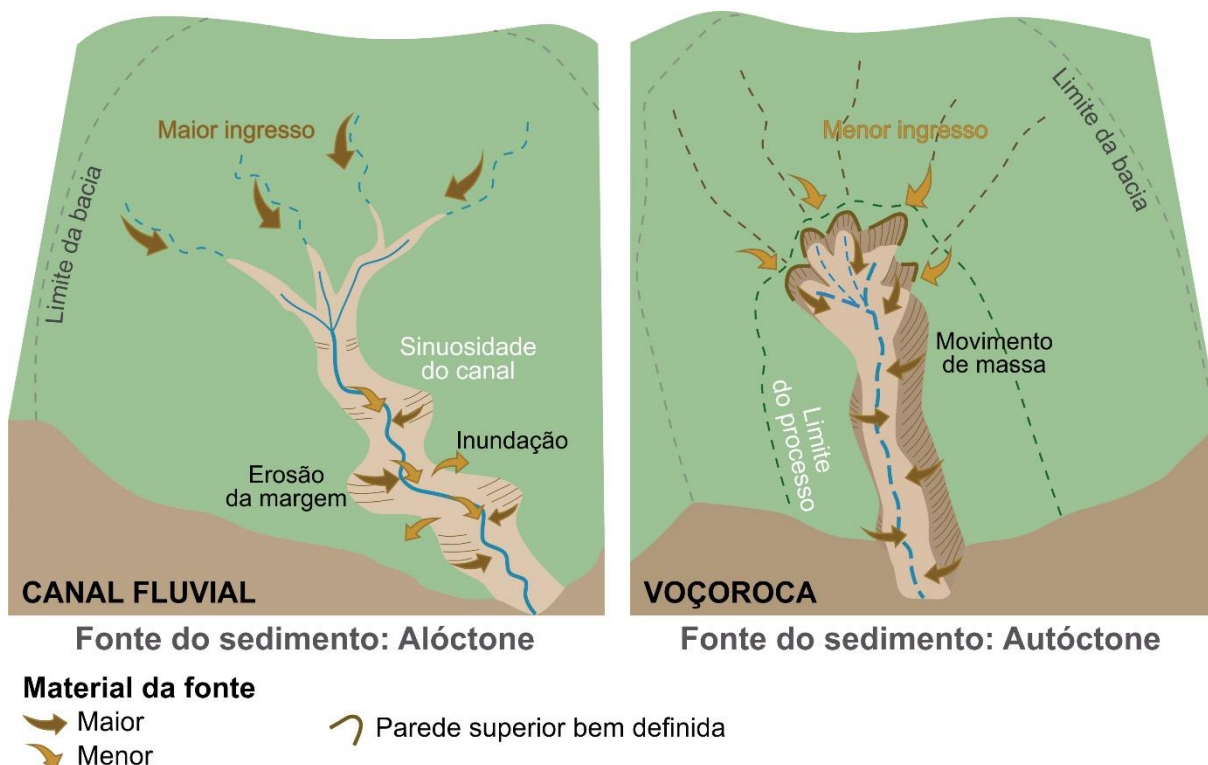
DAEE/IPT (1990) adotou outro critério para diferenciar voçorocas de ravinas, tornando-se também uma definição muito utilizada em pesquisas em diversas regiões do Brasil, principalmente para definir voçorocas geradas em áreas mais planas. De acordo com os autores, uma voçoroca, além de ter as dimensões citadas anteriormente, somente é considerada como tal, quando intercepta o lençol freático.

Diante de tantas definições diferentes, Thwaites *et al.* (2022) elaboraram uma definição ampla e geral, contemplando a maioria das características já descritas na literatura. De forma simplificada, Thwaites *et al.* (2022) consideraram como uma voçoroca, qualquer feição erosiva com paredes e/ou escarpas atingindo mais que 0,5 m de profundidade, tipicamente impulsionada por fluxos efêmeros associados à chuva direta na própria voçoroca e em sua área de captação, não sendo definida como um canal de fluxo de primeira ordem (ou maior), diferentemente das proposições de Horton (1945), que define voçorocas como erosão em canais de primeira ordem ou em cabeceiras fluviais. Além disso, de acordo com Thwaites *et al.* (2022), o recuo da escarpa está relacionado principalmente a movimentos de massa, tais como deslizamento, escorregamento, queda e fluxo de massa.

As principais diferenças entre uma voçoroca e um canal fluvial são apresentadas na Figura 1, onde observa-se que além das características citadas anteriormente, as voçorocas possuem fonte de sedimentos majoritariamente autóctone, relacionado a movimentos de massa por erosão hídrica e colapso das paredes.

Percebe-se que, a despeito das muitas definições de voçorocas, prevaleceu o critério dimensional. No entanto, as características genéticas e processos relacionados geralmente não possuem relação direta com as dimensões da feição, podendo variar de acordo com as características geomorfológicas, pedológicas e hidrológicas do local.

Figura 1 - Diferenças entre um canal fluvial e uma voçoroca.



Fonte: Adaptado de Thwaites *et al.* (2022).

2.2.2 Tipos de voçorocas e classificações

Diferentes condições locais, como o clima, classe de solo e uso e cobertura do solo, podem resultar em diferentes processos erosivos, culminando na formação e evolução de feições erosivas bem distintas (POESEN *et al.*, 2003). A voçoroca clássica, também conhecida como voçoroca permanente, seria o tipo de voçoroca mais comum, presente em diferentes locais, com vários processos erosivos atuantes e assumindo diferentes formas, sendo definida pela SSSA (2020) como canais muito profundos para serem apagados facilmente por equipamentos agrícolas, tipicamente variando de 0,5 a 25-30 m de profundidade.

Na década de 1980, o termo “voçoroca efêmera” (*ephemeral gully*) foi introduzido por Foster (1986) para caracterizar um outro tipo de voçoroca diferente das voçorocas permanentes, a qual ocuparia uma posição entre os sulcos e as voçorocas clássicas, considerando o *continuum* da evolução da feição erosiva (POESEN *et al.*, 2003). Embora essa definição se assemelhe as feições erosivas chamadas no Brasil de ravinas, considerada como uma feição superior a um sulco e inferior a uma voçoroca, ela não é totalmente compatível, pois as ravinas não seriam

consideradas voçorocas por alguns autores devido a características como a dimensão e profundidade (GUERRA, 1999) ou ao fato de não interceptar o lençol freático (DAEE/IPT, 1990). Além disso, as voçorocas efêmeras, como o próprio nome diz, ocorrem de forma efêmera, sendo a morfologia do canal periodicamente destruída por intervenção humana ou processos naturais e, posteriormente, reconstruída naturalmente, chamado por Bull e Kirkby (1997) de “voçorocas impermanentes” (*impermanent gullies*).

Ainda que o termo não tenha sido muito aderido no Brasil, a descrição desse tipo de voçoroca em diferentes locais, tais como, nos Estados Unidos da América, na Europa, Reino Unido, França, Bélgica, Alemanha, Portugal e Austrália (POESEN; VANDAELE; WESEMAEL, 1998) permitiu que as voçorocas efêmeras fossem reconhecidas como uma parte importante dos sistemas erosivos agrícolas. Embora voçorocas com caráter efêmero possam ocorrer naturalmente fora de terras cultivadas, esse termo passou a ser associado a voçorocas formadas em terras agrícolas durante períodos chuvosos, associada principalmente a erosão pelo fluxo superficial concentrado.

Poesen (1993) reconheceu outro tipo de voçoroca, a qual se formava quando o escoamento concentrado cruzava um “banco de terra” (depósito sedimentar não consolidado), e passou a considerar voçorocas de banco (*bank gullies*) como uma variação tipológica das voçorocas. Contudo, esse tipo de voçoroca pode ser considerada uma voçoroca permanente ou clássica, pois aparentemente se expande a montante pela migração da parede superior e se instala de forma permanente, não sendo facilmente reparada. Portanto, ela adquire essa terminologia apenas por se formar sobre um “banco de terra”. Segundo Poesen e Govers (1990), as voçorocas de banco podem se desenvolver rapidamente quando localizadas adjacentes aos depósitos sedimentares, onde o talude local é subvertical. No Brasil, esse tipo de voçoroca é comum nas regiões sul e sudeste, e está associada a depósitos sedimentares cenozoicos de origem aluvial ou coluvial, sendo muito frequente a incidência de processos de *piping* (IWASA; PRANDINI, 1982).

Outras classificações quanto a morfologia e conexão com a drenagem também podem ser encontrados na literatura. Ireland, Sharpe e Eagle (1939) classificaram as voçorocas quanto a forma em planta, considerando as formas linear, bulbosa, dendrítica, treliça, paralela e composta. Vieira (2008) também reconheceu algumas formas de voçorocas frequentemente encontradas no Brasil, mais especificamente em

Manaus, classificando-as em linear, bifurcada, ramificada, irregular e retangular, enquanto Augustin e Aranha (2006) adotaram as classes linear, dendrítica, composta e indefinida.

Além da forma em planta, Ireland, Sharpe e Eagle (1939) também classificaram as voçorocas de acordo com o formato da seção transversal, sendo reconhecido voçorocas com forma em “V” e “U”. Segundo os autores, essas formas estariam relacionadas ao estágio evolutivo das voçorocas.

Com relação a conexão da voçoroca com a drenagem, Oliveira (1989) separa as voçorocas em três classes: conectadas, desconectadas e integradas. De acordo com Meis, Coelho Netto e Moura (1985), Oliveira (1989) e Vieira (2008), as voçorocas conectadas a rede de drenagem estão associadas ao escoamento subsuperficial, *piping* e colapsos do solo, e poderiam ser consideradas canais de primeira ordem. Por outro lado, as voçorocas desconectadas são associadas, principalmente, a erosão pelo fluxo superficial da água e movimentos de massa, desenvolvendo-se, sobretudo, a montante (OLIVEIRA; MEIS, 1985; OLIVEIRA, 1989).

As voçorocas integradas estariam associadas tanto ao fluxo superficial da água, quanto ao fluxo subsuperficial, e apresentariam características de voçorocas conectadas e desconectadas a rede de drenagem. Oliveira, Lemos e Pinto (2023) mostram que voçorocas integradas podem resultar da evolução de voçorocas conectadas e desconectadas.

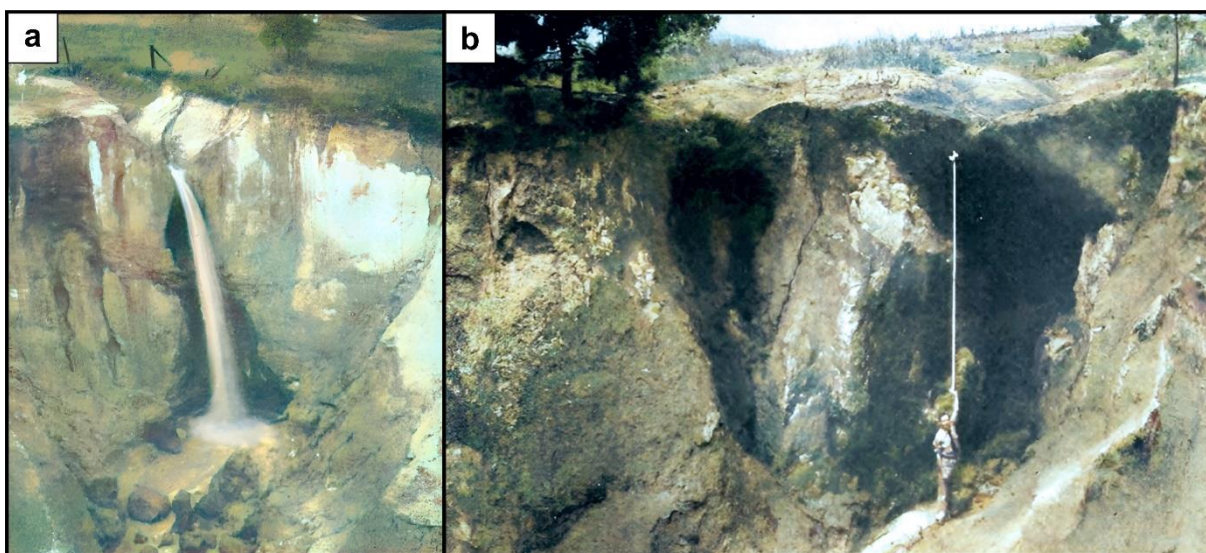
2.2.3 Processo erosivo e gênese de voçorocas

Como visto anteriormente, as voçorocas são feições erosivas complexas que podem se desenvolver por diversos processos e atingir diferentes formas e dimensões. A formação da voçoroca ocorre quando um limiar geomórfico é ultrapassado devido a fatores internos, como uma diminuição na resistência dos materiais, e a fatores externos, como o aumento da erosividade do escoamento (BOCCO, 1991).

Para alguns autores, a formação de uma voçoroca pode ocorrer pelo processo contínuo de erosão linear, de modo que, primeiramente, forma-se um sulco pelo fluxo concentrado e com o tempo esse sulco vai se aprofundando até chegar as dimensões de uma voçoroca (GUERRA, 1999). Ao atingir maiores profundidades, a erosão acaba gerando paredes nas laterais e na porção superior da feição erosiva.

Segundo Ireland, Sharpe e Eagle (1939) e a FAO (1965), os processos erosivos, tais como a erosão dos sedimentos por água corrente no fundo e nas laterais da voçoroca e o fluxo concentrado na parede superior gerando “cachoeiras” (efeito *plunge pool*) (Figura 2), podem ocorrer isoladamente ou simultaneamente. Esse último resulta na formação de alcovas, que contribuem para o colapso das paredes da voçoroca (Figura 3) (IRELAND; SHARPE; EAGLE, 1939; FAO, 1965; BURKARD; KOSTASCHUK, 1995; CHEN *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2019; GAO *et al.*, 2021).

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).

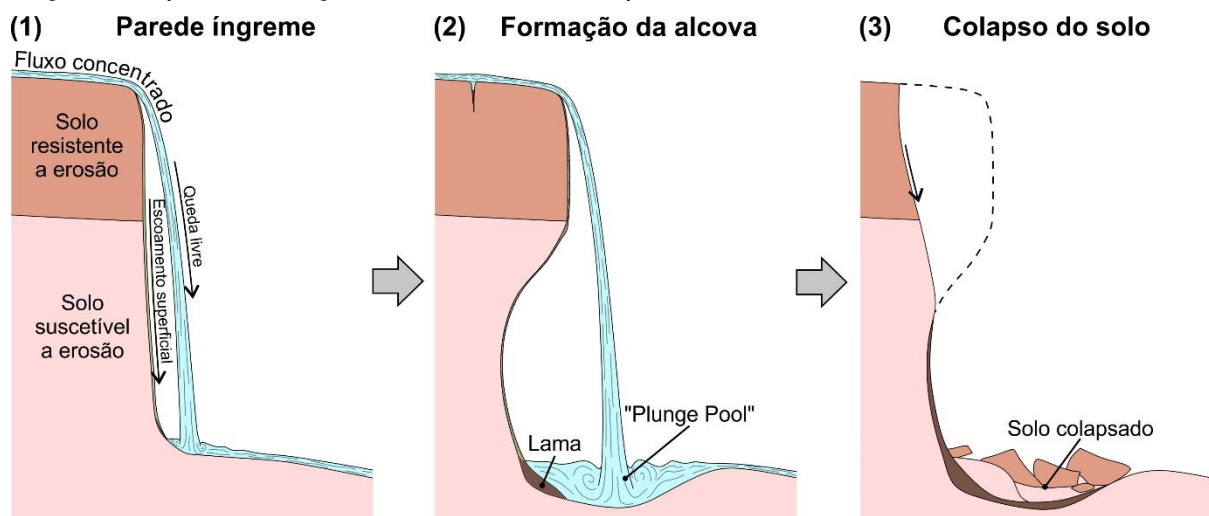


Fonte: Adaptado de Ireland, Sharpe e Eagle (1939).

O processo de *piping* ou a saturação do solo por chuvas prolongadas e infiltrações concentradas também podem contribuir para o colapso das paredes e recuo da cabeceira da voçoroca (POESEN *et al.*, 2003). A estabilização do fundo da voçoroca ocorre quando o leito rochoso, o lençol freático ou uma camada mais resistente é atingida (IRELAND; SHARPE; EAGLE, 1939; ANDERSON; ROWNTREE; ROUX, 2021).

O conceito de estágios de desenvolvimento da voçoroca foi inicialmente proposto por Ireland, Sharpe e Eagle (1939). Os estágios de desenvolvimento foram baseados nos processos que ocorriam nas voçorocas encontradas pelos autores, onde um solo resistente se sobrepõe a um solo de alteração suscetível à erosão.

Figura 3 - Principais etapas do processo de migração da parede superior das voçorocas pela formação de alcovas e colapso do solo.



Fontes: Modificado de Ireland, Sharpe e Eagle (1939).

De acordo com Ireland, Sharpe e Eagle (1939), o primeiro estágio consiste no desenvolvimento de um canal esculpido no solo superficial em forma de “V”. O segundo estágio começa quando a erosão atinge o solo de alteração (horizonte C), desenvolvendo uma parede íngreme na parte superior da voçoroca, que começa a migrar à montante, e o perfil transversal da voçoroca assume a forma de “U”. Em seguida, ocorre um período de reajuste, caracterizando o terceiro estágio, onde o intemperismo, erosão hídrica e movimentos de massa remodelam lentamente as encostas e as paredes íngremes da voçoroca, formando encostas mais suaves com acúmulo (provisório) de detritos na base. Por fim, o quarto estágio, ocorre quando a vegetação se estabelece na voçoroca, indicando sua estabilização. Contudo, a estabilização pode ser apenas temporária e, sob determinadas condições, a voçoroca pode voltar ao seu estágio ativo.

2.4 Modelagem numérica de voçorocas

A compreensão de como ocorre a evolução espaço-temporal das voçorocas é fundamental para desenvolver planos de prevenção e mitigação do processo erosivo em voçorocas. Entretanto, abordagens convencionais para a quantificação e análise da erosão do solo por meio de medições diretas exigem muito tempo e recursos, sendo incapazes de descrever com detalhes a evolução espaço-temporal do processo em toda a encosta (KETEMA; DWARAKISHA, 2019). Portanto, a utilização de

modelos matemáticos pode auxiliar na compreensão da morfodinâmica das encostas e do processo erosivo de forma mais detalhada.

2.3.1 Principais modelos existentes

Segundo Vanmaercke *et al.* (2021), a previsão das taxas de erosão de voçorocas e seu impacto nas cargas de sedimento envolve vários desafios. É importante saber o local e quando que o processo se inicia, como se desenvolve ao longo do tempo e no espaço, e quando que a feição erosiva atingirá “estabilidade”.

Apesar de existir vários modelos da erosão de voçorocas, ainda não existe um modelo único capaz de responder essas três perguntas (VANMAERCKE *et al.*, 2021). Alguns exemplos de modelos desenvolvidos para erosão de voçorocas são o *Ephemeral Gullies Erosion Model* (EGEM), *Tillage-Induced Ephemeral Gully Erosion Model* (TIEGEM) e *Channel-Hillslope Integrated Landscape Development* (CHILD).

Segundo Vanmaercke *et al.* (2021), o Modelo da Erosão de Voçorocas Efêmeras (EGEM) (USDA, 1992; WOODWARD, 1999) foi elaborado para prever o desenvolvimento de voçorocas, mas as avaliações de campo revelaram falhas importantes. O Modelo da Erosão de Voçorocas Efêmeras de Cultivo Induzido (TIEGEM) (GORDON *et al.*, 2007), acoplado dentro do modelo de simulação *Annualized AGricultural Non-point Source* (AnnAGNPS), tende a apresentar melhor desempenho em relação ao EGEM, porém, ainda não foi amplamente testado.

De acordo com Roberts *et al.* (2022), existem poucos modelos de voçorocas clássicas devido, principalmente, à compreensão limitada dos processos físicos e à alta variabilidade nas taxas de erosão. Alguns modelos existentes listados por Roberts *et al.* (2022) são o CHILD, *Sediment River Network* (SedNet), e DIMGUL e STABGUL, que são variações do *Gully Thermo-Erosion and Erosion Model* (GULTEM). Dentre os poucos modelos existentes, a maioria captura apenas uma característica dos processos erosivos em voçorocas.

Para voçorocas permanentes, o modelo CHILD (FLORES-CERVANTES; ISTANBULLUOGLU; BRAS, 2006) apresentou bons resultados, sendo observado taxas de recuo da cabeceira da voçoroca relativamente compatíveis com a realidade de campo (CAMPO-BESCÓS *et al.*, 2013).

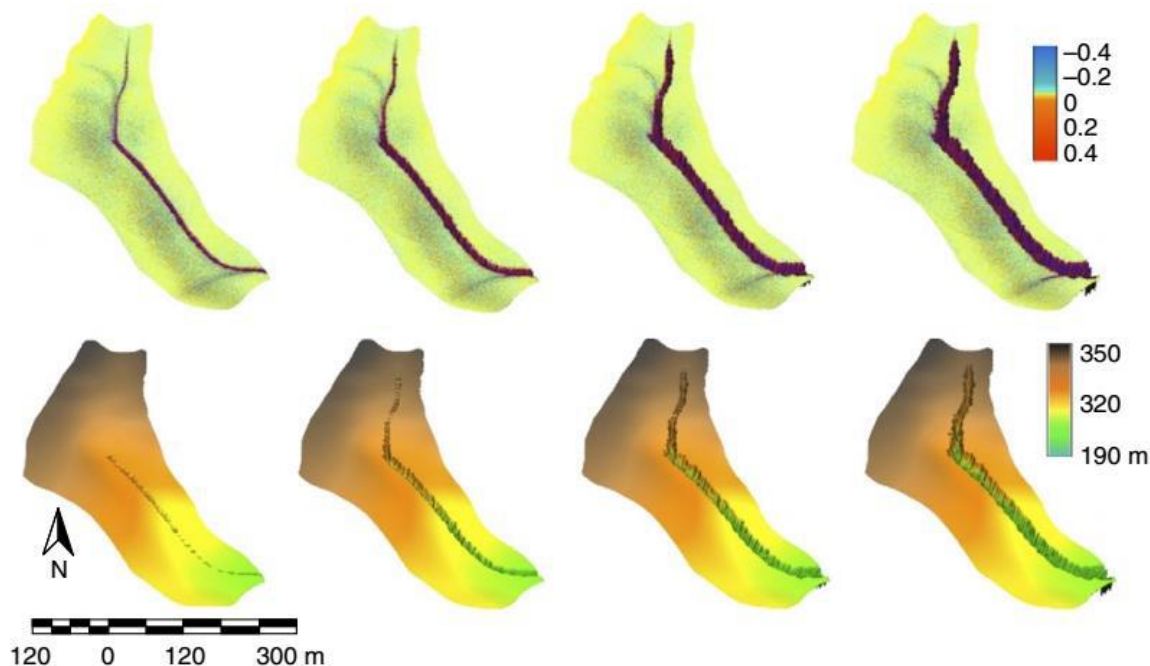
Ambos os modelos, TIEGEM e CHILD, podem ser úteis para determinadas finalidades. Contudo, o modelo TIEGEM permite estimar apenas parâmetros

unidimensionais ao longo do tempo, como a profundidade, comprimento e volume de solo erodido. O modelo CHILD é capaz de simular a evolução da paisagem em função dos principais processos que modificam o relevo, porém, o modelo foi desenvolvido para capturar a evolução da paisagem ao longo de centenas a milhares de anos (MITASOVA *et al.*, 2013).

De forma parecida ao modelo CHILD, o modelo SIBERIA apresentou bons resultados de simulações da evolução da paisagem pelo processo erosivo em simulações ao longo de centenas de anos (HANCOCK; WILLGOOSE; EVANS, 2002; HANCOCK; TURLEY, 2006; HANCOCK *et al.*, 2010; BRANCHES, 2015; ATCHLEY *et al.*, 2019; PEROOR *et al.*, 2019). Essa escala de tempo incompatível com o tempo que a maioria das voçorocas se desenvolve tornam os modelos inapropriados para simular o processo de erosão em voçorocas.

Os modelos de erosão do solo mais difundidos como, por exemplo, a Equação Universal da Perda de Solo (*Universal Soil Loss Equation* - USLE) e sua versão revisada (*Revised Universal Soil Loss Equation* - RUSLE), consideram a variabilidade espacial da erosão, mas não são capazes de simular os principais processos erosivos associados a erosão de voçorocas (CAPRA, 2013). Outros modelos como o Projeto de Predição da Erosão Hídrica (*Water Erosion Prediction Project* - WEPP) e o Modelo Europeu de Erosão do Solo (*European Soil Erosion Model* - EUROSEM) que apresentavam potencial para modelar a erosão de voçorocas não geraram resultados satisfatórios (BOARDMAN, 2006). Como esses e outros modelos de erosão mais difundidos não foram compatíveis com o processo erosivo que ocorre em voçorocas, Koco (2011) optou por utilizar o modelo *Simulation of Water Erosion* (SIMWE) e obteve resultados interessantes ao aplicar o modelo para simular a evolução espaço-temporal de uma voçoroca (Figura 4), mostrando o potencial do modelo para simular a evolução espaço-temporal destas feições.

Figura 4 - Evolução temporal de uma voçoroca em uma encosta na cidade de Vel'ký 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 (*knickpoints*), migração do processo erosivo à montante e incisão do sulco e, finalmente, alargamento da voçoroca.



Fonte: Mitasova *et al.* (2013) e Koco (2011).

