

Artigo de Pesquisa

## Processos erosivos e dinâmica de duas voçorocas desenvolvidas em solo residual em uma encosta íngreme (Estado do Espírito Santo, Brasil)

*Erosion processes and dynamics of two gullies developed in residual soil on a steep slope (Espírito Santo State, Brazil)*

João Pedro Inacio Alves <sup>1</sup>, Marcos Eduardo Hartwig <sup>2</sup> e Juan Alfredo Ayala Espinoza <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Departamento de Geologia, Rio Claro, Brasil. joao.i.alves@unesp.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1018-0549>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Geologia, Alegre, Brasil. marcos.hartwig@ufes.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2661-7506>

<sup>3</sup> Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Geologia, Alegre, Brasil. juan.espinoza@ufes.br.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3817-3278>

Recebido: 11/10/2023; Aceito: 29/01/2024; Publicado: 26/03/2024

**Resumo:** Este estudo tem como objetivo compreender as causas e os processos que levaram a formação de duas voçorocas em uma encosta localizada no município de Alegre, Estado do Espírito Santo (Brasil). O estudo envolveu a caracterização geológica, pedológica e mineralógica, análise multitemporal de imagens de sensoriamento remoto, análise morfométrica e morfológica das voçorocas, e a descrição e identificação de feições erosivas indicativas de processos erosivos. Os resultados mostram que as voçorocas estão instaladas em uma encosta declivosa, cujos horizontes e tipos de solo possuem distribuição heterogênea. A taxa de perda de solo foi estimada em 198 m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup> para os anos de 2007 a 2021. A origem das voçorocas parece estar relacionada ao rompimento de terracetes, devido a pecuária intensiva de rebanhos bovinos. Uma vez instaladas, as voçorocas evoluíram rapidamente, com curtos períodos de estabilidade. Os movimentos de massa gravitacionais e a presença de trincas de tensão contribuíram para a expansão das voçorocas. O estudo exemplifica um caso típico de degradação do solo quando não são adotadas práticas de manejo e conservação do solo.

**Palavras-chave:** Erosão hídrica; Terracetes; Deterioração do solo; Morros; Solo residual.

**Abstract:** This study aims to understand the causes and processes that led to the formation of two gullies on a hillslope located in the municipality of Alegre, State of Espírito Santo (Brazil). The study involved the geological, pedological and mineralogical characterization, multitemporal analysis of remote sensing images, morphometric and morphological analysis of the gullies, and the description and identification of erosion features indicative of erosion processes. The results show that the gullies are installed on a steep slope, whose horizons and soil types have a heterogeneous distribution. The soil loss rate was estimated as 198 m<sup>3</sup>.year<sup>-1</sup> for the years 2007 to 2021. The origin of the gullies appears to be related to the failures terracetes, due to intensive cattle farming. Once installed, the gullies evolved quickly, with short periods of stability. Gravitational mass movements and the presence of tension cracks contributed to the gullies expansio. The study exemplifies a typical case of soil degradation when management practices and soil conservation are lacking.

**Keywords:** Water erosion; Terracetes; Soil deterioration; Hills; Residual soil.

## 1. Introdução

Diversos problemas ambientais, econômicos e sociais em várias partes do mundo são decorrentes do processo de erosão hídrica. A erosão hídrica pode causar a perda de áreas cultiváveis (VALENTIN; POESEN; YONG, 2005; CAPRA, 2013; GARCÍA-RUIZ et al., 2017; BENNETT; WELLS, 2018; HASSEN; BANTIDER, 2020), danos a infraestrutura (NWILO et al., 2011; CAPRA, 2013; EGBOKA; ORJI; NWANKWOALA, 2019), assoreamento e eutrofização de corpos d'água (GARCÍA-RUIZ, 2010; CAPRA, 2013; EGBOKA; ORJI; NWANKWOALA, 2019) e destruição de habitats da vida selvagem (WANTZEN, 2006; HASSEN; BANTIDER, 2020).

O processo de erosão hídrica é causado pelo impacto das gotas de chuva na superfície e pelo escoamento superficial da água (GUERRA, 2007; ROTTA; ZUQUETTE, 2015). O escoamento superficial é iniciado quando a intensidade da chuva excede a taxa de infiltração do solo (HORTON, 1945), podendo gerar um fluxo laminar (disperso) ou linear (concentrado) (GUERRA, 2007). Quando o fluxo é concentrado pode causar incisões lineares na superfície do solo na forma de sulcos, ravinas e voçorocas, sendo este último o estágio mais avançado e complexo da erosão hídrica (DAEE/IPT, 1990; FERREIRA; FERREIRA, 2009).

Voçorocas são incisões superficiais bem definidas que podem alcançar até dezenas de metros de profundidade, largura e extensão (GUERRA, 2007). De acordo com Thwaites et al. (2022), as voçorocas possuem paredes ou escarpas e são condicionadas por fluxos efêmeros. Segundo DAAE/IPT (1990), uma das características das voçorocas é que devem interceptar o lençol freático. Neste trabalho, adotou-se a conceituação definida por Thwaites et al. (2022).

As condições ambientais, como clima, tipo de solo, uso e cobertura do solo, morfologia da encosta etc., podem resultar em feições erosivas com morfologias bem distintas (POESEN et al., 2003).

Quando iniciada, a erosão em voçorocas pode se tornar a principal fonte de sedimentos produzidos pela erosão hídrica em uma bacia hidrográfica (POESEN et al., 2003; VALENTIN; POESEN; YONG, 2005; CASALÍ; GIMENEZ; BENNETT, 2009; CAPRA, 2013). Devido aos impactos