2.3.2 Modelo SIMWE

2.3.2.1 Características do modelo

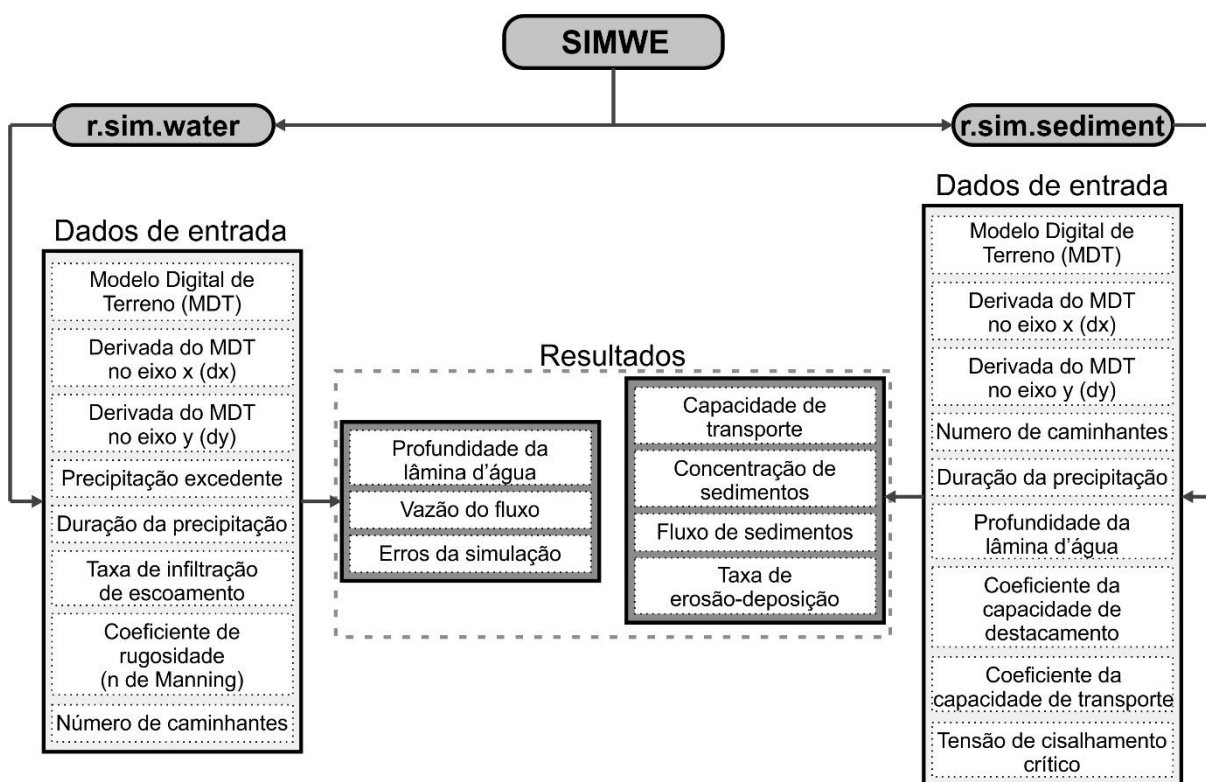
O SIMWE é um modelo baseado na física do escoamento superficial raso e fluxo de sedimentos, que utiliza os princípios fundamentais do modelo desenvolvido para o Projeto de Predição da Erosão Hídrica (*Water Erosion Prediction Project – WEPP*) (FLANAGAN; LIVINGSTON, 1995), mas assumindo as irregularidades tridimensionais da superfície.

Para resolver as equações de continuidade e onda difusa 2-D, o SIMWE utiliza o método de amostragem por caminho da função Green de Monte Carlo (MITAS; MITASOVA, 1998; MITASOVA *et al.*, 2004). O modelo leva em consideração uma topografia espacialmente variável, parâmetros físicos do solo, cobertura do solo e parâmetros de chuva, possuindo duas componentes. A primeira simula o escoamento

superficial da água, resultando na altura da lâmina d'água e descarga do fluxo, e a segunda, simula a erosão do solo, resultando no fluxo de sedimentos e taxa de erosão-deposição efetiva (MITAS; MITASOVA, 1998).

As componentes da simulação estão integrados no software GRASS - *Geographic Resources Analysis and Support System* em dois módulos: o *r.sim.water*, que simula o fluxo de água superficial, e o *r.sim.sediment*, que simula a taxa de erosão e deposição efetiva. Os dados de entrada e resultados de saída de cada um dos módulos pode ser conferido na Figura 5.

Figura 5 - Organograma dos dados de entrada e mapas de saída dos módulos *r.sim.water* e *r.sim.sediment* do modelo SIMWE.

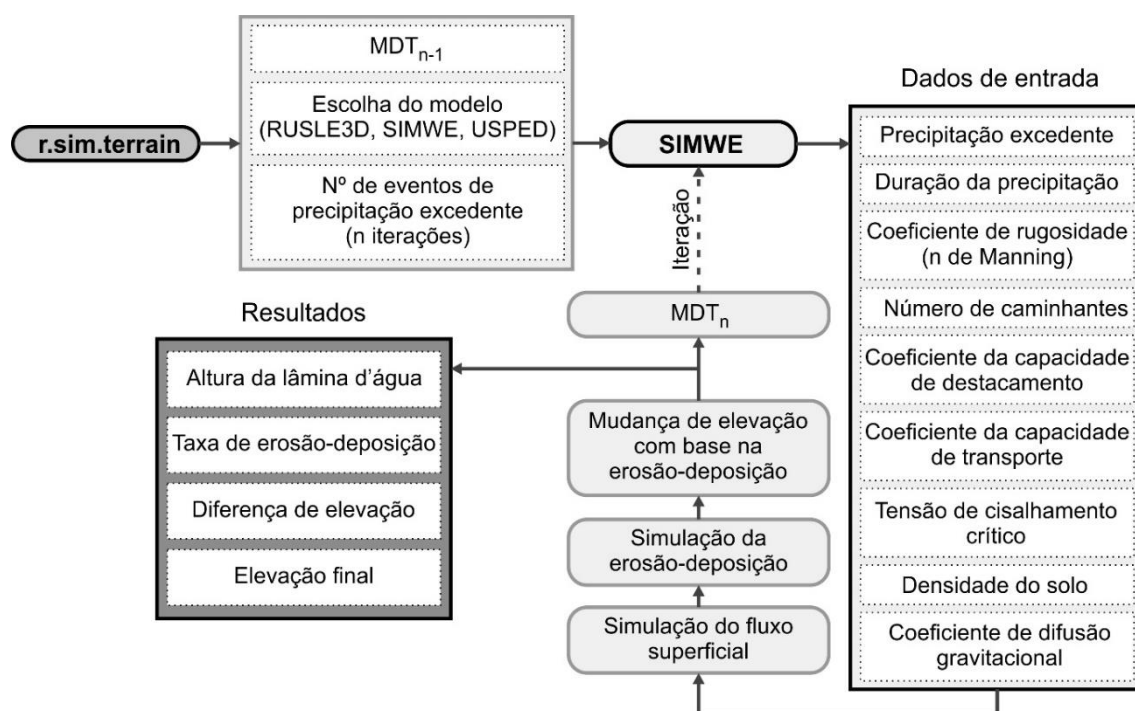


Fonte: Elaborado pelo autor.

Um outro módulo chamado *r.sim.terrain* (*Dynamic Landscape Evolution Model*), desenvolvido por Harmon *et al.* (2019), engloba os dois módulos do SIMWE e incorpora um cálculo da mudança da elevação baseado nas taxas de erosão e deposição estimadas com o SIMWE para um evento ou uma série de eventos de precipitação. A utilização do módulo *r.sim.terrain* é muito mais prática do que a utilização dos módulos *r.sim.water* e *r.sim.sediment*. No entanto, o *r.sim.terrain* apresenta limitações que não estão presentes nos módulos *r.sim.water* e

r.sim.setiment, como a menor variabilidade de mapas resultantes da modelagem (Figura 6), menor quantidade de atributos que podem ser modificados e limite inferior para o número de caminhantes¹ que pode ser utilizado. O r.sim.terrain também permite simular a evolução da paisagem através dos modelos USPED e RUSLE além do SIMWE. Contudo, neste trabalho foram feitas simulações utilizando apenas o modelo SIMWE.

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Harmon *et al.* (2019), para cada iteração do algoritmo (evento de chuva simulado), o r.sim.terrain calcula as derivadas parciais de primeira ordem da superfície de elevação, simula a altura da lâmina d'água, o fluxo de sedimentos e a taxa efetiva de erosão-deposição, finalizando com a geração de uma nova superfície de elevação com base na taxa de erosão-deposição e difusão gravitacional. Ainda segundo os autores, quando o tempo da simulação for menor que o tempo de

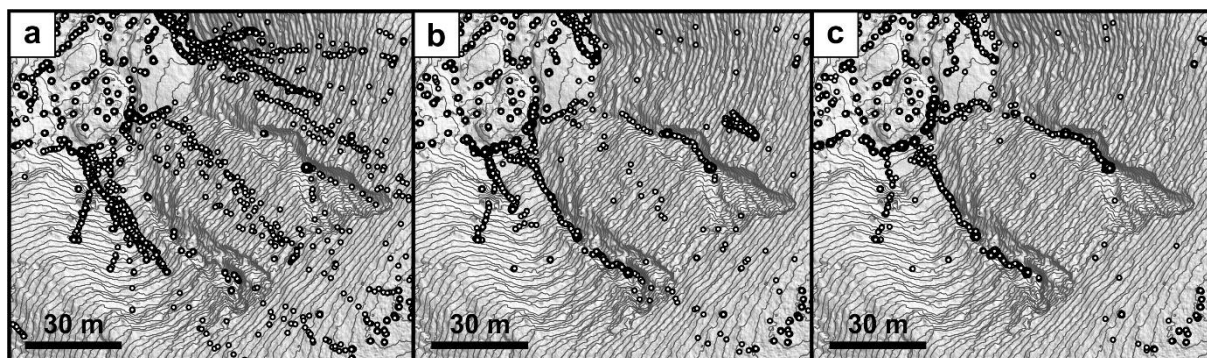
¹ Quantidade de pontos de amostragem utilizados na simulação através do método de amostragem por caminho da função Green de Monte Carlo

concentração² na bacia, a simulação irá considerar um regime de fluxo variável em função do tempo. Em simulações com duração maior que o tempo de concentração o modelo simulará um regime de fluxo estacionário (sem variação temporal).

2.3.2.2 Método e equações fundamentais

O método de amostragem por caminho da função Green de Monte Carlo é utilizado para resolver as equações de continuidade e onda difusa 2-D. Esse método considera um determinado número de partículas (pontos de amostragem), também chamado de caminhantes (*walkers*), que são distribuídos em diferentes pontos sobre o Modelo Digital de Terreno (MDT) (Figura 7).

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esses pontos são propagados de acordo com a função Green, gerando uma série de caminhos de amostragem, e a média dessas amostras fornece uma estimativa da solução real (MITAS; MITASOVA, 2004).

De acordo com Mitas e Mitasova (2004), para simular o fluxo superficial da água, o modelo SIMWE considera os parâmetros topográficos, solo, cobertura do solo e precipitação (especialmente variáveis), e utiliza o método de amostragem por caminho de Monte Carlo para resolver a equação de continuidade do fluxo da água (Equação 1):

² Tempo necessário para que a precipitação excedente no ponto mais distante da bacia alcance o seu exutório.

$$\frac{\varepsilon_w}{2} \nabla^2 h^{5/3} + \nabla \cdot (n^{-1} h^{5/3} s^{1/2} s_0) = i_e \quad (1)$$

onde, ε_w é uma variável espacial do coeficiente de difusão da água [$m^{4/3} s^{-1}$], h é a altura da lâmina d'água [m], n é o coeficiente de rugosidade de Manning, s é a declividade (adimensional), s_0 é o vetor unitário na direção da inclinação e i_e é a taxa de precipitação excedente [$m s^{-1}$]. O termo $\nabla^2[h^{5/3}]$ é utilizado para produzir uma aproximação do efeito de ondas difusas.

A solução assume que a velocidade do fluxo da água é controlada pela inclinação do terreno e pela rugosidade da superfície, e que sua mudança em um determinado local durante o evento simulado é desprezível (Harmon *et al.*, 2019).

Em seguida, o modelo calcula o fluxo de sedimentos (q_s) através do produto da concentração de sedimentos, massa por partícula de sedimento e velocidade do fluxo (Equação 2).

$$q_s = \rho_p c h v \quad (2)$$

onde, q_s é a taxa do fluxo de sedimentos [$kg m^{-1} s^{-1}$], ρ_p é a massa por partícula de sedimento [$kg partícula^{-1}$], c é a concentração de sedimentos [$partícula m^{-3}$] e v é a velocidade do fluxo [$m s^{-1}$].

A taxa de erosão-deposição efetiva (d_s) é calculada como a divergência do fluxo de sedimentos (Equação 3):

$$-\frac{\varepsilon_s}{2} \nabla^2 \varrho \cdot (\varrho v) + \varrho \frac{D_C}{T_C} |v| = d_s \quad (3)$$

onde, ε_s é a constante de difusão dos sedimentos [$m^2 s^{-1}$], $\varrho = \rho_s c h$ é a massa de sedimento transportado pela água por unidade de área [$kg m^{-2}$], D_C é a capacidade de destacamento [$kg m^{-2} s^{-1}$], T_C é a capacidade de transporte [$kg m^{-1} s^{-1}$] e d_s é a taxa de erosão-deposição efetiva [$kg m^{-2} s^{-1}$].

Assim como na equação de continuidade do fluxo da água, nessa equação, também é considerado um termo de difusão, que é proporcional a massa de sedimentos carregados pela água por unidade de área ($\nabla^2 \varrho$).

D_C e T_C são calculados através das Equações 4 e 5:

$$D_C = K_d (\tau - \tau_{cr})^b \quad (4)$$

$$T_C = K_t n^{-1} g_w h^m (\sin \beta)^n \quad (5)$$

onde, K_d é a erodibilidade efetiva (coeficiente da capacidade de destacamento) [$s m^{-1}$], definida como o aumento no desprendimento do solo por unidade de aumento na tensão de cisalhamento do fluxo de água (ALBERTS *et al.*, 1995), K_t é o coeficiente

da capacidade de transporte efetiva [s], τ é a tensão de cisalhamento [Pa = kg m⁻²] determinada pela Equação 6, τ_{cr} é a tensão de cisalhamento crítica [Pa], n é o coeficiente da rugosidade de Manning, g_w é a pressão hidrostática unitária da água, h é a altura da lâmina d'água [m], β é a declividade da superfície [graus], os coeficientes b , m e n são coeficientes empíricos.

$$\tau = g_w h \sin \beta \quad (6)$$

Por fim, calcula-se a nova elevação com base nas taxas de erosão-deposição efetiva e densidade dos sedimentos (Equação 7):

$$\frac{\partial z}{\partial t} = (-\nabla \cdot q_s) \rho_s^{-1} = d_s \rho_s^{-1} \quad (7)$$

onde z é a elevação [m], t é o tempo [s], q_s é o fluxo de sedimentos por unidade de largura (vetor) [kg m⁻¹ s⁻¹] e ρ_s é a densidade do sedimento [kg m⁻³].

Na topografia alterada, ainda é aplicado uma difusão gravitacional para simular os efeitos de suavização do transporte localizado do solo entre os eventos de chuva (Equação 8):

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \varepsilon_g \nabla^2 z \quad (8)$$

onde, ε_g é o coeficiente de difusão gravitacional [m² s⁻¹] e $\nabla^2 z$ é o Laplaciano da elevação. De acordo com Thaxton (2004), a mudança na elevação devido a difusão gravitacional é função do coeficiente de difusão e do Laplaciano da elevação.

As equações aqui descritas podem ser encontradas em Harmon *et al.* (2019) e maiores detalhes sobre a função Green de Monte Carlo e sobre a solução das equações descritas podem ser encontrados em Mitas e Mitasova (1998) e Mitasova *et al.* (2004).

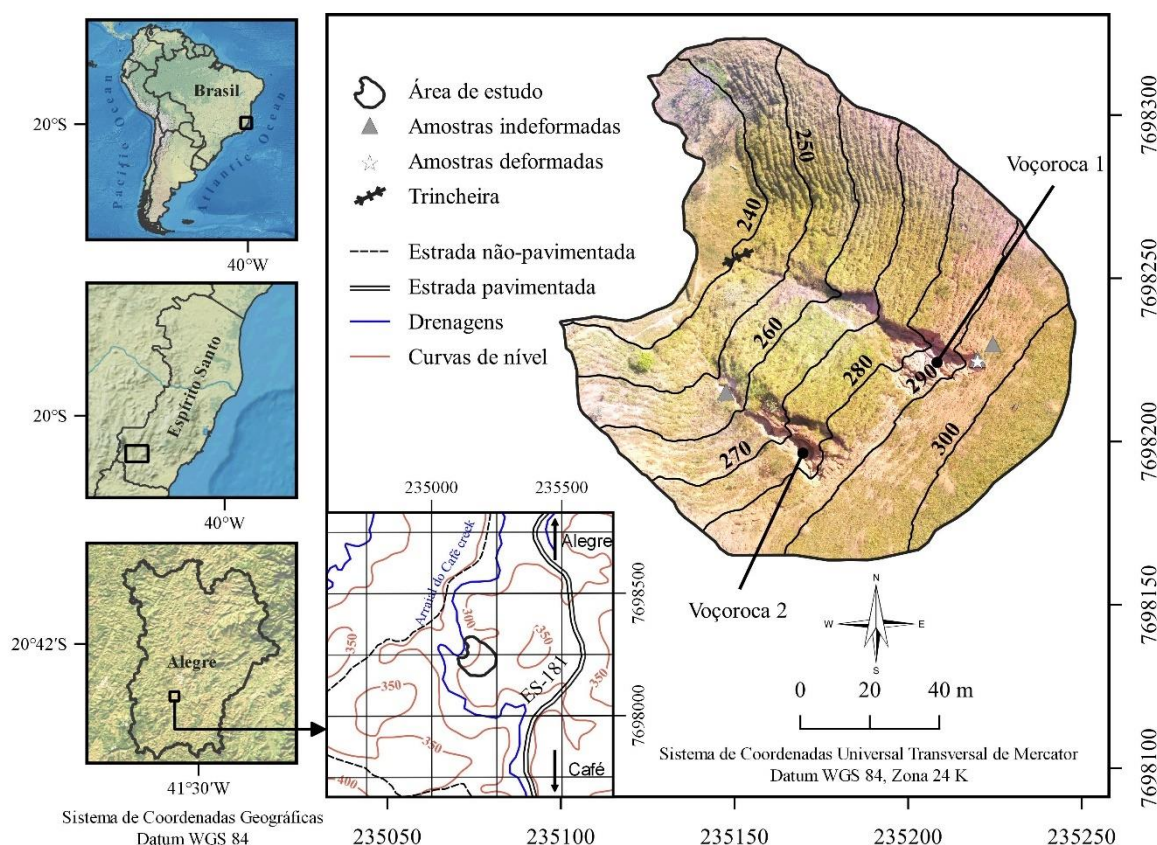
3 ÁREA DE ESTUDOS

3.1 Localização geográfica

A área de estudos encontra-se às margens do km 6 da ES-181 que liga a cidade de Alegre ao distrito de Café, sul do Estado do Espírito Santo. A área de estudos compreende toda a área de drenagem da vertente, que apresenta aproximadamente 130 m de comprimento do topo até a base e área igual a 15.176 m², sendo delimitada

pelo Ribeirão Arraial do Café. Trata-se de uma encosta íngreme com declividade média de 30,9° e variação altimétrica entre 236 e 305 m, onde estão esculpidas duas voçorocas lineares (Figura 8).

Figura 8 - Localização da área de estudos, com indicação das voçorocas e locais de amostragem.

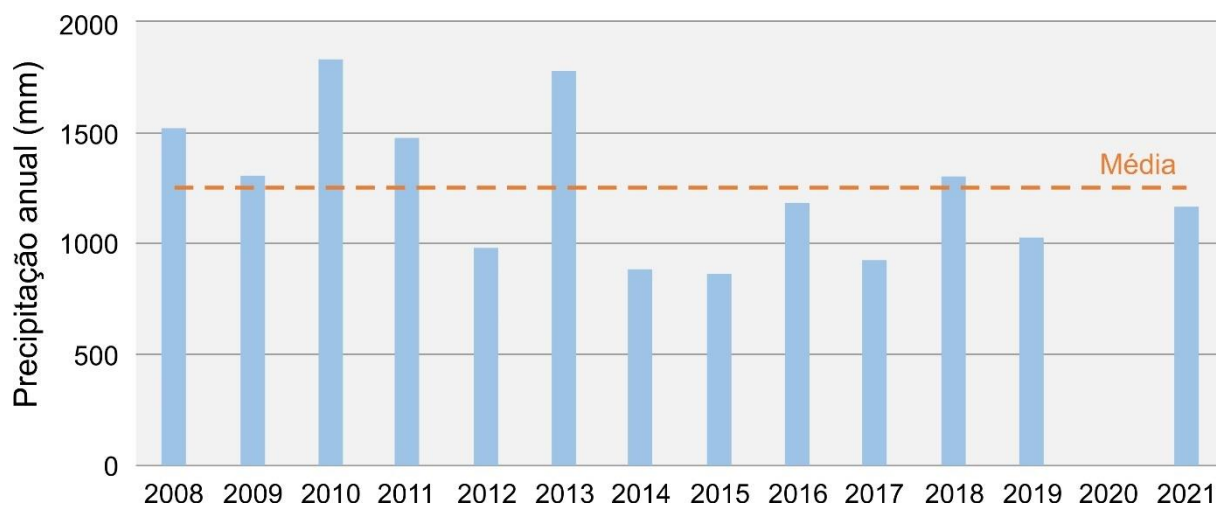


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 Regime pluviométrico

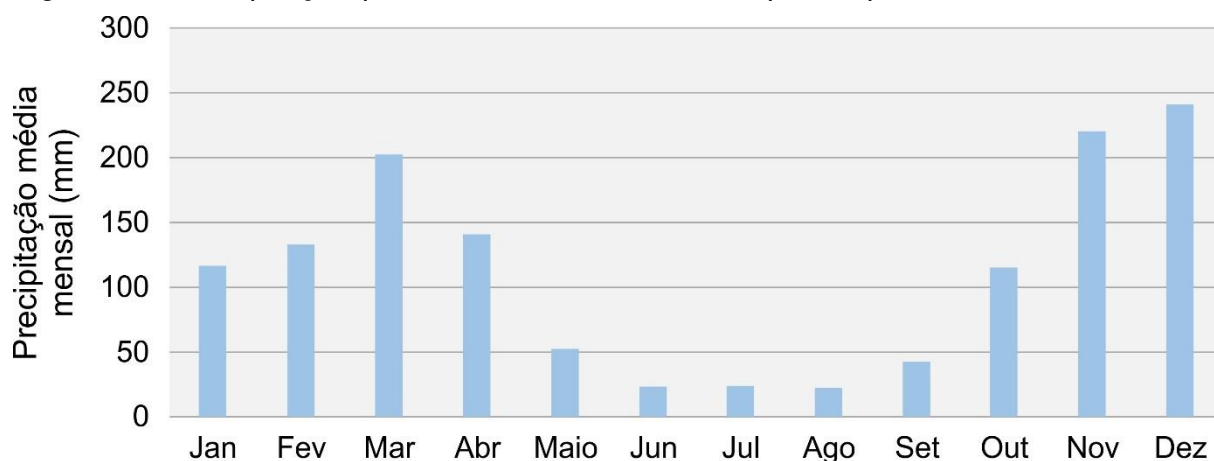
O clima da região é caracterizado por um inverno seco e verão chuvoso, com precipitação pluviométrica média anual de 1.341 mm e temperatura média anual de 23,1 graus Celsius (LIMA *et al.*, 2008). O regime pluviométrico dos últimos 14 anos (2007 a 2021) manteve-se entre 885 e 1.836 mm.ano⁻¹, com média igual a 1.253 mm.ano⁻¹ (Figura 9). As médias mensais da precipitação pluviométrica durante esse período são próximas das médias de 30 anos (1984 a 2014) divulgada pelo Incaper (2022), sendo novembro e dezembro os meses mais chuvosos, enquanto junho, julho e agosto são os meses mais secos (Figura 10).

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Precipitação pluviométrica média mensal para o período de 2008 a 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os meses de fevereiro, março e abril apresentam pequenos períodos chuvosos, com média da precipitação pluviométrica mensal geralmente inferior aos meses de novembro e dezembro (Figura 10), mas que podem atingir elevados volumes de chuva em poucas horas ou minutos, semelhante ao que ocorre no município de Vila Velha, próximo a capital do Espírito Santo (MARCHIORO; SILVA; CORREA, 2016). Esses elevados volumes de chuva estão relacionados a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que tem forte atuação entre as regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil entre os meses de outubro a abril (ANDRADE, 2011).

3.3 Geologia

A área de estudos está localizada na porção sul do Órogeno Araçuaí de idade Neoproterozoica (PEDROSA-SOARES; WIEDMANN-LEONARDOS, 2000), estando inserida dentro do Complexo Paraíba do Sul (OLIVEIRA *et al.*, 1983; VIEIRA, 1997; HORN *et al.*, 2007). De acordo com Hartwig e Alves (2022), o Complexo Paraíba do Sul e os solos sobrejacentes representam a unidade de mapeamento de maior incidência de voçorocas no município de Alegre.

O Complexo Paraíba do Sul é uma unidade geológica composta por paragnaisses de alto grau metamórfico que, localmente, podem estar milonitizados e migmatizados (OLIVEIRA *et al.*, 1983; VIEIRA, 1997). As rochas dessa unidade geológica foram submetidas a eventos tectônicos ao longo do período Pré-Cambriano e intensa deformação oriunda de esforços compressivos de direção SE-NW durante o Proterozoico Superior (OLIVEIRA *et al.*, 1983).

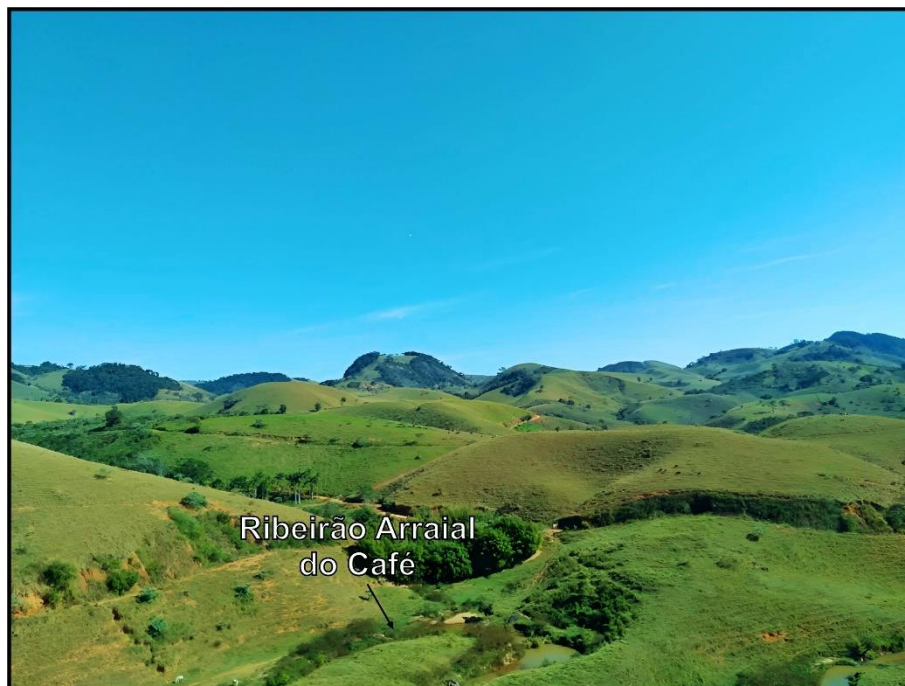
Vieira (1997) divide o Complexo Paraíba do Sul em 9 unidades (ps1 a ps9), sendo a unidade ps9 aflorante na área de estudos. Nessa unidade podem ser encontrados anfibólio-biotita gnaisses, gnaisses graníticos e granatíferos, lentes de quartzito xistoso e níveis de anfibolitos e rochas calcissilicáticas.

3.4 Geomorfologia

A região se encontra na faixa de dobramentos remobilizados, compondo parte dos Patamares Escalonados do Sul Capixaba (OLIVEIRA *et al.*, 1983), sendo caracterizada, principalmente, pela paisagem de morros arredondados em forma de domo com encostas convexas, conhecida como “Mares de Morros” (AB’SÁBER, 2012) (Figura 11).

Esse tipo de paisagem é o resultado de um conjunto de processos fisiográficos e ecológicos que resultaram na dissecação da paisagem na forma de domos (AB’SÁBER, 1970, 2012), sendo também caracterizada por ambientes tropicais úmidos a subúmidos, com intemperismo profundo e floresta tropical úmida (IBGE, 2012; EMBRAPA, 1978). Essa paisagem, quando desenvolvida em rochas granito-gnáissicas, geralmente está associada a latossolos vermelho-amarelo (EMBRAPA, 1978; OLIVEIRA *et al.*, 1983; CORRÊA, 1984; PACHECO *et al.*, 2018), o qual também ocorre na área de estudos.

Figura 11 - Paisagem de “mares de morros” na região da área de estudos (vista para noroeste).



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 Pedologia

Sobre as rochas do Complexo Paraíba do Sul, desenvolveram-se na bacia do Rio Alegre diferentes classes de solo, tais como argissolo vermelho e latossolo vermelho-amarelo, sendo os Latossolos os mais abrangentes na região da área de estudos (PACHECO, 2011). No mapeamento realizado por Cunha *et al.* (2016), na escala de 1:400.000, é indicado a presença de um nitossolo vermelho por toda a área de estudos. De acordo com Lani *et al.* (2001), Ab'Sáber (2012) e Pacheco *et al.* (2018), a espessura do solo saprolítico (horizonte C) tende a ser muito maior que a espessura dos horizontes subjacentes (horizontes A e B). No entanto, segundo Oliveira *et al.* (1983), na região próximo da cidade de Alegre, a alteração das rochas é pouco profunda. O horizonte saprolítico possui feições herdadas da rocha de origem e, geralmente, é mais suscetível a erosão, sendo comum a existência de sulcos e voçorocas nos cortes de estrada (CORRÊA, 1984; REZENDE; RESENDE, 1996).

3.7 Uso e cobertura da terra

Originalmente, a região era recoberta por Mata Atlântica semidecídua (IBGE, 2012). No entanto, atualmente, essa formação florestal encontra-se muito reduzida e fragmentada (NASCIMENTO, 2004), devido ao intenso desmatamento iniciado a partir da segunda década do século XIX para plantio de café e culturas de subsistência (NOVAES, 1970; LANI *et al.*, 2008), que foram, em grande medida, substituídas posteriormente por pastagens para pecuária bovina (SEAG, 2008). A ocupação da área rural representada majoritariamente por moradores ligados à pecuária e a agricultura familiar (principalmente a cafeicultura) é um dos vetores de desenvolvimento econômico do município.

Após a ocupação das áreas rurais do município em 1820, muitas famílias passaram a produzir café, tornando a prática da cafeicultura predominante até meados de 1930 (OLIVEIRA, 2009), quando a importância econômica do café passou a diminuir (SEAG, 2008). Com a redução da importância econômica do café, muitos produtores da região migraram para o setor pecuário (SEAG, 2008).

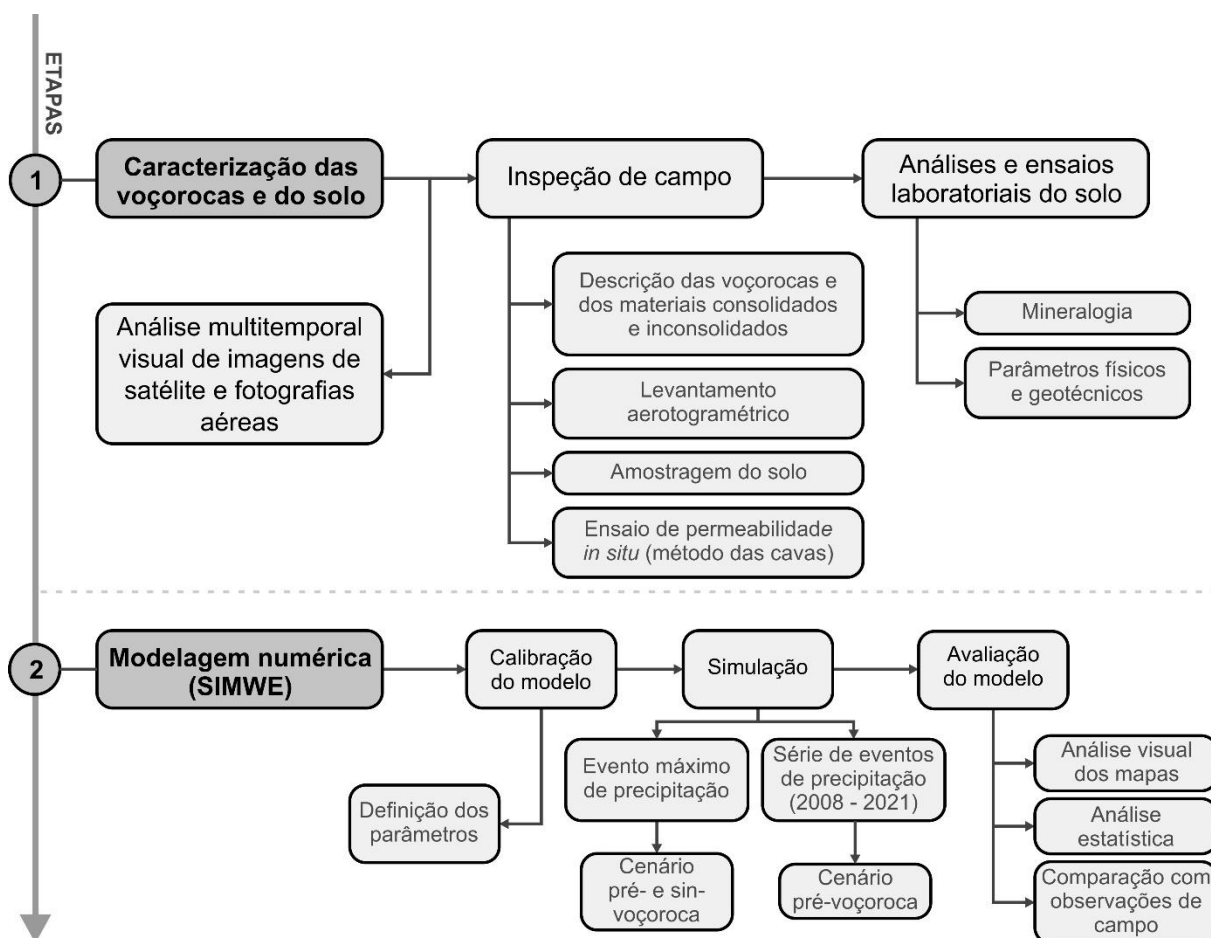
A produção extensiva de gado resultou em pastagens degradadas com a presença de terracetes³ paralelos e anastomosados em diversas encostas na região, inclusive na área de estudos. Hartwig e Alves (2022) identificaram pelo menos 73 voçorocas ativas no município de Alegre, sendo grande parte delas formadas em pastos e adjacentes a taludes de estradas vicinais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada compreendeu duas etapas principais (Figura 12). A primeira consistiu na caracterização das voçorocas e do solo, compreendendo o levantamento de campo, análises/ensaios laboratoriais e análise multitemporal de imagens de satélite e fotografias aéreas. A segunda etapa refere-se a modelagem numérica utilizando o modelo SIMWE, que foi dividida em calibração, execução e avaliação do modelo.

³ Pequenos degraus no terreno produzidos pelo efeito do pisoteio contínuo do gado

Figura 12 - Fluxograma metodológico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para realizar este trabalho foram utilizados os seguintes softwares:

- GRASS GIS 8.0;
- QGIS 3.10;
- ArcGIS 10.8 (Environmental System Research Institute - ESRI);
- Excel (Microsoft);
- Open Drone Map - WebODM;
- Google Earth Pro;
- PicWish.

O estudo foi realizado para uma escala inferior a 1:500, considerando uma encosta de dimensões 150 x 160 m em planta. No entanto, dados do solo e da pluviometria não puderam ser levantados nessa escala devido às limitações de coleta, sendo realizados pontualmente.

4.1 Caracterização das voçorocas e do solo

4.1.1 Levantamento de informações em campo

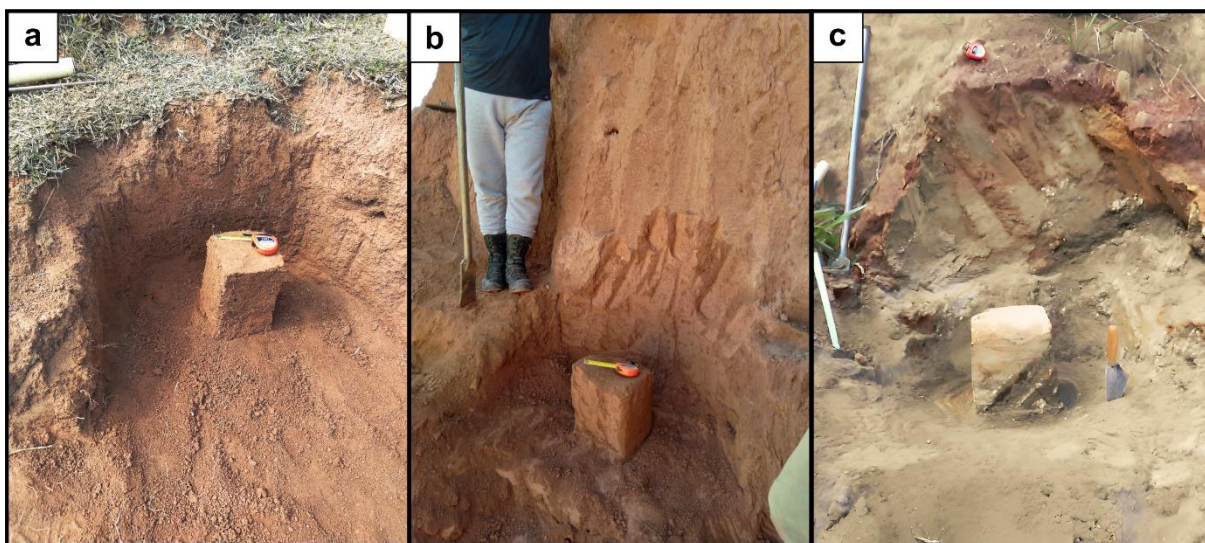
A inspeção de campo consistiu na descrição, classificação e análise dos materiais consolidados (substrato litológico) e inconsolidados (solos e depósitos sedimentares) presentes na área de estudos (APÊNDICE A). As inspeções de campo foram realizadas no período seco e no período chuvoso no intuito de verificar se havia influência da sazonalidade.

A descrição contemplou os materiais aflorantes nas paredes das voçorocas e nas margens do Ribeirão Arraial do Café. O depósito aluvial que ocorre no sopé da encosta e que está associado as voçorocas, foi descrito a partir de uma trincheira de área retangular (0,7 x 1,45 m) e profundidade de 1,30 m, escavada manualmente. Para caracterizar o solo em campo, seguiu-se o guia de descrição e classificação de Vaz (1996) e de Prado (1995). Porém, adotou-se o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (SANTOS *et al.*, 2018). Os principais critérios avaliados foram a cor⁴, estrutura, forma dos agregados, textura, plasticidade e resistência do solo.

Ainda na etapa de campo, foram coletadas duas amostras deformadas de solo na profundidade de 20 a 40 cm (horizonte A) para a caracterização mineralógica da fração areia e da fração argila, e três amostras indeformadas, sendo uma na profundidade de 20 a 40 cm (horizonte A) (Figura 13a), outra na profundidade de 2,2 a 2,4 m (horizonte B) (Figura 13b) e a terceira na profundidade de 2 m (horizonte C) (Figura 13c). As amostras indeformadas foram coletadas para a caracterização geotécnica do solo, que será descrita mais adiante.

⁴ Utilizou-se o sistema de cores de Munsell.

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.

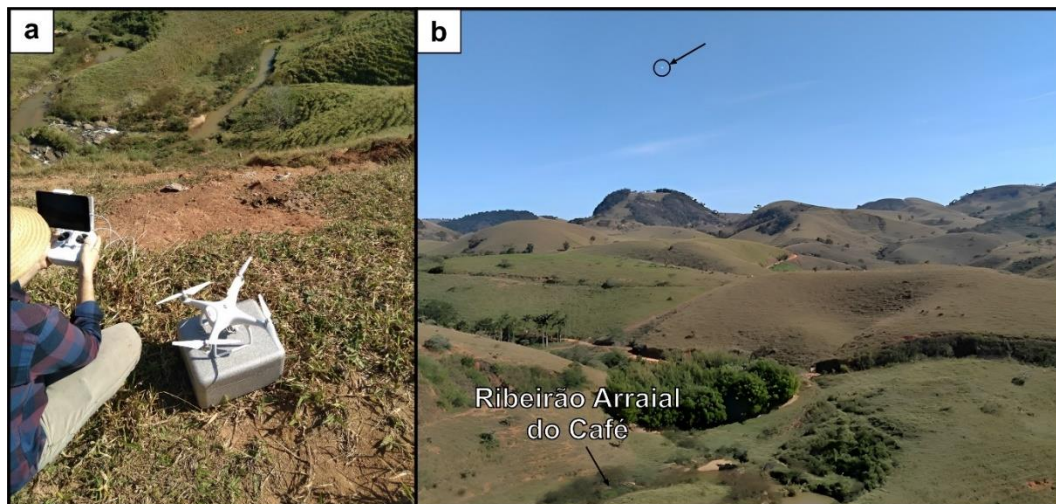


Fonte: Elaborado pelo autor.

O levantamento aerofotogramétrico foi realizado com o objetivo de obter um Modelo Digital de Terreno (MDT) recente e de alta resolução espacial. Para isso, utilizou-se um drone quadricóptero Phantom 4 (Standard), fabricado pela empresa chinesa *Dà-Jiāng Innovations Science and Technology* (DJI) (Figura 14a). O voo semiautomático foi planejado no aplicativo PIX4D e realizado no dia 16 de julho de 2021, sob clima ensolarado, a uma altura de 30 m acima do ponto de decolagem, atingindo até 90 metros acima do solo na parte mais baixa da área (Figura 14b e 15). As imagens foram processadas no software livre OpenDroneMap™ (WebODM), resultando no ortofotomosaico e no MDT com resolução espacial de 8 cm. Foi considerado o Sistema de Coordenadas de Mercator, Datum horizontal WGS 1984, zona 24S, e altitude elipsoidal vinculada ao Datum vertical de Imbituba.

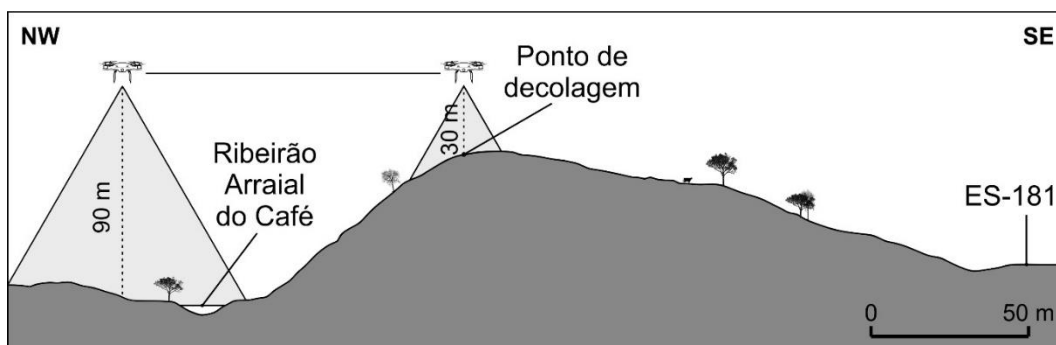
O MDT foi gerado por meio da técnica *Structure-from-Motion* (SfM), que utiliza os princípios da fotogrametria estereoscópica, a partir do deslocamento de pontos análogos identificados em imagens sobrepostas, adquiridas a partir de uma câmera em movimento. Detalhes sobre a técnica podem ser obtidos em Westoby *et al.* (2012) e Carrivick *et al.* (2016).

Figura 14 - Levantamento aerofotogramétrico: (a) calibração do drone e posicionamento para decolagem; e (b) execução do plano de voo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Perfil NW-SE da área de estudos, com indicação da altura do voo e o trecho da encosta sobrevoado pelo drone.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Análises e ensaios laboratoriais do solo

As amostras indeformadas foram enviadas para o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação, vinculado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Campus de Goiabeiras, onde foi determinado a granulometria, densidade aparente, teor de umidade, permeabilidade e dispersibilidade das argilas.

Para determinar a granulometria, foi inicialmente separado por peneiramento a fração areia da fração fina (argila + silte) e a fração argila foi determinada pelo método do densímetro (DONAGEMMA *et al.*, 2017). Não foi utilizado nenhum desfloculante, apenas água destilada. A classificação granulométrica do solo foi feita de acordo com

a divisão proposta pela ABNT, que divide o solo em pedregulho (> 2 mm), areia grossa ($2 - 0,6$ mm), areia média ($0,6 - 0,2$ mm), areia fina ($0,2 - 0,06$ mm), silte ($0,06 - 0,002$ mm) e argila ($< 0,002$ mm). A classificação textural foi realizada de acordo com o triângulo textural proposto pela *United States Department of Agriculture* (USDA), que divide o solo em 12 tipos de solo em função das proporções de argila, silte e areia (SOIL SURVEY DIVISION STAFF, 1993).

A densidade foi determinada através do método do anel volumétrico (MAV), detalhado em Donagemma *et al.* (2011). A permeabilidade foi determinada através do método de carga constante em permeâmetro de parede flexível (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2021). Por fim, a dispersibilidade das argilas foi determinada pelo ensaio do torrão (*crumb test*) (ABNT, 2020).

Uma amostra deformada do horizonte A foi encaminhada para a Central Multiusuário Geoanalítica – CMGeo do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo para a determinação dos argilominerais presentes. A análise por difração de raios-X (DRX) foi realizada em difratômetro Bruker D8, equipado com tubo de cobre (K-alfa), em varredura angular de 2 a 65 graus 2-teta. Como não ocorreu picos de argila com $d = 14$ Angstrom, não foram necessários os tratamentos por saturação com etileno glicol e aquecimento.

Por fim, a fração areia dos horizontes A e B foi analisada sob lupa binocular no Laboratório de Sedimentologia, do Departamento de Geologia da UFES, Campus de Alegre, para a caracterização da mineralogia e morfometria dos grãos. A circularidade dos grãos foi analisada de acordo com o gráfico proposto por Krumbein (1941). As classes com menores índices de circularidade correspondem a grãos mais angulosos.

4.1.3 Análise multitemporal de imagens de satélite e fotografias aéreas

Para realizar a análise multitemporal foram utilizados os seguintes materiais:

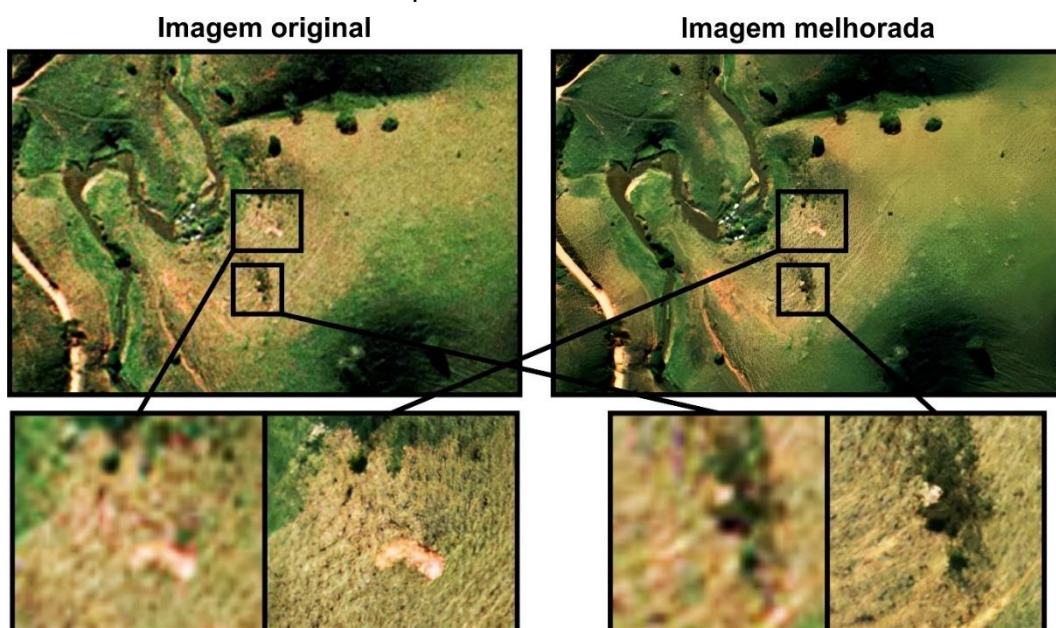
- Fotografia aérea de número 3707, relativa ao aerolevante do Estado do Espírito Santo, realizado pelo Instituto Brasileiro do Café (IBC), através do Grupo Executivo de Racionalização da Cafeicultura (GERCA) na década de 1970 e disponibilizada para *download* através do Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo (GEOBASES);
- Imagens de satélite da série histórica do Google Earth Pro, com resolução entre 0,2 e 0,6 m (valores estimados);

- Ortofotomosaicos resultantes dos levantamentos aerofotogramétricos de todo o estado do Espírito Santo, em escala igual, ou melhor, a 1:25.000, realizado nos anos de 2007 e 2013. Os ortofotomosaicos possuem resolução espacial de 1 m e 0,25 m, respectivamente, e estão disponíveis para *download* no portal GEOBASES;
- Ortofotomosaicos obtidos através de levantamentos aerofotogramétricos com VANT nos anos de 2020, 2021 e 2022, com resolução espacial igual ou menor que 0,1 m;

As imagens de satélite do Google Earth utilizadas correspondem aos anos de 2002, 2009, 2017 e 2019.

Para melhorar a resolução e nitidez das imagens com menor resolução espacial, como a fotografia aérea do ano de 1970 e o ortofotomosaico referente ao ano de 2007, foi utilizada uma ferramenta disponibilizada gratuitamente pela plataforma PicWish⁵, que utiliza inteligência artificial para melhorar a qualidade gráfica de imagens digitais. Essa ferramenta demonstrou melhoria considerável na resolução e nitidez das imagens (Figura 16).

Figura 16 - Comparação de uma imagem da área de estudos antes e após processamento na ferramenta da plataforma PicWish.



Fonte: Elaborado pelo autor.

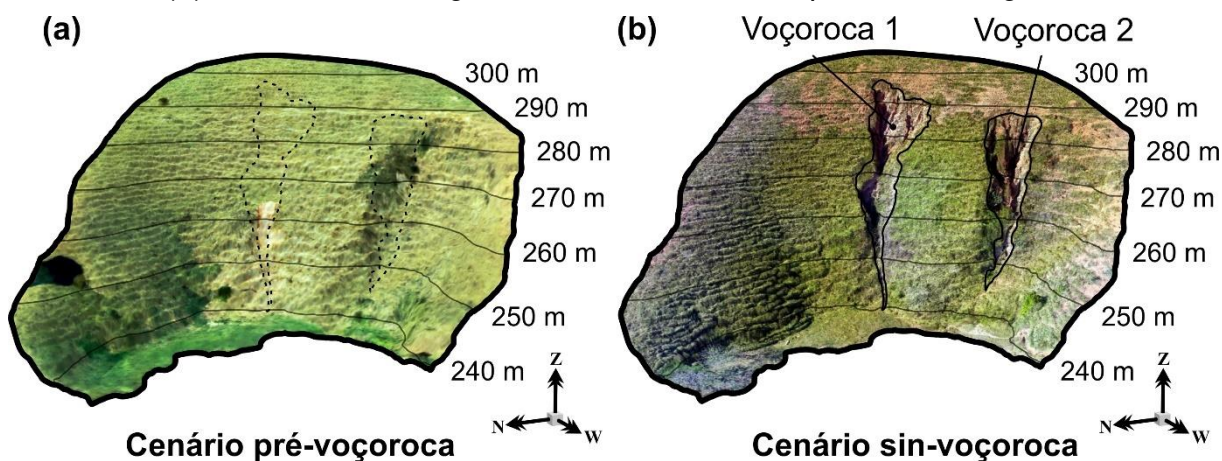
⁵ Disponível em: <https://picwish.com/>

4.2 Modelagem numérica

4.2.1 Cenários

Foram considerados dois cenários (pré- e sin-voçoroca) e duas abordagens (um único evento e uma série de eventos de chuva) diferentes para a simulação. Inicialmente, simulou-se um evento de chuva máximo (valor mais elevado registrado entre os anos de 2007 e 2021) para dois cenários: i) antes da formação das voçorocas (pré-voçoroca) (Figura 17a); e ii) com as voçorocas instaladas (sin-voçoroca) (Figura 17b). Objetivou-se com isso, avaliar a capacidade do modelo em detectar o início das voçorocas e sua evolução. Posteriormente, executou-se o modelo para a série histórica de eventos de precipitação pluviométrica entre os anos de 2007 e 2021 (APÊNDICE B) para o cenário pré-voçoroca, para avaliar a capacidade do modelo de simular a evolução do processo e das feições erosivas ao longo do tempo.

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Calibração e determinação dos parâmetros de entrada do modelo

Para executar o modelo SIMWE, são necessários diversos parâmetros de entrada (Tabela 1). Alguns dos parâmetros exigidos pelo SIMWE puderam ser obtidos através de sensoriamento remoto e geoprocessamento, ensaios laboratoriais e bancos de dados públicos. No entanto, outros parâmetros, como o coeficiente da

capacidade de destacamento, coeficiente da capacidade de transporte e tensão de cisalhamento crítica, foram determinados a partir de dados encontrados na literatura para solos semelhantes aos solos encontrados na área de estudos. Enquanto os parâmetros matemáticos, como o número de caminhantes e coeficiente de difusão gravitacional precisaram ser calibrados através de testes com o modelo, adotando-se os valores que produziram melhores resultados.

Tabela 1 - Parâmetros de entrada do modelo SIMWE no módulo r.sim.terrain.

Parâmetros	Unidades	Valores	Fonte
Modelo Digital de Terreno (MDT)	m	Figura 20	Levantamento aerofotogramétrico
Excesso da precipitação	mm.h ⁻¹	Figura 19	INMET
Duração da chuva	min	60	
Coeficiente de escoamento	-	Tabela 2	Harmon <i>et al.</i> (2022)
Coeficiente de rugosidade n de Manning	-		Chow (1959) e Knisel (1980)
Coeficiente da capacidade de destacamento (K _d)	s.m ⁻¹	Tabela 3	Elliot <i>et al.</i> (1989) e Mitasova <i>et al.</i> (1998)
Coeficiente da capacidade de transporte (K _t)	s		
Tensão de cisalhamento crítico (T _{cr})	Pa		
Densidade do solo (ρ _s)	g.cm ⁻³	Tabela 6	Análise física do solo
Nº de caminhantes	-	1.000.000 e 3.000.000	Calibração
Coeficiente de difusão gravitacional	-	0,0005	

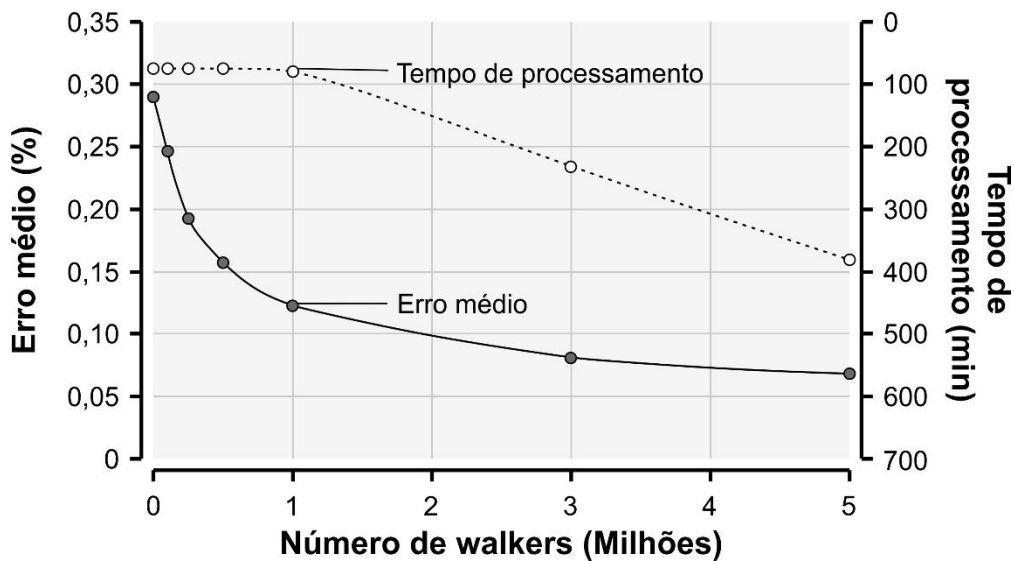
Para o número de caminhantes adotou-se um valor que permitisse obter bons resultados sem aumentar muito o tempo de processamento. Para tanto, testou-se diferentes valores para o número de caminhantes, sendo calculado o erro médio para cada resultado (E_{mNW}) com base na Equação 9:

$$E_{mNW} = \frac{\sum \left(\frac{|ED_{NW}(x, y) - ED_{7.000.000}(x, y)|}{ED_{7.000.000}(x, y)} \right)}{N^{\circ} \text{ de pixels}} \quad (9)$$

onde, x, y são as coordenadas de cada pixel, ED_{NW} é o resultado da taxa de erosão e deposição utilizando determinado número de caminhantes NW (sem unidade), $ED_{7.000.000}$ é o resultado da taxa de erosão e deposição utilizando 7 milhões de caminhantes (adimensional), que é o maior número de caminhantes que o módulo r.sim.terrain permite adotar.

A partir dos erros médios e do tempo de processamento, foi definido o valor mais adequado para o número de caminhantes, de modo que o resultado da simulação não fosse tão diferente do resultado obtido com 7 milhões de caminhantes, e que não comprometesse o tempo de processamento. O valor de 1 milhão de caminhantes apresentou o melhor desempenho na simulação (Figura 18). No entanto, esse valor foi utilizado apenas para a simulação da série de dados de precipitação.

Figura 18 - Erro médio e tempo de processamento em função do número de caminhantes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a simulação realizada para um único evento de chuva utilizou-se 3 milhões de caminhantes. Este valor apresentou melhoria considerável na qualidade dos resultados e não comprometeu o tempo de processamento (~ 4 horas).

Para o coeficiente de difusão gravitacional foi utilizado um valor relativamente baixo para que não afetasse as estimativas de erosão e deposição, tendo como base

os valores geralmente utilizados na literatura. Após testar alguns valores, foi selecionado um valor que não afetasse muito no valor final da erosão e deposição simulada pelo SIMWE e que contribuísse para suavizar a variação espacial das taxas de erosão e deposição resultantes.

Os valores do coeficiente de rugosidade n de Manning e do coeficiente de escoamento foram definidos de acordo com cada classe de cobertura do solo e rugosidade da superfície, utilizando valores determinados por Chow (1959) e Knisel (1980) para superfícies similares (Tabela 2). Para o coeficiente de escoamento utilizou-se os valores recomendados por Harmon *et al.* (2022) para cada classe de cobertura do solo. Considerou-se os valores para uma pastagem densa e um solo com baixa rugosidade.

Tabela 2 - Coeficientes de rugosidade n de Manning e de escoamento para cada tipo de cobertura de solo.

Parâmetros	Cobertura do solo		
	P	SE	AA
n de Manning	0,035	0,01	0,07
Coeficiente de escoamento	0,35	0,6	0,5

P - pastagem; SE - solo exposto; e AA - arbustos e árvores.

Os coeficientes da capacidade de destacamento (K_d) e tensão de cisalhamento crítica (τ_{cr}) do solo foram definidos de acordo com suas propriedades físicas do solo e cobertura vegetal (Tabela 3). Os valores foram determinados através de equações derivadas de estudos de campo realizados por Elliot *et al.* (1989) em diversos solos encontrados nos Estados Unidos da América, e foram validados de acordo com outros valores encontrados para solos semelhantes em Laflen *et al.* (1991) e Mitasova *et al.* (1998) para o K_d e em Martins Filho (1994), Lafayette *et al.* (2011) e Nascimento (2021) para o τ_{cr} . O coeficiente da capacidade de transporte (K_t) foi determinado através dos valores utilizados em Mitasova *et al.* (1998) para solos de diferentes texturas.

Ainda foram realizados testes com valores significativamente maiores e menores que os valores adotados para os parâmetros de entrada do modelo, para verificar o quanto a determinação imprecisa dos parâmetros poderia comprometer a modelagem.

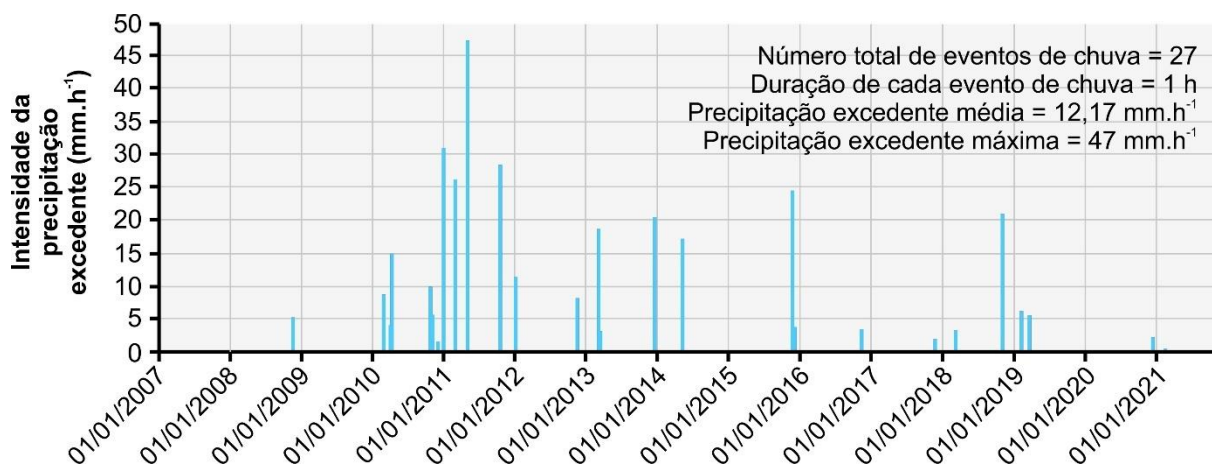
Tabela 3 - Coeficientes determinados em função das características do solo.

Parâmetros	Classes de solos								
	SSP	SSE	SSAA	HA	HB	HC	RA	PA	CD
K_d	0,0068	0,0068	0,0068	0,0076	0,0094	0,016	0	0,001	0,003
K_t	0,0003	0,001	0,0001	0,01	0,03	0,003	0	0,0001	0,0001
τ_{cr}	4,34	4,34	4,34	4,18	2,55	1,03	0	2,55	2,55

K_d - coeficiente da capacidade de destacamento ($s\ m^{-1}$); K_t - coeficiente da capacidade de transporte (s); τ_{cr} - tensão de cisalhamento crítico ($Pa = kg\ m^{-2}$); SSP - solo com pastagem; SSE - solo superficial exposto; SSAA - solo superficial com arbustos e árvores; HA - horizonte de alteração A; HB - horizonte de alteração B; HC - horizonte de alteração C; RA - rocha alterada; PA - planície aluvial; CD - cone de dejeção.

Os dados pluviométricos foram obtidos a partir dos dados históricos da estação pluviométrica automática A616 do INMET⁶ ($20^{\circ}45'0''S$; $41^{\circ}29'24''O$), localizada a 7,7 km da área de estudos. Os dados foram tabulados e analisados no software Excel (Microsoft). Calculou-se o tempo de duração das chuvas e a precipitação excedente pela diferença entre a intensidade pluviométrica⁷ e a taxa de infiltração⁸ para os eventos de chuva que ocorreram entre os anos de 2007 e 2021, os quais são apresentados na Figura 19.

Figura 19 - Precipitação pluviométrica excedente entre os anos de 2007 e 2021.



Considerou-se os eventos de chuva para a modelagem a partir do ano em que iniciou-se a instalação de voçorocas na área de estudo, determinado através de

⁶ Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>.

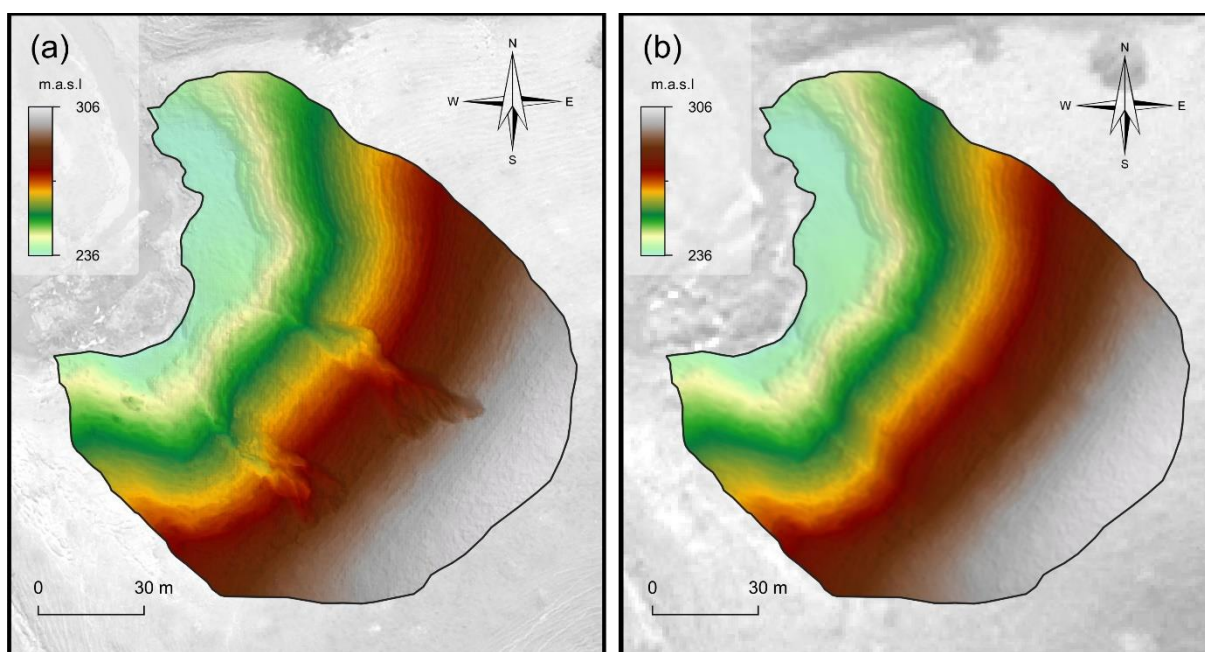
⁷ Medida pela quantidade de precipitação pluviométrica que ocorre em um período de tempo.

⁸ Capacidade do solo em infiltrar determinada altura de lâmina d'água em um intervalo de tempo.

imagens históricas do Google Earth e ortofotomosaicos do GEOBASES.

O MDT gerado a partir das imagens de VANT foi tratado no software ArcGIS (ESRI™) para a geração da superfície pré-voçoroca. Para tanto, realizou-se uma interpolação dos dados altimétricos através de curvas de nível com intervalo de 0,2 m, omitindo-se os dados de elevação das feições erosivas e ajustando a superfície manualmente em alguns locais (Figura 20).

Figura 20 - Modelos Digitais de Terreno (MDTs): (a) MDT sin-voçoroca; e (b) MDT pré-voçoroca.



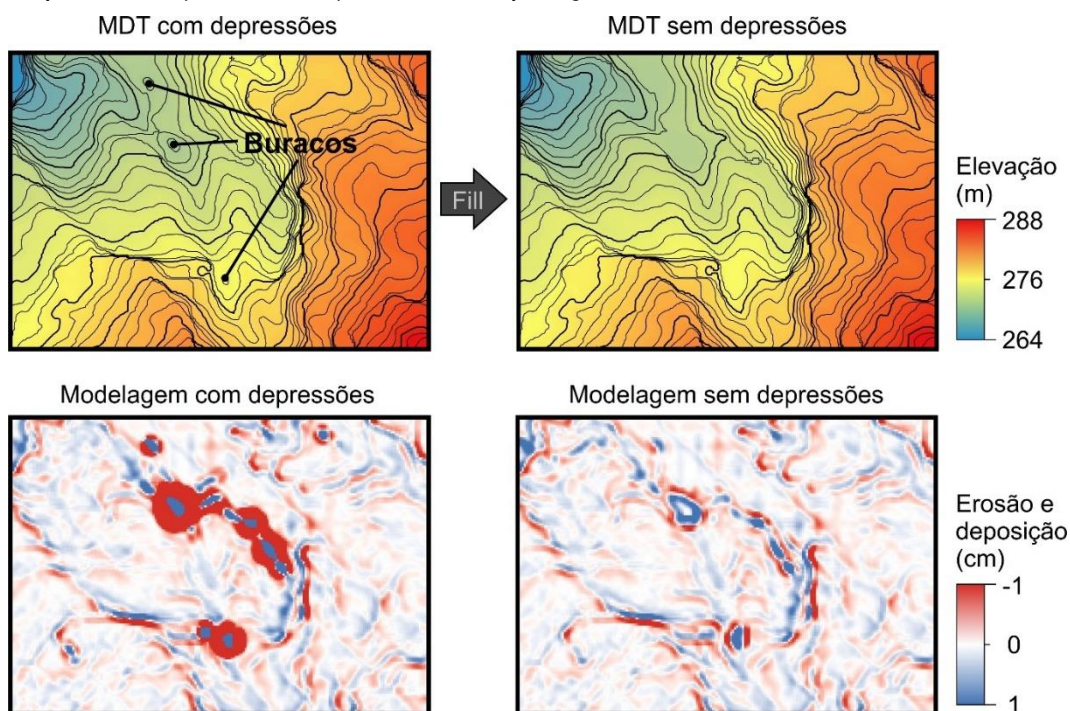
Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizou-se a ferramenta *Topo to Raster*, que utiliza uma técnica iterativa de interpolação de diferenças finitas. Esse método é otimizado para ter a eficiência dos métodos de interpolação local, como o inverso da potência das distâncias (*Inverse Distance Weighting* - IDW), sem perder a continuidade superficial de métodos de interpolação global, como a krigagem (*kriging*) e o método *spline*. Portanto, trata-se de uma técnica para a interpolação e suavização de superfície sobre dados dispersos em muitas dimensões (*thin-plate spline*) (WAHBA, 1991), que foi modificada para permitir que o MDT gerado acompanhe mudanças bruscas no terreno.

Realizou-se o preenchimento de depressões presentes nos MDTs através da ferramenta *Fill* e definiu-se uma resolução igual a 0,2 m. Essa ferramenta localiza as depressões do terreno onde há convergência do fluxo em todas as direções e cria

uma superfície plana no local da depressão (Figura 21). Esse procedimento foi realizado para minimizar problemas de acumulação de água ao infinito durante a modelagem, que são responsáveis por gerar valores anômalos nas estimativas de erosão e deposição, como mostrado na Figura 21.

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos dois MDTs (Figura 20), estimou-se o volume de solo removido durante a formação das voçorocas e a taxa de erosão anual.

Além do ortofotomosaico obtido a partir das imagens de drone (Figura 17b), também foi utilizado um ortofotomosaico com resolução espacial de 1 m (Figura 17a), resultante dos levantamentos aerofotogramétricos realizados no ano de 2007 pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos – IEMA para o Estado do Espírito Santo, e disponibilizado no portal GEOBASES⁹. Esse ortofotomosaico foi utilizado para mapear a cobertura do solo no ano de início da formação das voçorocas.

⁹ Disponível em: <https://geobases.es.gov.br/img-originais-aerolev-2007-2008>

4.2.3 Execução do modelo

Para executar o modelo SIMWE foram utilizados os módulos `r.sim.water`, `r.sim.sediment` e `r.sim.terrain`, implementados no software GRASS GIS 8.0. Os módulos `r.sim.water` e `r.sim.sediment` foram utilizados para simular o evento único de chuva nos cenários pré- e sin-voçoroca, enquanto o `r.sim.terrain` foi utilizado para a série de eventos de chuva.

Primeiro foi executado o `r.sim.water` para os cenários pré- e sin-voçoroca, simulando um evento de chuva de $78,47 \text{ mm.h}^{-1}$. O módulo requer a entrada da derivada de x e y do MDT, que foi obtida utilizando o módulo `r.slope.aspect`, além do próprio MDT. Também são inseridos o coeficiente de rugosidade de Manning, precipitação excedente, duração da simulação e número de caminhantes. Para os outros parâmetros opcionais foram adotados os valores padrão.

Em seguida foi executado o módulo `r.sim.sediment`, utilizando o mapa da altura da lâmina d'água resultante do módulo `r.sim.water`. Neste módulo também são inseridos o MDT, o mapa da derivada de x e y, coeficiente de rugosidade de Manning, duração da simulação e número de caminhantes, além dos coeficientes da capacidade de destacamento, da capacidade de transporte e da tensão de cisalhamento crítico.

As simulações numéricas foram executadas em um computador Desktop com 64 bits, sistema operacional Windows 10 Pro, processador Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60GHz, placa de vídeo dedicada NVIDIA GeForce GTX 745 e 16 GB de memória RAM.

4.2.4 Avaliação do modelo

Para avaliar a qualidade do modelo, utilizou-se uma metodologia semelhante à adotada por Pijl *et al.* (2020). Primeiramente, foram realizadas análises visuais dos mapas da erosão e deposição, buscando-se identificar padrões gerais de erosão na área de estudos. Em seguida, foram realizadas análises estatísticas básicas das taxas de erosão e deposição simuladas para a área de projeção das voçorocas e áreas adjacentes. Por fim, comparou-se os resultados obtidos com as observações de campo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das voçorocas

5.1.1 Morfologia e características das voçorocas

Ambas as voçorocas estão em estágio avançado e expandindo-se à montante por processos de erosão hídrica e movimentos de massa, totalizando aproximadamente 2.779 m³ de material removido durante cerca de 14 anos, o equivalente a um volume um pouco superior ao de uma piscina olímpica. Isso significa que as voçorocas foram esculpidas a uma taxa média de erosão de 198,5 m³ ano⁻¹. Apesar das voçorocas terem se desenvolvido no mesmo período e sob as mesmas condições externas, a morfologia da encosta e variabilidade espacial do solo permitiram que a voçoroca 1 atingisse área, comprimento, perímetro, volume de material erodido e taxa de erosão maior que os da voçoroca 2, a qual teve um processo erosivo mais incisivo, atingindo maior profundidade que a voçoroca 1 (Tabela 4).

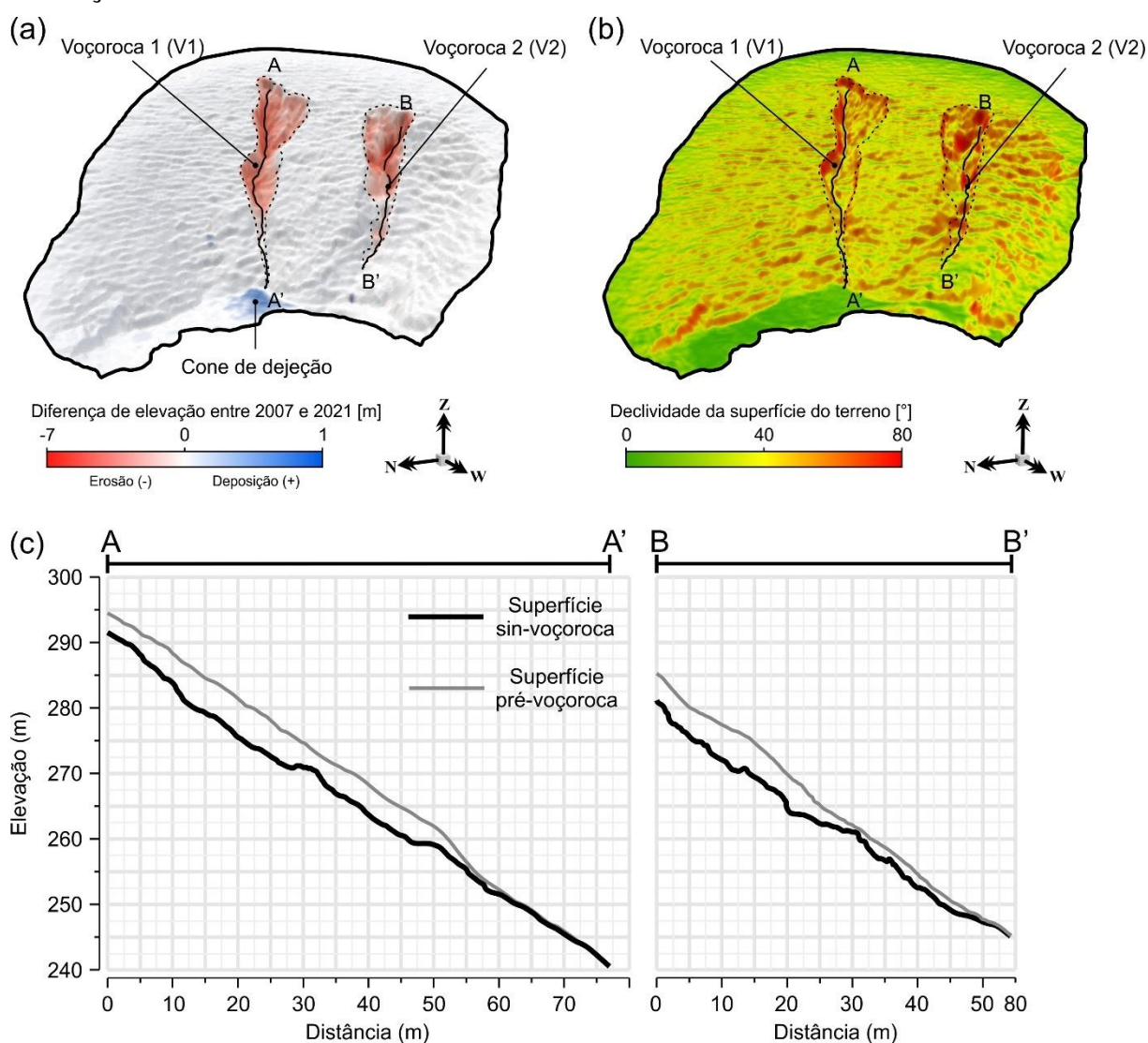
Tabela 4 - Parâmetros morfométricos das voçorocas para o ano de 2021.

Parâmetros	Unidades	Voçoroca 1	Voçoroca 2
Comprimento	m	77	54
Declividade média	graus	47,3	49,3
Declividade média do talvegue principal	graus	38,4	34,2
Área	m ²	708	497
Perímetro	m	187	134
Volume	m ³	1.700	1.079
Taxa de erosão	m ³ .ano ⁻¹	131	83
Profundidade máxima	m	5,98	8,73

Observa-se também que a declividade média da superfície da voçoroca 2 é ligeiramente superior à da voçoroca 1, que tem o talvegue principal mais declivoso. Isso ocorre devido as paredes íngremes e canal estreito, além da presença de degraus ao longo do talvegue, enquanto na voçoroca 1, a declividade interna da superfície da voçoroca é maior apenas nas paredes laterais.

As voçorocas estudadas se instalaram em uma encosta íngreme, estando localizadas meia encosta (parte mais íngreme da encosta), onde a vertente assume curvatura côncava em planta, mas não apresenta conexão com drenagens. A profundidade das voçorocas é maior sua parte central e na região superior da encosta, onde o solo é mais espesso (Figura 22).

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.

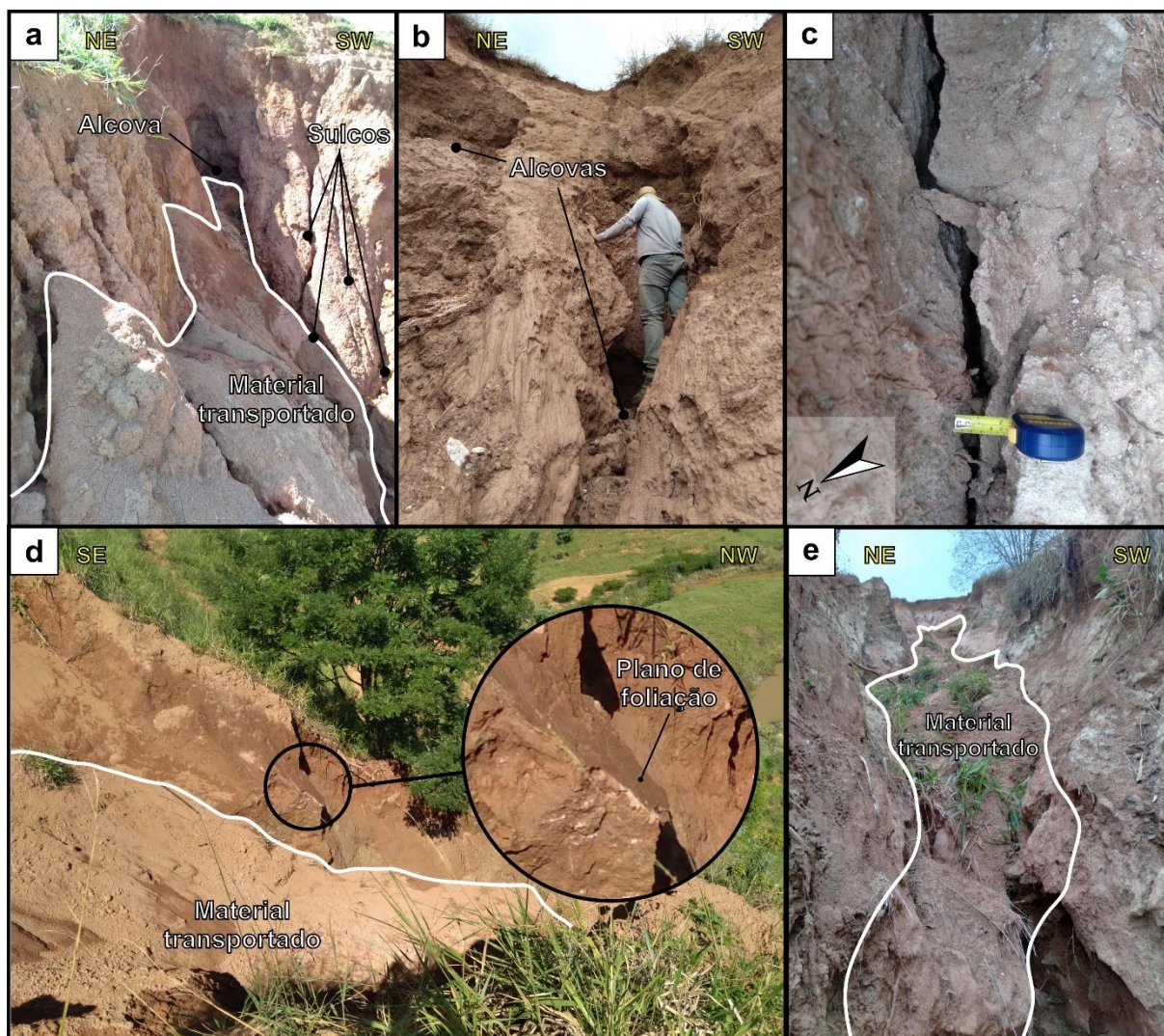


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ambas as voçorocas apresentam alcovas, sulcos e rachaduras no solo (Figura 23), além de patamares e paredes muito íngremes ($> 70^\circ$), podendo atingir inclinações

negativas, principalmente onde há formação de alcovas de regressão (Figura 23a,b).

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.



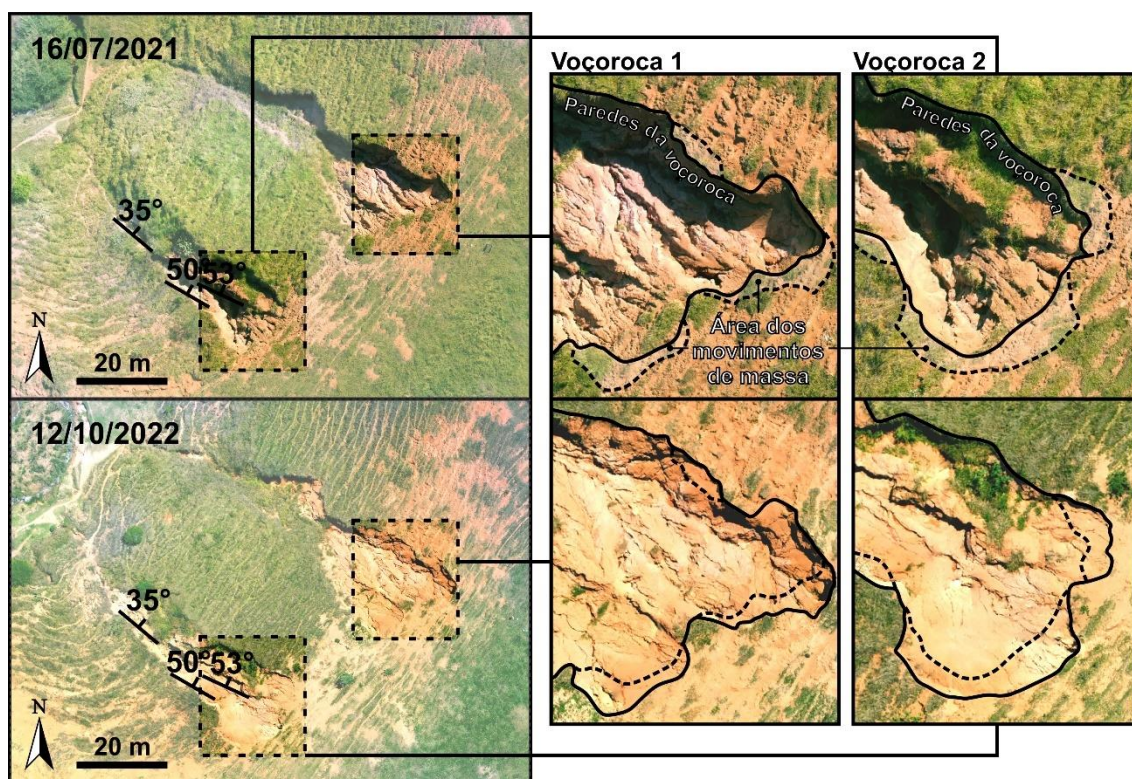
Fonte: Elaborado pelo autor.

As alcovas ocorrem principalmente nas áreas mais declivosas, onde o fluxo superficial da água adquire maior energia e há formação de pequenas cachoeiras, resultando em escavações, que podem se expandir à montante durante o processo erosivo prolongado. As alcovas muitas vezes aparecem associadas aos sulcos em locais onde ocorre a convergência do fluxo do escoamento superficial da água (Figura 23a). As rachaduras foram encontradas nas paredes laterais mais íngremes,

geralmente associadas ao horizonte C, atingindo em alguns locais abertura superior a 1 cm (Figura 23c). Outras rachaduras com aberturas inferiores a 1 mm foram encontradas no horizonte A, que podem estar associadas a expansividade do solo e rupturas do solo pelo pisoteio do gado.

Essas feições podem reduzir a estabilidade das paredes, contribuindo para a ocorrência de movimentos de massa nas paredes das voçorocas. As inspeções de campo mostraram que os movimentos de massa dentro das voçorocas podem ocorrer de forma local (em uma pequena área das paredes), movimentando um pequeno volume de solo, ou podem ocorrer de forma mais abrangente (em uma grande área das paredes), resultando em grandes volumes de solo movimentado. Um movimento de massa de maior dimensão foi registrado apenas uma vez durante o período monitorado (2021 a 2022) (Figura 24). Este ocorreu durante um evento de chuva no dia 16 de fevereiro de 2022. Nesse dia foi registrado uma intensidade pluviométrica muito elevada, que ocorreu após um período prolongado de chuva contínua, contribuindo para a desestabilização e colapso da parede superior e algumas partes das paredes laterais de ambas as voçorocas.

Figura 24 - Ortofotomosaico das voçorocas 1 e 2 antes e após a ocorrência de movimentos de massa provocados por precipitação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A foliação reliquiar é perpendicular as paredes das cabeceiras das voçorocas e, portanto, não atua como um agente predisponente para os movimentos de massa (Figura 24). No entanto, a foliação poderia contribuir para o deslizamento das paredes laterais a sudoeste, controlando o desenvolvimento lateral das feições (Figura 23d).

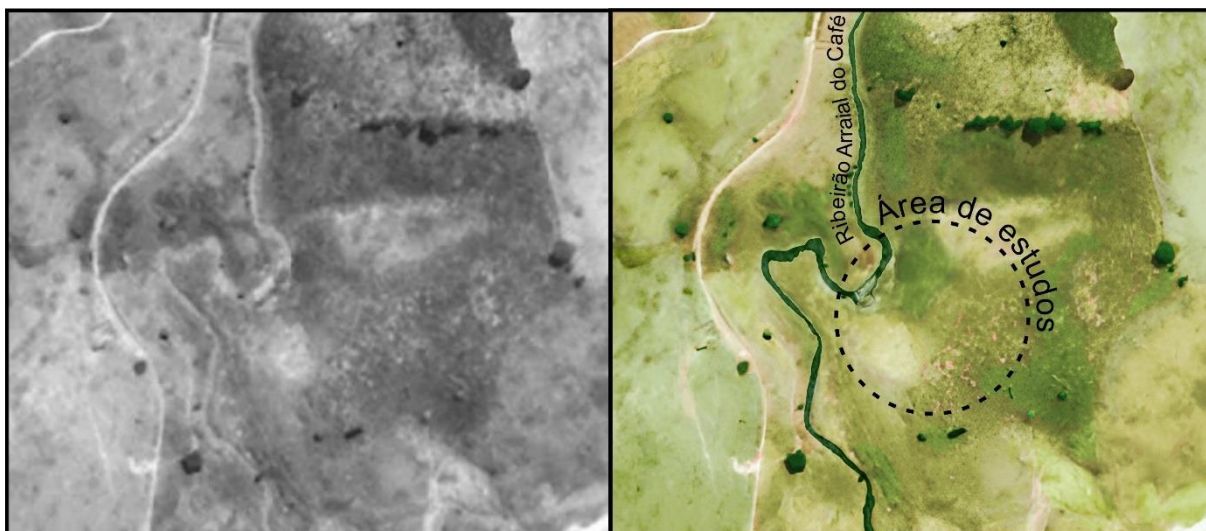
Após a ocorrência do movimento de massa, grande parte do material movimentado ficou retido temporariamente na calha das voçorocas (Figura 23d,e).

Nenhuma das voçorocas estudadas apresentou indícios de *piping* ou surgência de água. Marchioro, Andrade e Oliveira (2016) também não constatou a presença de *piping* em uma voçoroca desenvolvida em latossolo, localizada a cerca de 5 km da área de estudos. No período chuvoso, constatou-se apenas umidade em algumas porções das paredes das voçorocas.

5.1.2 Análise multitemporal de imagens de satélite e fotografias aéreas

A Figura 25 mostra um recorte de uma fotografia aérea da área de estudos correspondente ao ano de 1970. Identificou-se através desta fotografia que nesse ano a encosta já apresentava cobertura vegetal dominada por pastagem e alguns locais com menor cobertura vegetal.

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).

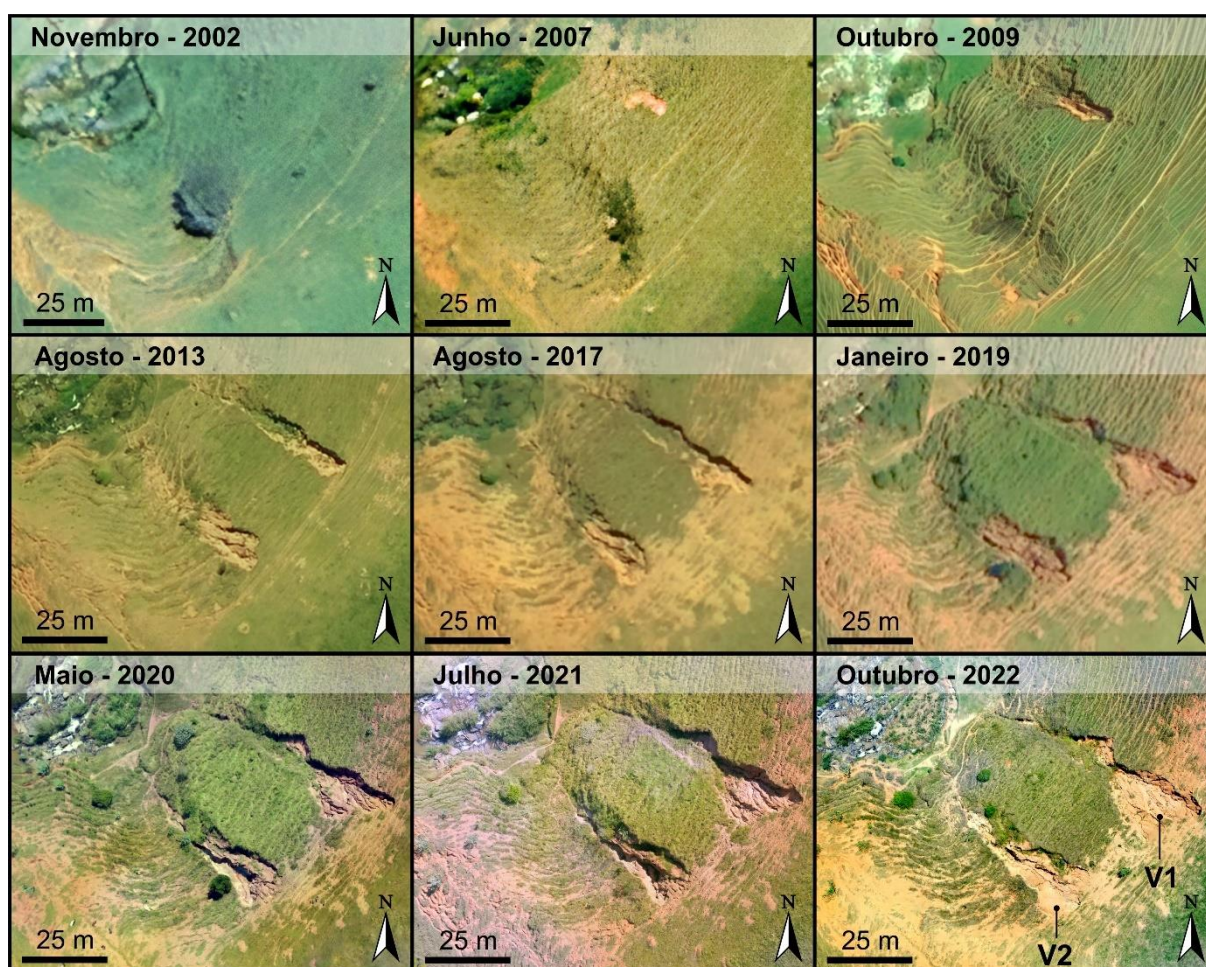


Fonte: Elaborado pelo autor.

O conjunto de imagens apresentado na Figura 26 permite acompanhar algumas

mudanças na cobertura do solo e evolução das voçorocas. Essas imagens mostram que a voçoroca 1 surgiu aproximadamente no ano de 2007. Neste ano, a feição aparece com pequenas dimensões na imagem, enquanto a voçoroca 2 só aparece de fato na imagem de 2013, já atingindo uma área relativamente grande. Entende-se que a partir das imagens não é possível saber com precisão quando as voçorocas se formaram, mas constatou-se que a voçoroca 1 surgiu aproximadamente no ano de 2007 e a voçoroca 2 surgiu entre os anos de 2009 e 2013.

Figura 26 - Imagens de satélite e ortofotos aéreas da área de estudos capturadas em diferentes anos. V1 – voçoroca 1; V2 – voçoroca 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na imagem de satélite mais antiga disponível, referente ao ano de 2002, ainda não existiam sinais de processos erosivos na área onde se formaram as voçorocas, e a cobertura do solo era essencialmente pastagem. Além disso, observa-se a presença de trilhas de gado.

Na imagem de 2007, observa-se uma feição de solo exposto no terço médio da encosta, com aproximadamente 10 m de comprimento e 4 m de largura, evidenciando a formação da voçoroca 1.

Na imagem de 2009 a voçoroca 1 apresenta maior dimensão, com aproximadamente 20 m de comprimento e avanço do processo erosivo à montante. Também fica mais nítida as trilhas de gado, que acompanham as curvas de nível.

Na imagem de 2013 a voçoroca 2 já aparece bem desenvolvida, mostrando que fora formada entre os anos de 2009 e 2013. Ambas as voçorocas já ocupam o terço superior da encosta. No interior da voçoroca 1 é possível notar a presença de alguma vegetação, o que indica estabilidade provisória e parcial do processo erosivo.

Na imagem de 2017 ainda há vegetação no interior da voçoroca 1. Contudo, observa-se uma expansão à montante e lateral. Na voçoroca 2, além da expansão à montante, também se observa um aprofundamento dos canais internos. Além disso, a proporção de solo exposto (degradação do solo) na porção sul das voçorocas e à oeste da voçoroca 2 aumenta consideravelmente. Nas imagens de 2019, 2020, 2021 e 2022 observa-se que as voçorocas se mantêm ativas e continuam se expandindo principalmente à montante. Considerando a expansão das voçorocas a montante, é provável que, se as voçorocas continuarem evoluindo dessa forma, em alguns anos elas irão se capturar no terço superior da encosta.

5.2 Caracterização do substrato litológico

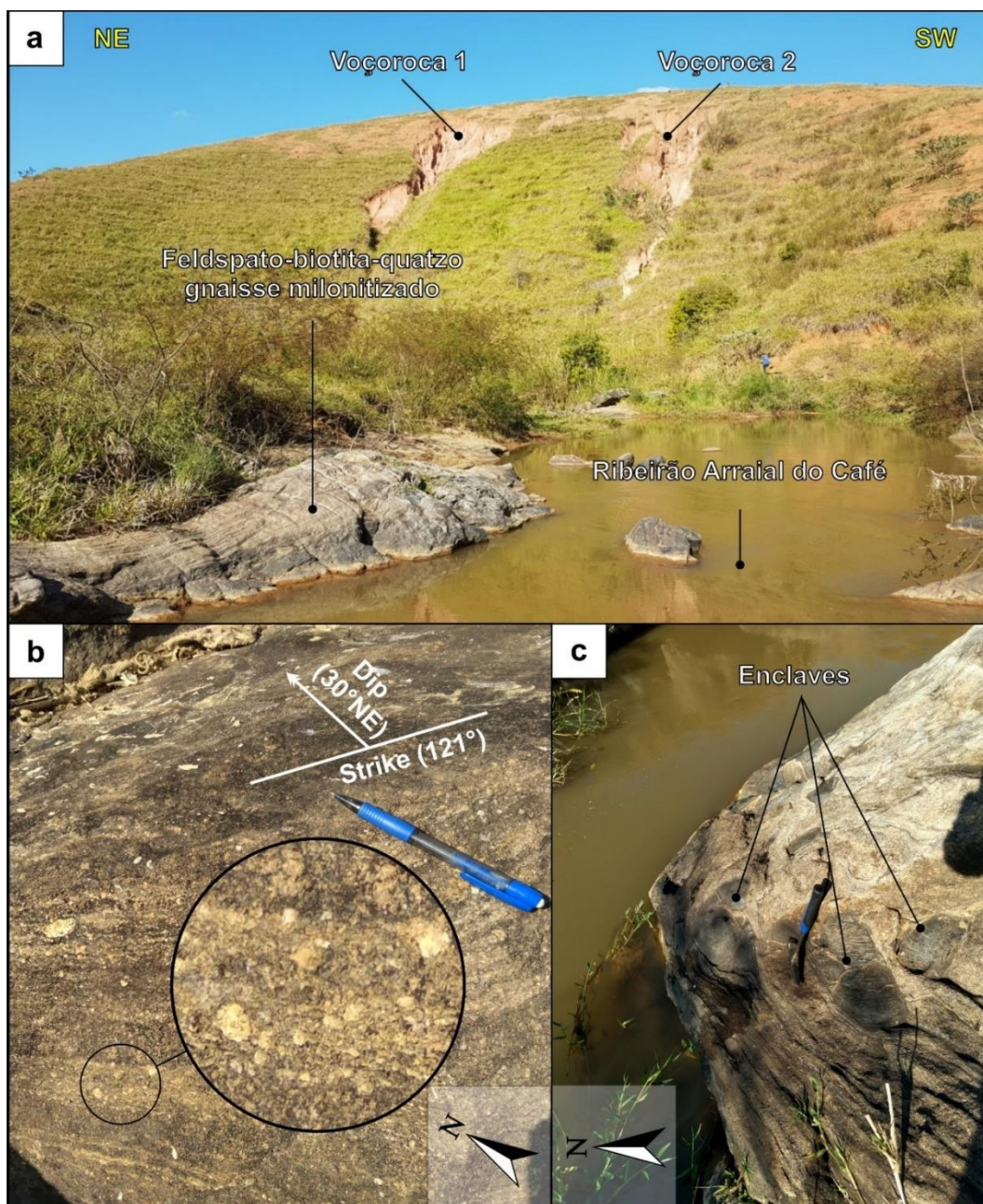
Na área de estudos, encontra-se um feldspato-biotita-quartzo gnaiss milonítico aflorando no leito e nas margens do Ribeirão Arraial do Café (Figura 27), provavelmente associado ao anfibólio-biotita gnaiss descrito por Vieira (1997).

O feldspato-biotita-quartzo gnaiss milonítico contém bandas intercaladas de composição félsica e máfica de espessuras centimétrica. As bandas félsicas possuem granulação variando de média a grossa, constituídas principalmente por k-feldspato, quartzo e plagioclásio. Já as bandas máficas possuem granulação que variam entre fina a média, sendo majoritariamente compostas por biotita, possivelmente anfibólio e minerais opacos. Em ambas as bandas ocorrem porfiroclastos de k-feldspato com formato sigmoidal (*augen*) (Figura 27b) e, localmente, são encontradas concentrações de porfiroblastos de granada (Figura 28).

Também observa-se a presença de enclaves máficos deformados de até

aproximadamente 40 centímetros (Figura 27c). A foliação metamórfica apresenta atitude variando de $31^\circ/30^\circ$ (*dip direction/dip*) a $50^\circ/45^\circ$ (*dip direction/dip*) (Figura 27b). O mesmo material foi descrito por Coli, Hartwig e Pires (2022) em uma encosta a 2,2 km ao norte da área de estudos.

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Concentração de granada no paragnaisse na porção inferior da voçoroca 1.



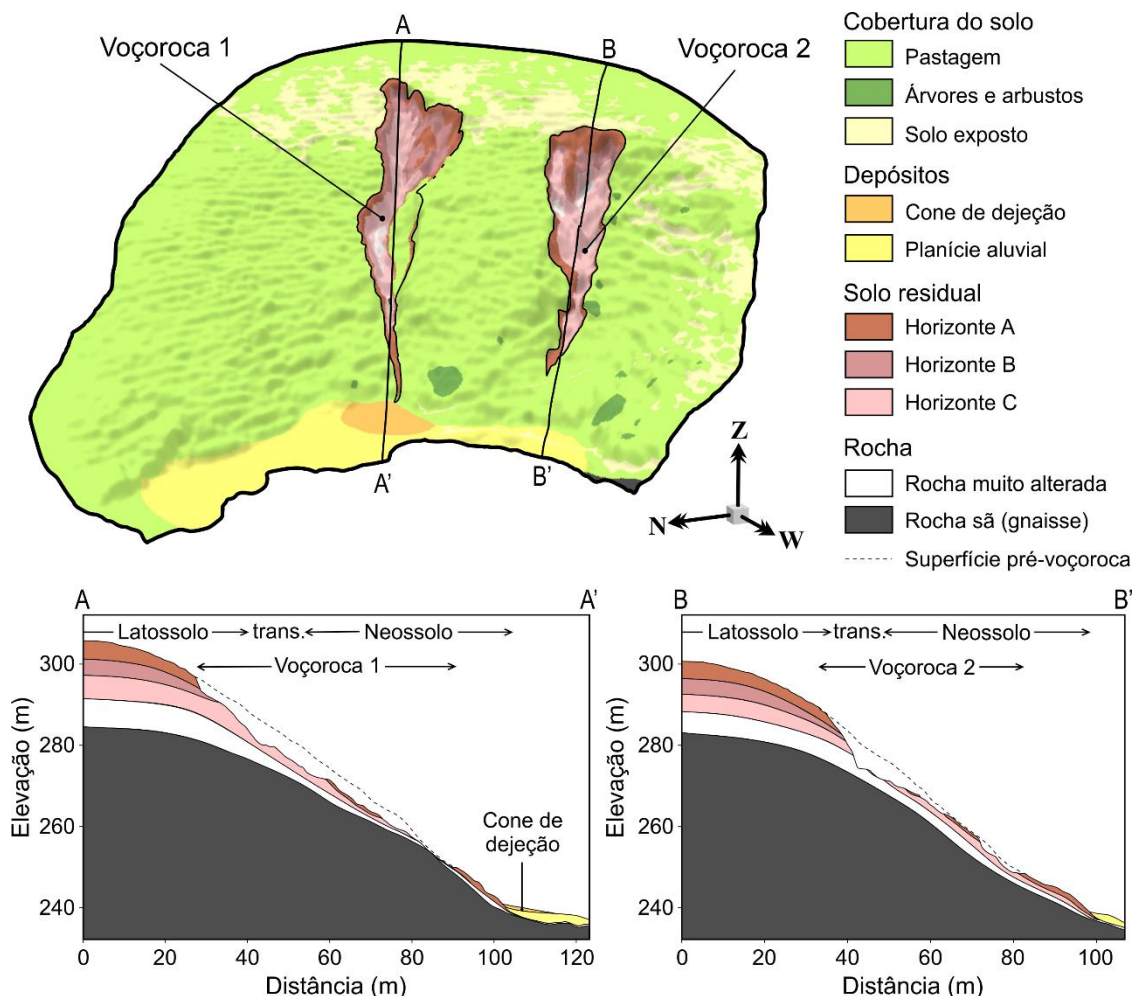
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Caracterização do solo

5.3.1 Pedologia

Na área de estudos, constatou-se a presença de solos residuais (*in situ*) e depósitos aluviais sobre o substrato litológico constituído de gnaisses milonitizados. Os solos residuais foram classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) como um latossolo vermelho-amarelo na porção superior da encosta, que transiciona para um neossolo regolítico na porção inferior (Figura 29). Na transição do latossolo vermelho-amarelo para o neossolo regolítico o solo apresenta características de um cambissolo háplico.

Figura 29 - Geologia da encosta em perspectiva (acima) e em perfil (abaixo). Perfil geológico esquemático produzido conforme observações de campo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O solo residual pode ser dividido em solo residual maduro e solo residual jovem de acordo com Vaz (1996). O solo residual maduro apresenta dois horizontes (A e B) na parte superior da encosta (Figura 29 e 30a) e um horizonte (A) na parte intermediária e inferior (Figura 29, 30b,c). O solo residual jovem, também conhecido como solo de alteração ou saprólito, compreende o horizonte C, com blocos de rocha alterada e feições herdadas da rocha de origem.

A transição do solo residual maduro para o solo residual jovem ocorre de forma gradual nas porções intermediárias da encosta (Figura 30b) e de forma abrupta nas porções inferiores (Figura 30c), sendo marcado, principalmente, pela mudança da coloração, textura e estrutura do solo.

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O horizonte A possui cor marrom claro a marrom avermelhado (2,5YR 5/6), espessura variável, podendo atingir até aproximadamente 2 m na parte superior da encosta. Nesse horizonte, encontram-se agregados granulares, cristais de quartzo, k-feldspato e plagioclásio caulinizados e, eventualmente, pequenos fragmentos líticos muito alterados. Adicionalmente, observou-se uma elevada quantidade de raízes nos primeiros 20 cm de profundidade do horizonte A.

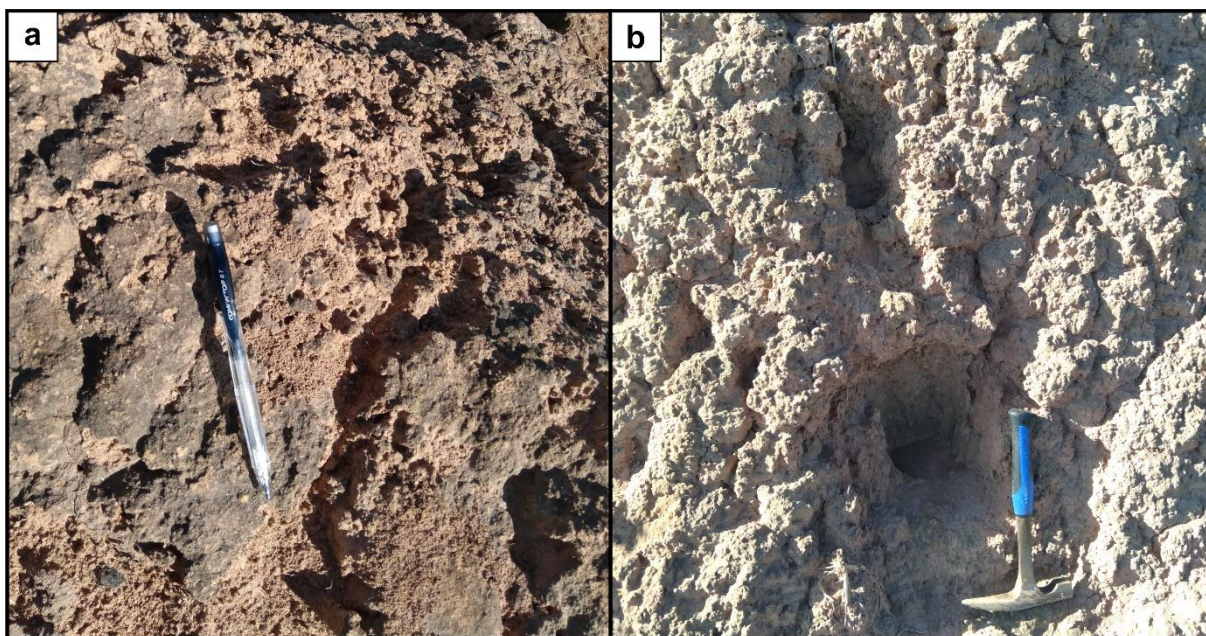
O horizonte B, quando presente no perfil de intemperismo do solo, aparece bem homogêneo, variando apenas sua profundidade e espessura ao longo da encosta,

sendo maior na porção superior e menor ou inexistente na porção central da encosta. Esse horizonte possui cor marrom avermelhado (10R 4/8), com tonalidade escura, sendo encontrado alguns fragmentos líticos alterados com até 2 cm de diâmetro, pequenos fragmentos de veios de quartzo e agregados granulares em menor quantidade comparativamente ao horizonte A.

O solo residual jovem encontra-se logo abaixo do solo residual maduro, e corresponde ao horizonte genético C. Esse horizonte é heterogêneo, apresentando diferentes cores (rosa, cinza e verde amarronzado), com baixa coesão entre os grãos e estruturas (foliação) herdadas da rocha subjacente (Figura 30b,c,d). Em algumas áreas observa-se a intercalação de faixas esverdeadas, rosadas e escuras (acinzentadas). As porções esverdeadas apresentam elevada concentração de micas na fração silte a areia fina. As porções rosadas apresentam cristais de k-feldspato de granulação mais grossa (areia grossa a cascalho e matriz caulínítica). Por fim, as porções escuras apresentam elevada concentração de biotita e quartzo, foliação bem marcada e textura arenosa.

Também foi observado a presença de “crostas” ferruginosas no solo em alguns locais da área de estudos (Figura 31).

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

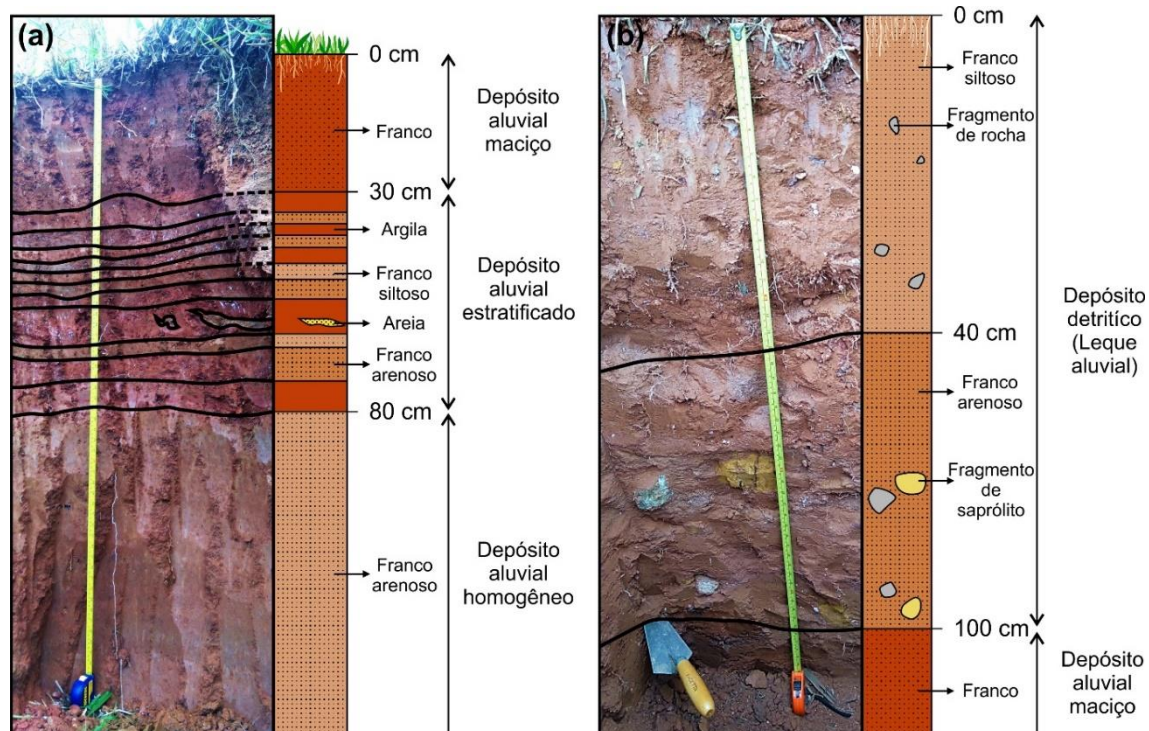
Essas crostas provavelmente são decorrentes do processo de laterização do solo. O impacto das gotas da chuva também pode ter contribuído para a formação dessas crostas, considerando que elas se desenvolveram na porção superior da encosta e nos locais com ausência de vegetação.

Os depósitos aluviais encontram-se na base da encosta, na margem direita do Ribeirão Arraial do Café (Figura 29). No talude da planície de inundação do canal observa-se estratificações plano-paralelas irregulares, com pequenas camadas de sedimentos que se intercalam até 80 cm de profundidade, onde encontra-se uma camada areno-siltosa homogênea.

Na porção mais superficial deste talude (0 a 30 cm) encontra-se uma camada com estrutura maciça de cor vermelho amarronzado e textura lamosa, com a presença de material orgânico carbonizado (carvão) e cristais de k-feldspato alterado de até 5 mm (Figura 32a). Logo abaixo, observa-se um conjunto de níveis estratificados de composição argilosa, silto-arenosa e areno-siltosa, além de pequenas lentes de areia. Observa-se a presença de k-feldspato alterado e matéria orgânica carbonizada em todos estes níveis. Por fim, a partir dos 80 cm de profundidade, encontra-se uma camada homogênea de cor marrom esverdeada, apresentando textura franco arenosa e maior concentração de micas. Todo esse conjunto de camadas foi identificado como um depósito de planície aluvial, em que a deposição de sedimentos ocorre principalmente durante os eventos de inundação do ribeirão.

Na região da planície aluvionar do Ribeirão Arraial do Café, é possível perceber um sutil aumento na elevação devido à presença do cone de dejeção formado a partir do material erodido da voçoroca 1. Esse cone de dejeção possui estrutura maciça, com grande quantidade de cristais de quartzo e feldspato centimétricos, além de fragmentos de rocha e saprólito que podem atingir até 20 cm de comprimento (Figura 32b). A textura da matriz é heterogênea, sendo silto-arenosa até 40 cm de profundidade e areno-siltosa entre 40 e 100 cm de profundidade. Abaixo dos 100 cm de profundidade, encontra-se uma camada com textura lamosa e sem fragmentos de rocha, correspondente a sedimentos aluvionares.

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Mineralogia

Os resultados da análise mineralógica da fração areia dos horizontes A e B são apresentados na Tabela 5.

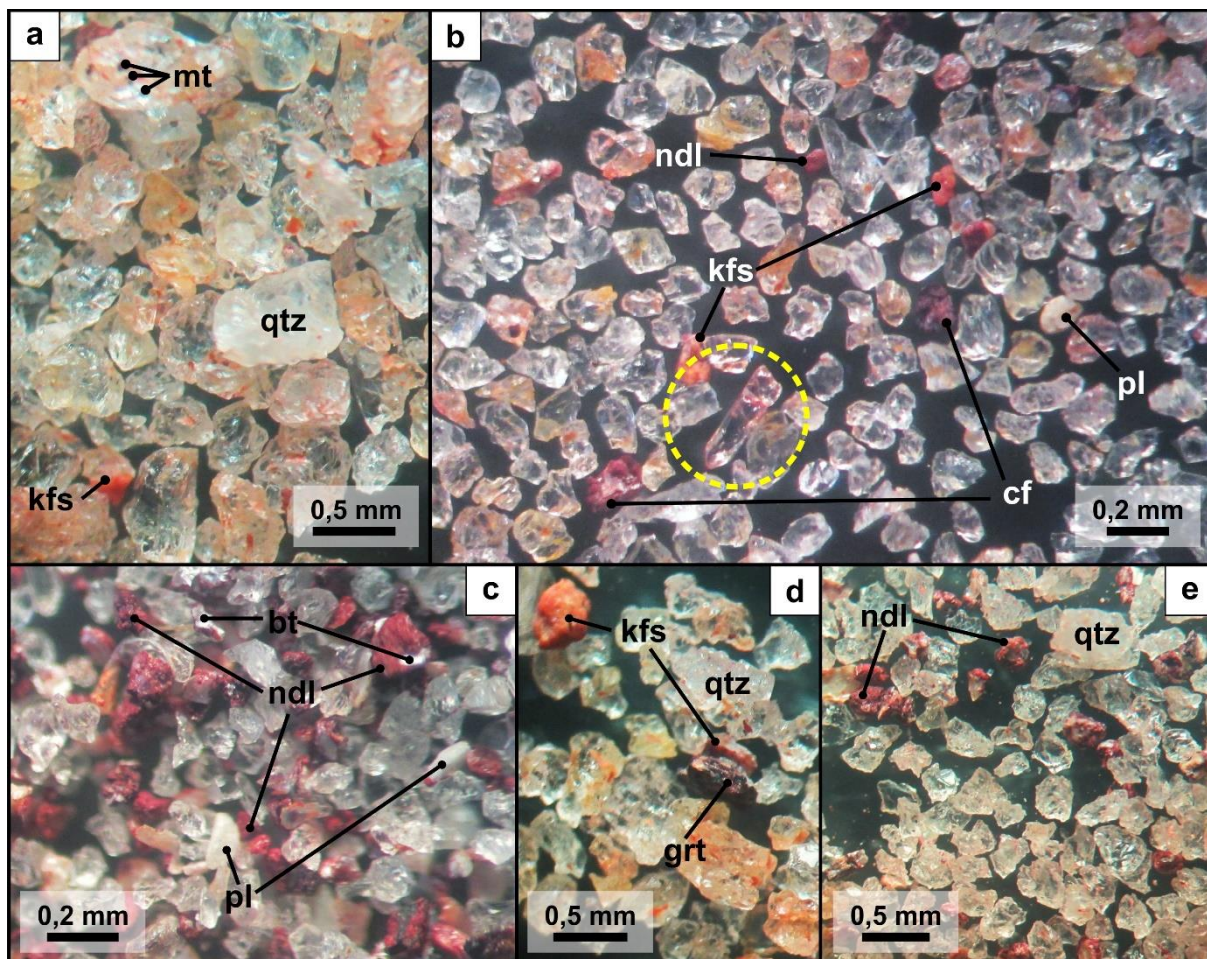
Tabela 5 - Composição mineralógica da fração areia dos horizontes A e B.

Horizonte	Fração	% relativa dos minerais						
		qtz	kfs	pl	bt	mt	grt	ndl e cf
A	AG	97	1	-	< 1	< 1	-	1
	AM	96	1	<1	< 1	< 1	<1	1
	AF	89	4	1	< 1	3	< 1	2
B	AG	97	2	-	< 1	< 1	-	< 1
	AM	87	1	<1	1	< 1	-	10
	AF	65	1	1	3	10	< 1	20

AG – areia grossa; AM – areia média; AF – areia fina; qtz – quartzo, kfs – k-feldspato, pl – plagioclásio, bt – biotita, mt – magnetita, grt – granada, ndl – nódulo, cf – concreção ferruginosa.

A mineralogia da fração areia do solo residual maduro é dominada por quartzo nos horizontes A e B, muitas vezes apresentando inclusões de magnetita (Figura 32a). Esses cristais mostram faces angulosas, indicando pouco ou nenhum transporte e alguns cristais exibem forma euédrica a subhédrica, apresentando faces bem definidas do processo de cristalização (Figura 33b).

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Diversos trabalhos apontam que a angularidade dos grãos do solo pode influenciar significativamente no ângulo de atrito e resistência ao cisalhamento, de modo que, solos com grãos mais angulosos tendem a apresentar maior ângulo de atrito e maior resistência ao cisalhamento (ROWE, 1962; MITCHELL; SOGA, 2005;

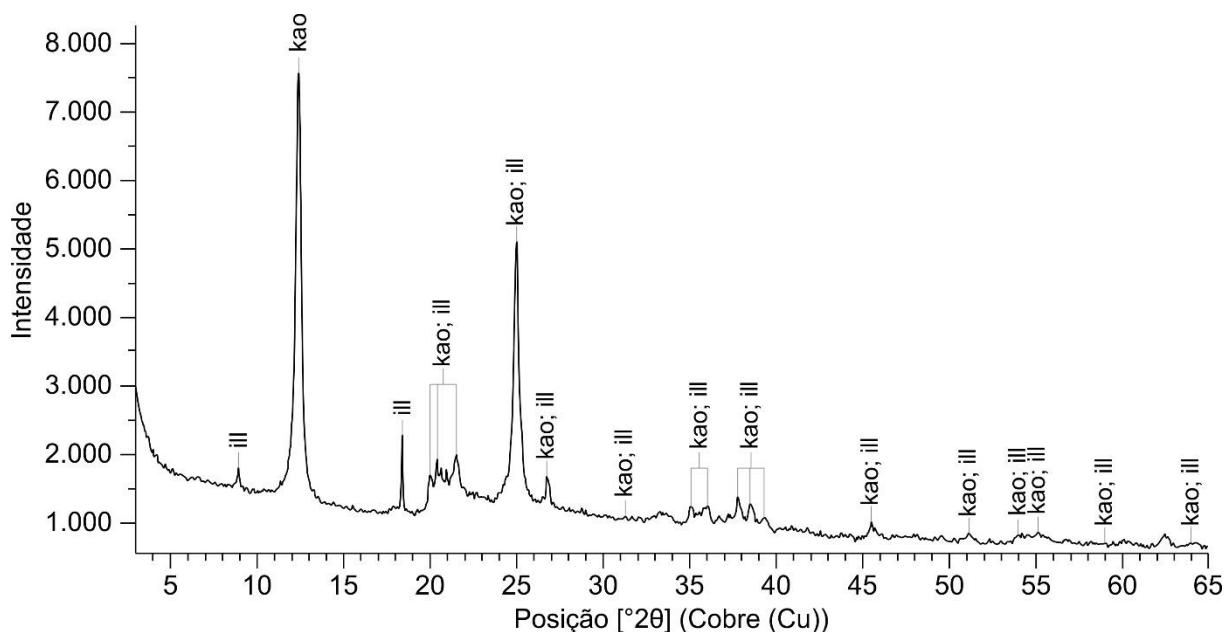
CHO *et al.*, 2006; CHERIF TAIBA, 2018; CHERIF TAIBA, 2019; NAFISI *et al.*, 2018). Ambos os horizontes A e B apresentam grãos com faces angulosas e grande quantidade de grãos de quartzo, contribuindo para maiores valores do ângulo de atrito e resistência ao cisalhamento. De acordo com Baxter, Atmatzidis e Krizek (1989) e Nafisi *et al.* (2018), também deve-se considerar o efeito do tamanho dos grãos, havendo um aumento da resistência para areias de granulometria mais fina. Embora o horizonte B apresente quantidade ligeiramente maior de grãos na fração areia fina, a angularidade dos grãos e a quantidade de grãos de quartzo é menor em relação ao horizonte A.

São observados cristais de biotita associada ou incrustada nos nódulos (Figura 33c), apresentando diferentes colorações (cinza, marrom, dourado e incolor). Os nódulos não possuem muitas diferenças das concreções ferruginosas quando vistos sob lupa binocular. No geral, as concreções ferruginosas apresentaram maior dureza e superfícies menos rugosas. Observou-se também uma proporção de biotita, magnetita, nódulos e concreções ferruginosas no horizonte B maior que no horizonte A, e essa concentração aumenta na fração areia fina. Além disso, encontrou-se nos horizontes A e B cristais de k-feldspato e plagioclásio em pequenas quantidades (Figura 33), e alguns cristais de granada na fração areia fina (Figura 33d).

Na fração argila, foram identificados caulinita e illita (Figura 34). A presença desses argilominerais no solo estudado está provavelmente associada a alteração dos feldspatos e da biotita presentes na rocha de origem. De acordo com Rebertus, Weed e Buol (1986) e Banfield (1990), o processo de intemperismo químico dos feldspatos e da biotita, além de outros argilominerais, pode resultar na formação de caulinita e illita. O processo de dessilicação parcial, dominante nas regiões de clima quente e úmido, favorece a estabilidade da caulinita nos solos (KÄMPF *et al.*, 2012).

Em um estudo realizado por Melfi *et al.* (1983) em solos desenvolvidos sobre rochas graníticas em diferentes climas no sudeste do Brasil, constatou-se que a caulinita é o principal mineral secundário, resultante geralmente da alteração de feldspatos. Pacheco *et al.* (2018) também encontrou a caulinita como argilomineral dominante na fração argila em solos desenvolvidos sobre paragneisses do Complexo Paraíba do Sul no município de Alegre.

Figura 34 - Difratograma de Raios-X da fração argila do horizonte A. Legenda: kao – caulinita e ill – ilita.



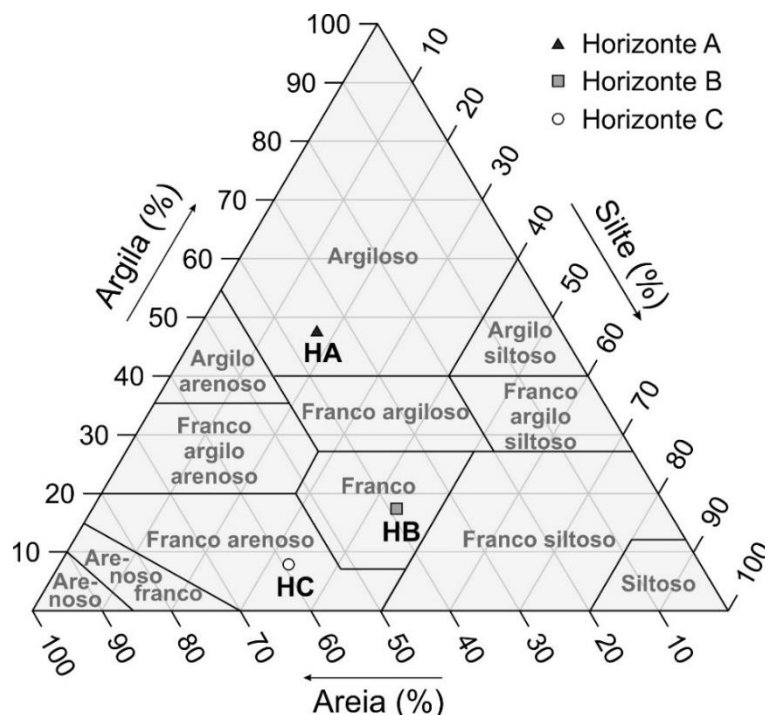
Fonte: Elaborado pelo autor.

A ilita também pode ser encontrada em pequenas quantidades na fração argila nos latossolos brasileiros (SCHAEFER; FABRIS; KER, 2008). A ausência de gibbsita no solo sugere que o intemperismo químico não foi tão intenso, ainda que o regolito desenvolvido seja espesso. Em situações em que o intemperismo é mais intenso, a caulinita pode ser transformada em gibbsita (KÄMPF *et al.*, 2012). Por outro lado, a presença de ilita no solo e ausência de montmorilonita está relacionada a elevada concentração de potássio presente na rocha de origem (k-feldspato e biotita), pois as condições de formação da ilita são semelhantes as condições de formação da montmorilonita, exceto pela elevada concentração de potássio (BESOAIN, 1985).

5.2.3 Parâmetros físicos e geotécnicos

Em relação a textura do solo, os horizontes A, B e C, podem ser classificados como, argiloso, franco e franco arenoso, respectivamente (Figura 35).

Figura 35 - Diagrama de classificação textural de cada horizonte de alteração do solo.



Fonte: Adaptado de Soil Survey Division Staff (1993).

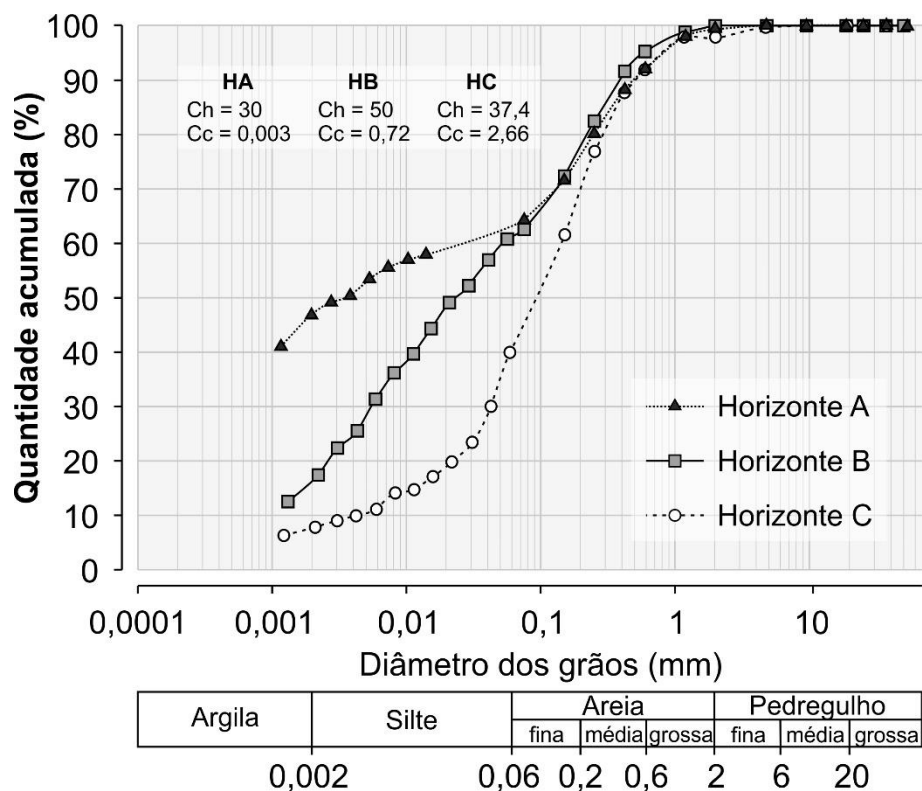
A Tabela 6 mostra como os parâmetros (textura, densidade e permeabilidade) do solo variam entre os horizontes A, B e C. A parte superior da tabela mostra que o teor de areia aumenta com a profundidade e o teor de finos (silte e argila) é maior nos horizontes A e B, sendo que o horizonte A é mais argiloso e o horizonte B é mais siltoso (Figura 35). Outros trabalhos realizados no município de Alegre apresentaram resultados semelhantes para a textura do solo. Coli, Hartwig e Pires (2022) investigaram o horizonte C de um solo desenvolvido sobre o mesmo substrato litológico, que apresentou > 50% dos grãos na fração areia e muito pouca argila. Pacheco *et al.* (2018) caracterizou o horizonte superficial de um latossolo que apresentou textura argilosa.

As curvas de distribuição granulométrica dos horizontes A, B e C são apresentadas na Figura 36.

Tabela 6 – Parâmetros dos horizontes A, B e C.

Parâmetros do solo	Unidades	Horizontes		
		A	B	C
Pedregulho		0,40	-	2,34
Areia grossa		7,48	4,75	5,74
Areia média		11,84	12,82	15,06
Areia fina	%	16,09	21,59	37,13
Areia total		35,41	39,17	57,94
Silte		17,35	43,45	31,87
Argila		46,84	17,39	7,85
Total de finos		64,19	60,84	39,72
Densidade aparente úmida	g cm ⁻³	1,34	1,31	1,79
Densidade aparente seca		1,16	1,13	1,65
Permeabilidade	mm h ⁻¹	31,46	6,26	0,22

Figura 36 - Curva de distribuição granulométrica dos horizontes A, B e C. Legenda: Ch – coeficiente de homogeneidade/uniformidade e Cc – coeficiente de curvatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O solo apresentou coeficiente de uniformidade superior a 15 em todos os horizontes, sendo considerado desuniforme de acordo com Caputo (1988). O coeficiente de curvatura foi inferior a 1 para os horizontes A e B, sendo classificados como mal graduados, e entre 1 e 3 para o horizonte C, sendo classificado como bem graduado de acordo com o mesmo autor.

A Tabela 6 mostra que a densidade dos horizontes A e B são semelhantes, enquanto a do horizonte C é bem maior devido a sua menor porosidade. Ainda segundo esta tabela, a permeabilidade diminui com a profundidade, apresentando a maior permeabilidade no horizonte A, ainda que esse horizonte possua maior teor de argila.

O valor mais elevado de permeabilidade para o horizonte A pode ser explicado pela presença de trincas, raízes e macroporos. De acordo com Mesquita e Moraes (2004), a estrutura do solo e, em especial, a presença de macroporos, pode resultar em um solo argiloso com valores de permeabilidade similares aos valores encontrados em solos arenosos. Além disso, as raízes de gramíneas também afetam o comportamento hidráulico dos solos, de modo que, o aumento da biomassa das raízes até certo limite, pode aumentar a permeabilidade do solo em até cinco vezes em relação a sua permeabilidade original (JOTISANKASA; SIRIRATTANACHAT, 2017).

O baixo valor de permeabilidade do horizonte B provavelmente está relacionada a ausência de macroporos, enquanto o valor muito baixo para o horizonte C pode ser explicado pela maior compactação do solo e maior quantidade de micas. Singer e Oster (1984) afirmam que solos com filossilicatos, incluindo micas e caulinita, são mais comuns de apresentarem redução de sua permeabilidade. Stakland (2010) também constatou que a presença de micas na fração areia fina e silte pode resultar na redução da permeabilidade do solo. Além disso, a permeabilidade pode variar com a orientação do bandamento reliquiar presente no horizonte C.

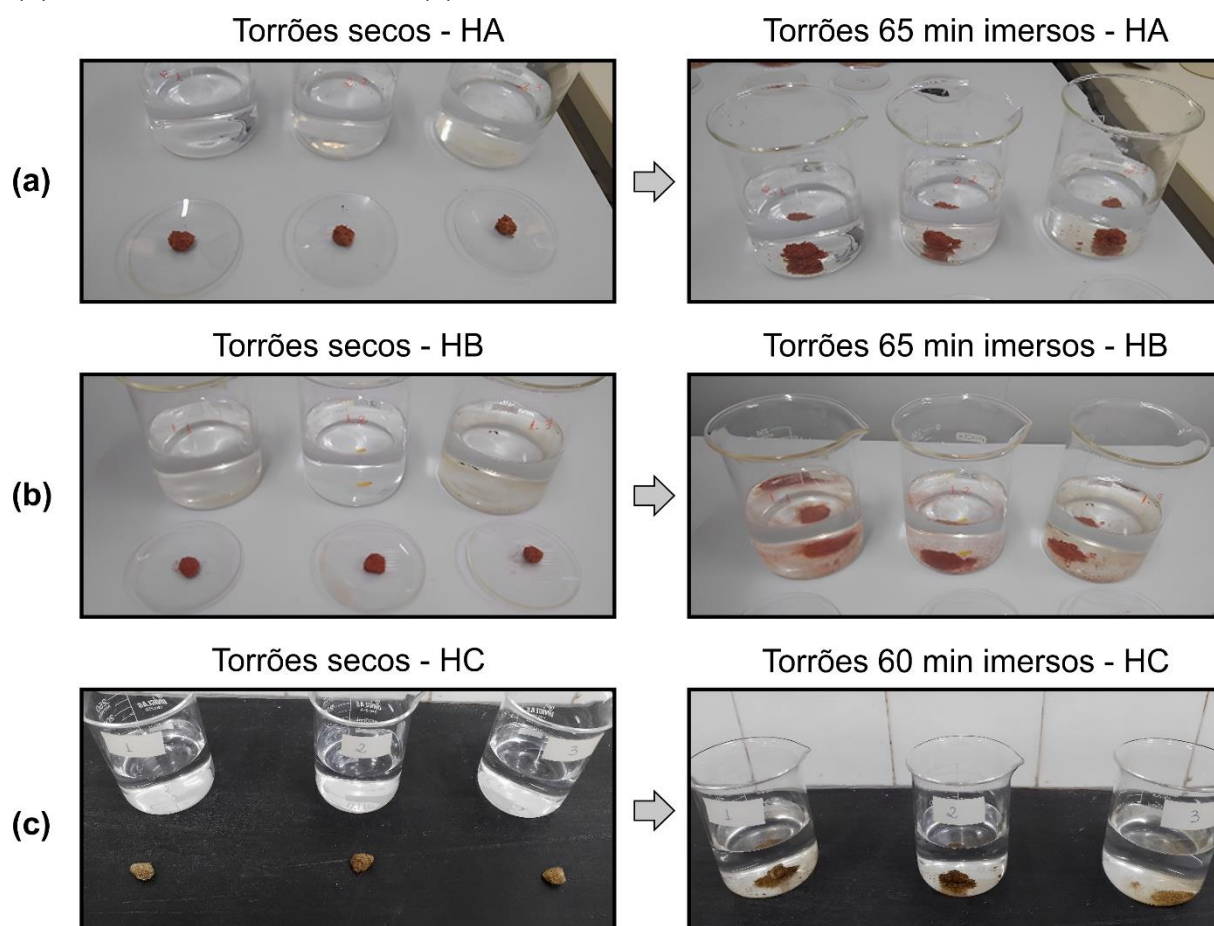
Em relação a fração argila, observou-se uma maior concentração de argila no horizonte A, que diminui significativamente para os horizontes B e C. Segundo Charkley, Zhang e Mei (2019), o conteúdo de argila e os argilominerais presentes no solo são importantes fatores que controlam a resistência ao cisalhamento do solo. Isso é evidenciado pelo resultado do ensaio do torrão (Tabela 7), realizado para o horizonte C, que embora tenha apresentado comportamento não dispersivo, os grãos de areia e silte constituintes dos torrões formaram uma pilha achatada no fundo do béquer ao final do ensaio (Figura 37c). Esse resultado se deve principalmente à baixa

concentração de grãos na fração argila (< 10%), enquanto a maior concentração de silte no horizonte B seria responsável pelo comportamento moderadamente dispersivo, deixando a água um pouco turva após o término do ensaio (Figura 37b).

Tabela 7 - Resultado do teste do torrão para as amostras de solo dos horizontes A, B e C.

Horizontes	Dispersibilidade das argilas
A	Levemente dispersivo
B	Moderadamente dispersivo
C	Não dispersivo

Figura 37 - Fotografias do ensaio do torrão (*Crumb test*): (a) torrões do horizonte A; (b) torrões do horizonte B; e (c) torrões do horizonte C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O horizonte A apresentou comportamento levemente dispersivo (Figura 37a), sendo o horizonte com maior concentração de grãos na fração argila. Esse

comportamento pode estar relacionado à mineralogia da fração argila, que é composta por caulinita e illita. Segundo Lado e Ben-Hur (2004) e Yilmaz *et al.* (2005), os solos cauliniticos têm maior estabilidade de agregados do que os solos montmoriloníticos, e são considerados solos estáveis, com baixa dispersibilidade das argilas (MCNEAL; COLEMAN, 1966), o que poderia explicar os resultados encontrados no ensaio. Lado e Ben-Hur (2004) ainda constataram que solos instáveis que contém caulinita e illita como argilominerais dominantes sofrem menor perda de solo do que os solos instáveis montmoriloníticos. Por outro lado, Huang *et al.* (2019), estudando as propriedades físico-químicas de solos não colapsáveis e solos com elevada incidência de voçorocas, identificou que os solos com maior incidência de voçorocas continham mais caulinita.

5.3 Modelagem numérica das voçorocas

5.3.1 Um evento de chuva

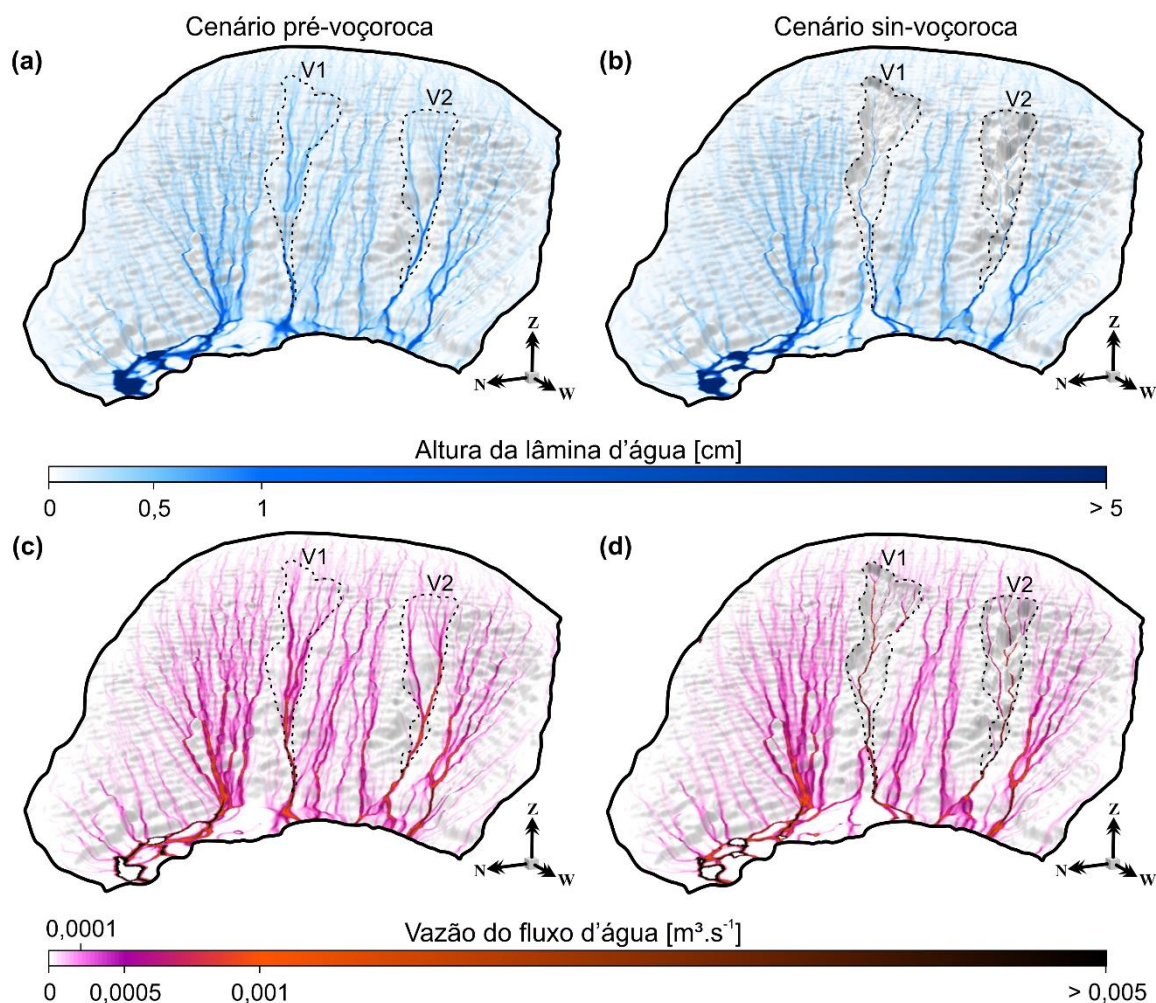
As simulações para o evento de chuva com precipitação excedente igual a 47 mm resultaram nos mapas da altura da lâmina d'água, vazão do fluxo d'água, fluxo de sedimentos e taxa de erosão-deposição efetiva, para o cenário pré- e sin-voçoroca.

A profundidade da água no cenário pré- e sin-voçoroca atingiram valores de até 34 e 37 cm, respectivamente. Os maiores valores ocorrem apenas nos locais mais planos e com grande concentração do fluxo superficial, principalmente na planície aluvial. No entanto, é pouco provável que a lâmina d'água real atinja essa espessura, sendo considerado como valores anômalos. Na área de projeção das voçorocas, se desconsiderarmos os valores anômalos, a profundidade da água permanece inferior a 4 cm no cenário pré-voçoroca e inferior a 5 cm no cenário sin-voçoroca. Os valores anômalos ocorrem nos locais que o fluxo principal intercepta uma superfície plana no interior das voçorocas.

As Figuras 38a,b mostram a existência de diversos canais de fluxo superficial distribuídos por toda a encosta, que convergem para canais mais pronunciados. A altura da lâmina d'água na encosta foi maior no cenário sin-voçoroca, pois ocorre maior concentração do fluxo d'água no talvegue das voçorocas. Essa grande modificação que as voçorocas causaram no fluxo superficial da água contribui para a intensificação do processo erosivo no interior das voçorocas, pois há um aumento

significativo da vazão do fluxo na superfície da encosta, chegando a valores superiores a $0,005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (5 L s^{-1}) no talvegue das voçorocas (Figura 38c,d).

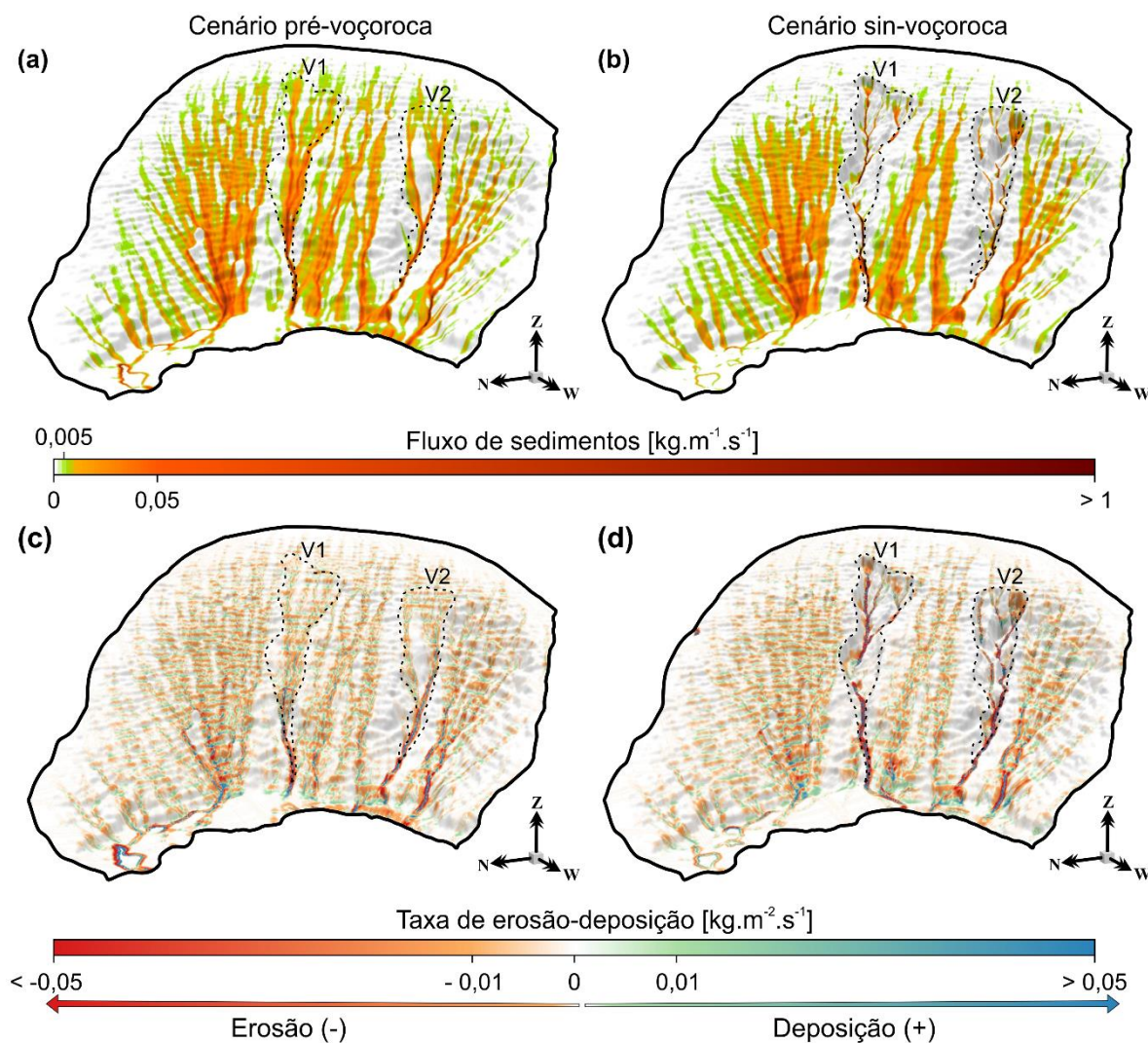
Figura 38 - Resultados da simulação do fluxo superficial da água para o evento de máxima precipitação: (a) mapa da altura da lâmina d'água no cenário pré-voçoroca; (b) mapa da altura da lâmina d'água no cenário sin-voçoroca; (c) mapa da vazão do fluxo d'água no cenário pré-voçoroca; e (d) mapa da vazão do fluxo d'água no cenário sin-voçoroca.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A variação espacial da vazão do fluxo superficial da água na simulação é semelhante à variação espacial da altura da lâmina d'água. No entanto, nas áreas totalmente planas, onde a declividade é igual a zero, o modelo não calculou a descarga, e nas extremidades dessas áreas planas, o modelo simulou valores muito elevados, considerados anômalos. Essa limitação também ocorre na simulação do fluxo de sedimentos e da taxa de erosão-deposição (Figura 39).

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A média das taxas de erosão-deposição para a área de estudo foi ligeiramente menor no cenário pré-voçoroca, com um valor de $-5,28 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, enquanto no cenário sin-voçoroca o valor médio é igual a $-1,76 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Esse valor médio considera as taxas de erosão e deposição, e o valor médio negativo remete as taxas de erosão maiores que as taxas de deposição. Portanto, isso apenas indica que há uma perda de solo um pouco superior no cenário pré-voçoroca. No entanto, as maiores taxas de erosão e deposição ocorrem no cenário sin-voçoroca, no interior das voçorocas. Este resultado mostra que a presença das voçorocas expõem os

horizontes mais suscetíveis a erosão e gerando superfícies mais declivosas provoca aceleração do processo erosivo na encosta.

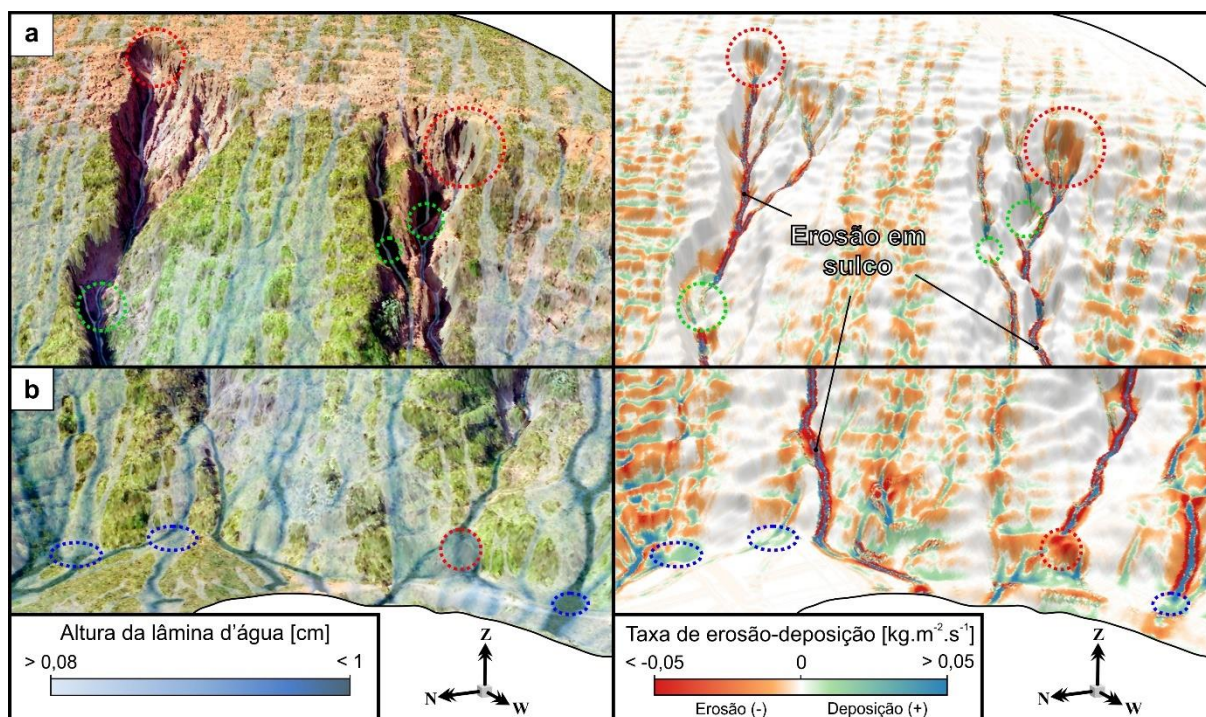
Em ambos os cenários, as maiores taxas de erosão e deposição estimadas pelo modelo foram consideradas valores anômalos, principalmente no cenário sin-voçoroca, algumas taxas representam mais de uma dezena de metros de solo removido ou depositado. Os valores anômalos ocorrem ao redor de superfícies planas que são interceptadas por linhas de fluxo com elevada vazão e altura da lâmina d'água, sendo essa uma das limitações apresentadas pelo modelo.

As Figura 39a,b mostram um padrão de distribuição para o fluxo de sedimentos semelhante ao padrão da taxa de erosão e deposição, apresentado na Figura 39c,d. No cenário pré-voçoroca, o modelo apresentou elevado fluxo de sedimentos e elevadas taxas de erosão e deposição no terço médio e inferior da encosta, inclusive um pequeno trecho de erosão linear, onde iniciou-se o processo de formação da Voçoroca 1. O mesmo ocorre na linha de fluxo da Voçoroca 2, mas a Voçoroca 2 se formou no terço médio-superior da encosta e o modelo reproduziu elevadas taxas de erosão no terço inferior.

Em locais de concentração do fluxo adjacentes as áreas de formação das voçorocas, o modelo também gerou estimativas de erosão e deposição mais acentuadas, semelhante ao que ocorre nos locais de projeção das voçorocas. Contudo, aparentemente a formação de voçorocas nesta encosta também está relacionada a fatores deflagradores não considerados pelo modelo, como os movimento de massa gravitacionais, e por isso, o modelo indica áreas potencialmente erosivas que na realidade podem ou não apresentar feições erosivas como sulcos, ravinas e voçorocas. Dessa forma, a simulação para um cenário pré-voçoroca auxilia no reconhecimento de áreas potencialmente erosivas, mas não define quais dessas áreas possuem maior potencial para se formar voçorocas.

Em ambos os cenários, o modelo geralmente estima taxas de deposição de sedimentos na parte interna das linhas de fluxo e taxas de erosão nas bordas das linhas de fluxo, mas de acordo com as observações de campo, isso quase não ocorre. A Figura 40 apresenta esses padrões com mais detalhes no cenário sin-voçoroca.

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



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em campo, o que se observa com mais frequência nos locais de concentração do fluxo superficial é a presença de feições erosivas, enquanto as áreas de deposição geralmente ocorrem onde há mudanças bruscas da declividade, quando o sedimento passa de uma rampa íngreme para uma área mais plana. Nesses locais onde há essas mudanças bruscas da declividade o modelo foi capaz de reproduzir padrões parcialmente condizentes com o observado em campo, inclusive, refletindo a microtopografia da encosta marcada pelos terracetes.

Nos resultados apresentados por Mitas e Mitasova (1998), Mitasova *et al.* (2013), Fernandes *et al.* (2017) e Harmon *et al.* (2019) observa-se comportamento similar para esses padrões das taxas de erosão e deposição. Apenas no talvegue das voçorocas, no cenário sin-voçoroca, onde aflora o horizonte C, o modelo foi capaz de reproduzir a erosão em sulcos (Figura 40). De modo geral, as taxas de erosão ocorrem, majoritariamente, em locais onde o fluxo superficial intercepta trechos em que a superfície apresenta curvatura linear ou convexa e declividade elevada. Apesar

de isso ser condizente com o observado em campo, esse padrão não explica as feições erosivas geradas nas áreas de convergência do fluxo.

À direita da voçoroca 2, no terço inferior da encosta, há uma ravina, que o modelo captura de forma semelhante a área de convergência do fluxo nas voçorocas (Figura 40b). O modelo reproduz taxas de erosão apenas nas paredes dessa feição erosiva, mas considerando os elevados valores de vazão do fluxo e declividade nesse local, é possível que ela represente o início da formação de mais uma voçoroca na encosta.

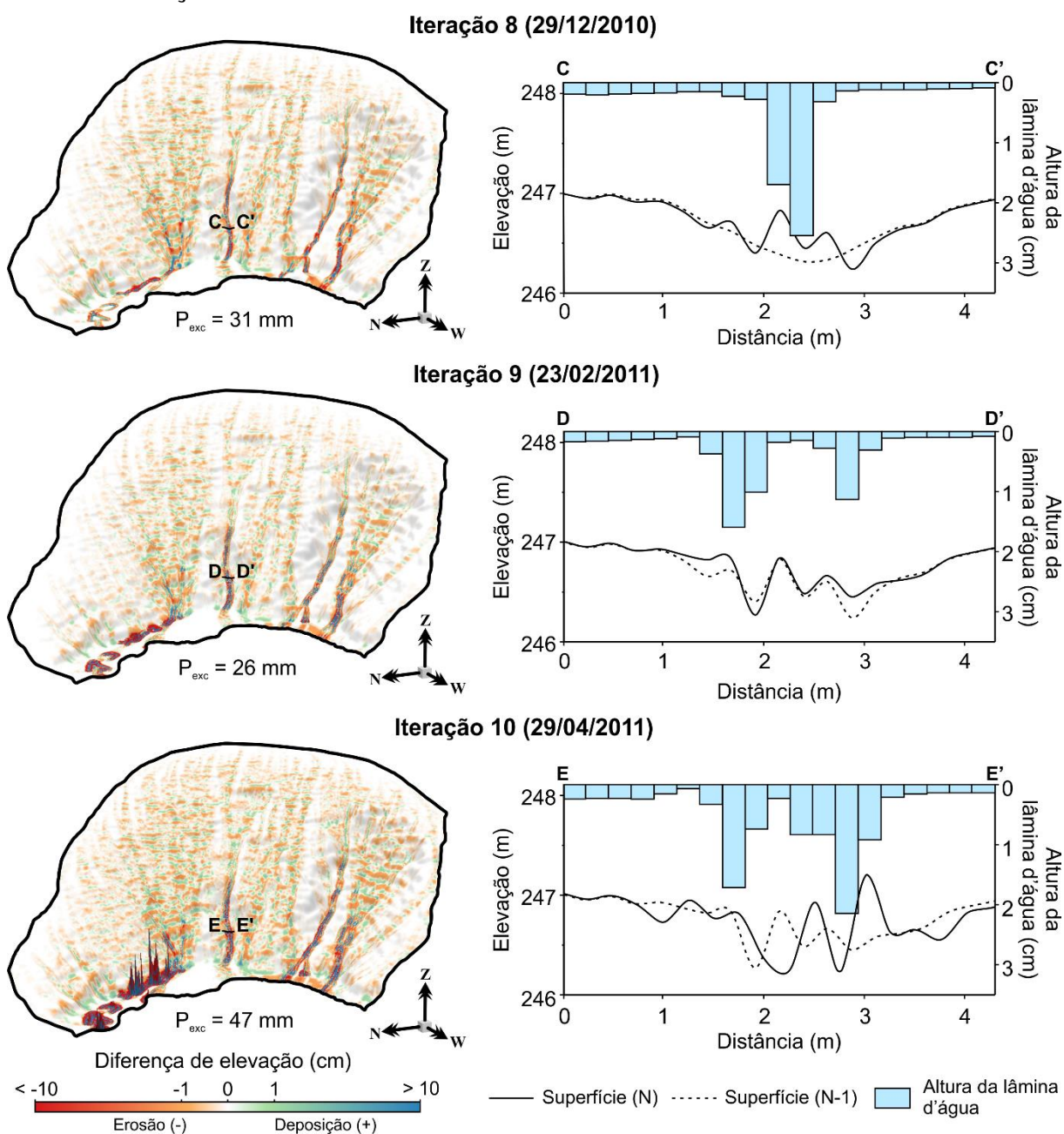
Portanto, podemos assumir que as taxas de erosão e deposição são parcialmente condizentes com o esperado. Contudo, é provável que o modelo simule a deposição de sedimentos em quase todas as linhas de fluxo devido a superestimativas das taxas de erosão em entressulco. Assim, o modelo resulta em um fluxo superficial com elevada concentração de sedimento nas drenagens principais da encosta (Figura 39a,b), de modo que a quantidade de sedimentos quase sempre excede a capacidade de transporte do fluxo, resultando na deposição dos sedimentos. Isso não ocorre somente nos locais que a vazão do fluxo atinge valores muito elevados, suficiente para carregar a grande quantidade de sedimento presente no fluxo superficial da água e causar o destacamento do solo, como no talvegue das voçorocas (Figura 38d), gerando a erosão em sulco.

A Figura 40 indica alguns locais que o modelo reproduziu padrões das taxas de erosão e deposição interessante. Nas paredes superiores das voçorocas e no terço inferior da encosta, a jusante da Voçoroca 2, onde há presença de alcovas, o modelo estimou taxas de erosão da ordem de $0,005$ a $0,02 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, equivalente a aproximadamente 1 a 6 cm de solo removido durante o evento de chuva. Essas taxas de erosão associado a esse padrão podem ajudar a identificar áreas suscetíveis a formação de alcovas. Por outro lado, o modelo indicou áreas de deposição na transição da encosta para a planície aluvial, com taxas de deposição de até $0,02 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, equivalente a aproximadamente 6 cm de sedimentos depositados sobre a superfície. Porém, a deposição estimada pelo modelo ocorre de forma bem restrita, nos locais mais próximos da encosta onde a declividade é diferente de zero e a lâmina d'água atinge altura superior a 5 mm. Por fim, observa-se que, além do fluxo superficial quase não causar erosão nos locais onde aflora a rocha alterada, ele também não deposita os sedimentos nesses locais.

5.3.2 Série de eventos de chuva

A Figura 41 mostra os resultados da simulação para 3 iterações consecutivas para a série de eventos de chuva.

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As taxas de erosão e deposição são mais pronunciadas na área de projeção da voçoroca 1, da voçoroca 2 e à sua direita, onde há convergência do fluxo superficial da água. Contudo, ao longo das iterações o modelo gera uma dinâmica de divergência do fluxo em pequenos canais paralelos. Isso ocorre devido ao padrão de erosão-deposição e a escala temporal de mudança da elevação.

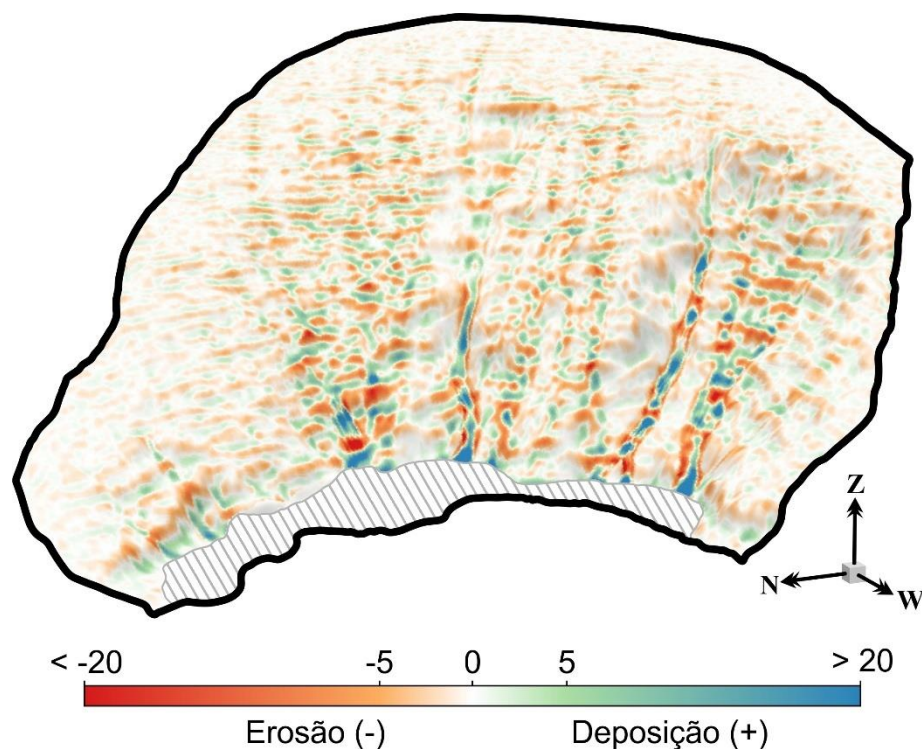
Nos perfis da Figura 41, observa-se que a deposição dos sedimentos ocorre associada com os locais de maior altura da lâmina d'água no perfil e erosão nas bordas. Como o modelo gera uma nova superfície de elevação apenas após o evento de chuva, com duração de 60 minutos, o resultado é uma grande quantidade de sedimentos depositados ou erodidos em uma mesma área, formando divisores do fluxo e sulcos paralelos. Isso se repete após cada iteração do modelo, variando sua intensidade de acordo com a precipitação excedente e tornando a topografia dos trechos de convergência do fluxo cada vez mais complexa.

Nas iterações 8, 9 e 10 observa-se a presença de valores anômalos no limite inferior do modelo. Esses valores surgem ao redor das áreas planas e se propagam para o seu interior e arredores com o passar das iterações. Além disso, a propagação destes erros resulta em erros ainda maiores. Constatou-se que isso está relacionado a limitação do modelo em realizar a simulação para áreas planas, mas ainda é desconhecido o que causa esta limitação.

Na Figura 42 é apresentado o resultado da estimativa de erosão e deposição para todo o período simulado. Como houve problemas na simulação da porção mais plana da área de estudo, foi necessário remover essa parte deste resultado para obter uma melhor visualização e interpretação sobre as demais áreas da encosta.

Os valores da diferença de elevação para o período simulado foram relativamente baixos, provavelmente devido a elevada resistência a erosão do horizonte mais superficial. Observa-se que a simulação resultou em um padrão de erosão e deposição nos terracetes em conforme com o esperado, onde a erosão ocorre nas partes mais declivosas e a deposição ocorre nas partes mais planas. Contudo, nos locais de maior convergência do fluxo, favoráveis ao desenvolvimento de sulcos, ravinas e voçorocas, ocorre a estimativa de deposição de sedimentos.

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.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.3 Limitações do modelo SIMWE

O modelo SIMWE possui limitações como a maioria dos modelos numéricos desenvolvidos para a simulação do processo de erosão hídrica de encostas. De acordo com Tucker e Hancock (2010) é preciso reconhecer que os modelos numéricos são versões simplificadas da realidade e podem não reproduzir todos os processos físicos presentes.

Algumas das limitações identificadas nesse trabalho já foram apontadas por outros pesquisadores, como a dificuldade em determinar os parâmetros necessários para execução do modelo, principalmente em relação aos parâmetros do solo (MITASOVA *et al.*, 2013) e o tempo prolongado de processamento (HARMON *et al.*, 2019).

Os coeficientes da capacidade de destacamento e transporte podem ser estimados e obtidos com menor dificuldade utilizando equações de regressão e resultados de ensaios laboratoriais disponíveis na literatura. Contudo, essa abordagem indireta pode gerar uma imprecisão ainda maior nas estimativas das taxas

de erosão-deposição. Adicionalmente, a variação vertical dos parâmetros do solo não é capturada pelo modelo, prejudicando a simulação da dinâmica erosiva que pode se intensificar ou reduzir ao atingir horizontes subsuperficiais com características distintas do horizonte superficial. De acordo com Harmon *et al.* (2019), há planos de incluir no modelo a possibilidade de ajustar os parâmetros referentes aos diferentes horizontes de solo no módulo *r.sim.terrain*.

Os dados de precipitação coletados de hora em hora não conseguem registrar corretamente chuvas fortes pouco duradouras, mas isto trata-se de uma limitação deste trabalho e não do modelo. Relacionado a isso, a simulação da evolução da topografia utilizando uma série de dados pluviométricos não permite capturar a dinâmica do processo erosivo corretamente. Essa limitação poderia ser contornada se fosse considerado intervalos menores para cada iteração da simulação, por exemplo 1 minuto, mas isso resultaria em outra limitação, causando uma maior propagação de erros e um custo computacional muito maior.

O método de amostragem por caminhamento utilizado no modelo SIMWE, em teoria, é muito boa para simular o transporte das partículas de solo erodidas. No entanto, o método tem um elevado custo computacional, impactando fortemente no tempo de processamento, sendo que, quanto maior o número de pontos de amostragem, maior o tempo de processamento. O custo computacional também é função do tamanho da área, resolução espacial do MDT, número de caminhantes, duração do evento de chuva, etc. Neste trabalho, a simulação de um evento de precipitação, utilizando 3 milhões de caminhantes, levou cerca de 4 horas, enquanto a simulação para uma série de 27 eventos de precipitação, utilizando 1 milhão de caminhantes, levou cerca de 5 dias.

5.4 Hipóteses sobre a gênese e evolução das voçorocas

Diferentes teorias já foram apresentadas para a gênese e evolução de voçorocas, muitas das quais levam em conta o processo de escoamento superficial concentrado contribuindo para o aprofundamento da voçoroca e movimentos de massa e erosão tubular (*piping*) contribuindo para o recuo da cabeceira e expansão lateral das voçorocas.

Neste trabalho, as voçorocas estudadas se formaram em uma encosta íngreme, entre os anos 2007 e 2013, sendo a voçoroca 1 a mais antiga. Após o

surgimento das voçorocas, ambas apresentaram uma rápida evolução, expandindo-se à montante, com alguns períodos de menor atividade erosiva e estabilidade parcial e temporária.

Embora não tenha sido possível acompanhar toda a evolução das voçorocas, as inspeções de campo e caracterização do solo auxiliaram na compreensão da gênese e evolução dessas feições. Os dados compilados mostram aderência parcial com a teoria proposta por Ireland, Sharpe e Eagle (1939) para a evolução de voçorocas e os movimentos de massa, sobretudo, os deslizamentos e fluxo de terra, que se mostraram um processo importante na expansão das voçorocas, conforme apontado por vários autores (VANDEKERCKHOVE; POESEN; GOVERS, 2003; WELLS; BENNETT; ALONSO, 2009; WELLS *et al.*, 2013; LIAO *et al.*, 2019; DONG *et al.*, 2019; ANDERSON; ROWNTREE; LE ROUX, 2021; GAO *et al.*, 2021).

Embora o escoamento superficial concentrado seja um dos principais agentes desencadeadores de voçorocas, constatou-se que: i) uma vez instaladas, as voçorocas se formaram e evoluíram de forma relativamente rápida; e ii) o solo superficial (horizonte A) possui baixa suscetibilidade à erosão. Portanto, o fluxo superficial concentrado da água levaria muitos anos para escavar o horizonte A e culminar na formação das voçorocas. Isso pode ser constatado ao sul da área de estudos, onde encontra-se um sistema de ravinas esculpidas pela erosão hídrica em trilhas de gado (Figura 43). Essas ravinas estão dispostas na porção sul das imagens apresentadas na Figura 28, onde aparece uma grande área com solo exposto, presente desde 2002.

De acordo com os dados compilados, verificou-se que o solo possui elevadas taxas de infiltração no horizonte superficial (horizonte A) e baixa permeabilidade nos horizontes subjacentes (horizontes B e C). Essa condição permite que a porção superficial do solo fique saturada mais facilmente durante chuvas fortes e duradouras.

A concentração do fluxo superficial e o pisoteio do gado pode levar à ruptura do terracete (OLIVEIRA, 2018) (Figura 44). No entanto, a presença dos terracetes na encosta íngreme gera uma microtopografia com superfícies mais planas sobre os terracetes e mais inclinadas entre os terracetes. Essa variação topográfica ao longo de quase toda a encosta reduz a velocidade do escoamento superficial e isso, provavelmente, ajudou a atenuar o processo erosivo na encosta durante muitos anos.

Figura 43 - Ravinas formadas ao longo das trilhas de gado ao lado da área de estudos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 - Terracetes rompidos na porção superior da área de estudos.

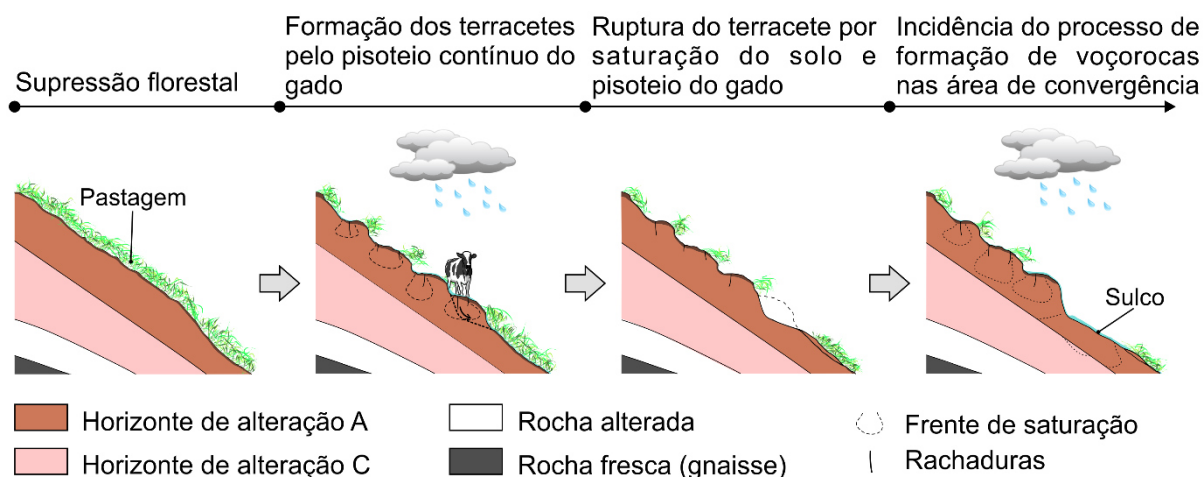


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 45 é ilustrado como o processo de deflagração da voçoroca poderia ocorrer. Inicialmente, ocorreria a supressão vegetal (formação de áreas de pastagem).

Em seguida, formam-se os terracetes pelo pisoteio contínuo do gado. Os terracetes facilitam a saturação local do solo superficial argiloso pelas chuvas, que permite uma elevada infiltração devido a elevada macroporosidade gerada por trincas e raízes. A saturação do solo leva a uma perda de resistência, podendo desencadear pequenas instabilizações na encosta (ANDERSON; ROWNTREE; LE ROUX, 2021). Quando um terracete se rompe, rampas maiores e mais declivosas são formadas entre os terracetes. A incidência de chuvas intensas e a concentração do fluxo superficial nestas superfícies favorece o aparecimento de sulcos, que podem evoluir para a formação de voçorocas (POESEN *et al.*, 2003; ZHANG *et al.*, 2019).

Figura 45 - Ilustração de como os terracetes poderiam induzir o processo erosivo no terço médio e inferior da encosta da área de estudos.

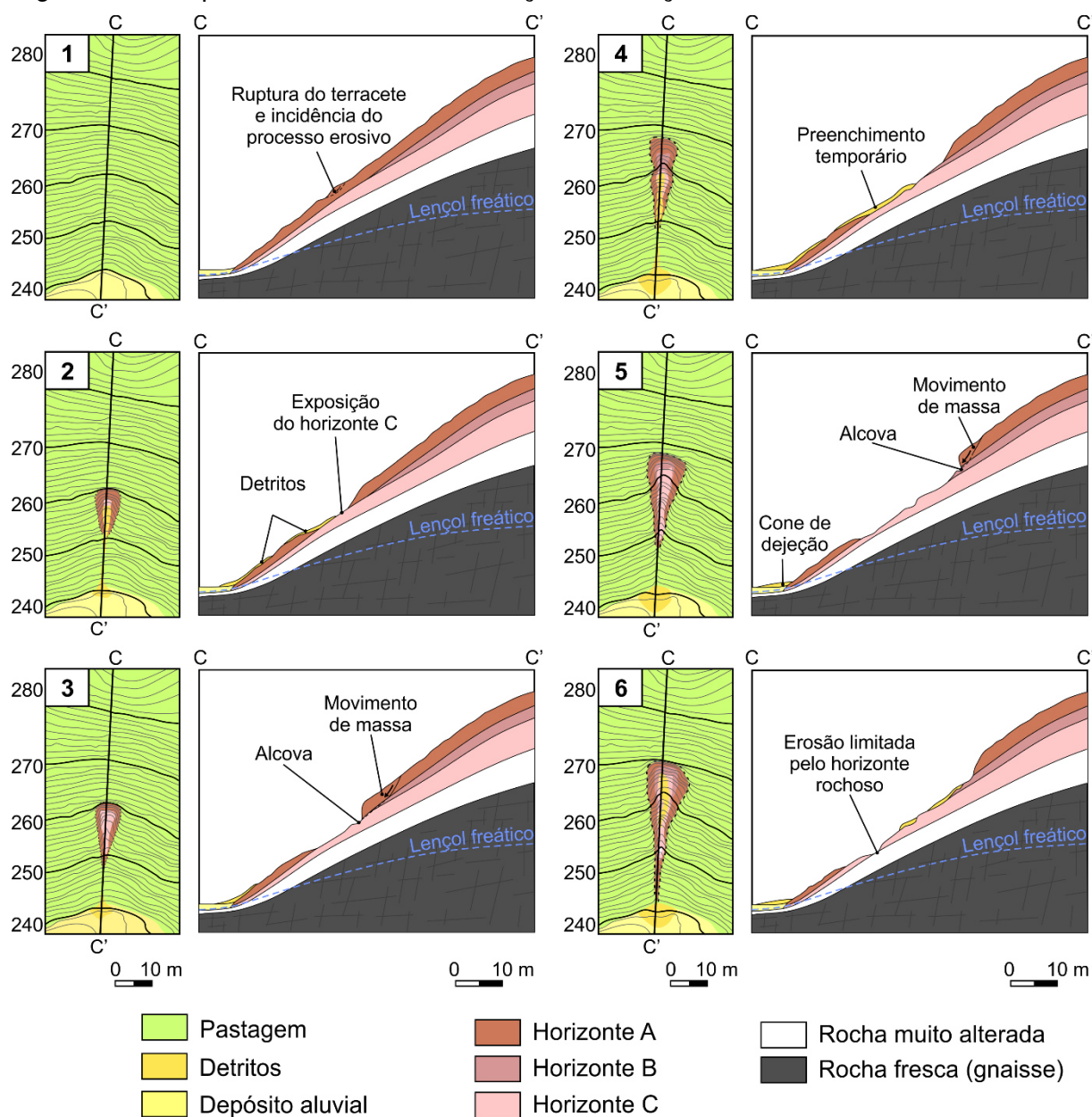


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 46 retrata o modelo de evolução geral das voçorocas estudadas. A Fase 1 inicia-se com a exposição do solo devido a movimentos de massa induzidos pela ruptura dos terracetes e erosão hídrica, como apresentado na Figura 45.

A remoção do horizonte superficial (horizonte A) expõe os horizontes mais susceptíveis à erosão (horizonte B e C), promovendo e intensificando o processo erosivo (Fase 2). Parte do material erodido pode permanecer temporariamente no interior da voçoroca.

Figura 46 - Esquema ilustrativo da evolução das voçorocas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com Valentin, Poesen e Yong (2005), a presença de uma camada superficial mais resistente à erosão contribui para a formação de paredes íngremes. Assim, a erosão no talvegue da voçoroca tende a ser bem maior do que nas laterais, onde o horizonte mais resistente (horizonte A) protege os horizontes menos resistentes. Dessa forma, à medida que o fluxo superficial começa a erodir os horizontes B e C, as paredes da voçoroca se tornam íngremes e a calha se torna mais profunda. Quando o fluxo superficial concentrado passa pelas paredes, ele ganha velocidade, formando pequenas cachoeiras, causando grande remoção de partículas

do solo pelo impacto da água. O resultado desse processo é a formação de alcovas na cabeceira, que contribuem para o aprofundamento da voçoroca e colapso das paredes (Fase 3, BURKARD; KOSTASCHUK, 1995; CHEN *et al.*, 2013; ZHANG *et al.*, 2019; GAO *et al.*, 2021).

Parte do material colapsado permanece provisoriamente na calha da voçoroca (Fase 4) podendo ou não ser removido no evento de chuva subsequente. De acordo com Kirkby e Bracken (2009), estes detritos podem se depositar em um ângulo de repouso estável, propício para o desenvolvimento de vegetação e estabilização da voçoroca.

Novos movimentos de massa na cabeceira da voçoroca causam a expansão da voçoroca à montante (Fase 5). Parte do material erodido irá se depositar na porção plana do sopé da encosta, levando à formação do cone de dejeção.

A continuidade do processo erosivo leva a incisão e aprofundamento da voçoroca até que o material mais resistente (rocha) seja interceptado (Fase 6, IRELAND; SHARPE; EAGLE, 1939). A partir de então, a voçoroca passaria a expandir-se lateralmente.

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.; MONTOYA, 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>

APÊNDICE A - FICHA DE DESCRIÇÃO DE CAMPO

Nome		Data	
Local		Coordenadas	
Descrição das voçorocas			
Descrição litológica e estrutural			
Descrição geomorfológica			
Compartimentos		Relevo	
Parte superior da encosta		Ondulado (colinas, D = 8-20%)	
Meia encosta		Fortemente ondulado (morros, D = 20-45%)	
Sopé da encosta		Montanhoso (D = 45-75%)	
Vale		Escarpado (D > 75%)	
Descrição hidrológica/hidrogeológica			

(continua)

(continuação)

Uso e ocupação do solo
Cobertura do solo
Descrição pedológica

(continua)

(continuação)

Croquis e observações

APÊNDICE B - SÉRIE DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO EXCEDENTE

Data e Hora (aaaa-mm-dd hh:mm:ss),	Precipitação excedente (mm)
2008-11-17 19:00:00,	5.2
2010-02-26 03:00:00,	8.4
2010-03-31 05:00:00,	3.8
2010-04-05 16:00:00,	14.4
2010-10-18 22:00:00,	9.8
2010-11-01 16:00:00,	5.4
2010-12-01 18:00:00,	1.4
2010-12-29 21:00:00,	31
2011-02-23 21:00:00,	26
2011-04-29 23:00:00,	47
2011-10-17 04:00:00,	28.2
2011-12-29 00:00:00,	11.2
2012-11-13 20:00:00,	7.8
2013-03-02 21:00:00,	18.4
2013-03-07 21:00:00,	3
2013-12-11 22:00:00,	2.2
2014-05-09 22:00:00,	17
2015-11-19 21:00:00,	24.2
2015-12-02 17:00:00,	3.6
2016-11-12 16:00:00,	3.4
2017-11-20 22:00:00,	1.8
2018-03-09 01:00:00,	3
2018-11-02 00:00:00,	2.8
2019-02-05 18:00:00,	6
2019-03-16 20:00:00,	5.4
2020-12-12 18:00:00,	2.2
2021-02-15 21:00:00,	0.23

**APÊNDICE C – ESTATÍSTICA DOS MAPAS RESULTANTES DAS SIMULAÇÕES
PARA UM EVENTO DE CHUVA.**

Resultados	Cenário		Média	Mediana	Mínimo	Máximo
Altura da lâmina d'água [cm]	Pré	V1	0,21	0,14	0,02	3,30
		V2	0,19	0,11	0,01	3,43
		AE	0,30	$9,61 \times 10^{-2}$	$3,57 \times 10^{-5}$	34,12
	Sin	V1	0,11	0,02	$2,02 \times 10^{-5}$	37,42
		V2	0,07	0,01	$2,02 \times 10^{-5}$	4,92
		AE	0,27	$7,59 \times 10^{-4}$	$2,02 \times 10^{-5}$	37,42
Vazão do fluxo superficial d'água [m ³ .s ⁻¹]	Pré	V1	$2,74 \times 10^{-4}$	$7,93 \times 10^{-5}$	$2,45 \times 10^{-6}$	0,01
		V2	$2,28 \times 10^{-4}$	$5,21 \times 10^{-5}$	$1,49 \times 10^{-6}$	0,01
		AE	$2,37 \times 10^{-4}$	$3,62 \times 10^{-5}$	0	0,15
	Sin	V1	$6,73 \times 10^{-4}$	$8,80 \times 10^{-6}$	0	0,61
		V2	$2,86 \times 10^{-4}$	$5,90 \times 10^{-6}$	0	0,03
		AE	$2,61 \times 10^{-4}$	$3,00 \times 10^{-5}$	0	0,61
Fluxo de sedimentos [kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]	Pré	V1	$1,61 \times 10^{-2}$	$6,42 \times 10^{-3}$	0	0,41
		V2	$1,23 \times 10^{-2}$	$3,80 \times 10^{-3}$	0	0,25
		AE	$5,59 \times 10^{-3}$	$3,40 \times 10^{-5}$	0	0,41
	Sin	V1	$2,76 \times 10^{-1}$	0	0	23,30
		V2	$1,57 \times 10^{-1}$	0	0	1,00
		AE	$5,59 \times 10^{-3}$	0	0	23,30
Taxa de erosão-deposição efetiva [kg.m ⁻² .s ⁻¹]	Pré	V1	$1,15 \times 10^{-4}$	$-2,03 \times 10^{-4}$	-0,44	0,48
		V2	$1,96 \times 10^{-4}$	0	-0,11	0,26
		AE	$-5,28 \times 10^{-5}$	0	-0,53	1,15
	Sin	V1	$-3,02 \times 10^{-5}$	0	-88,17	117,18
		V2	$1,74 \times 10^{-4}$	0	-3,86	4,69
		AE	$-1,76 \times 10^{-5}$	0	-88,17	117,18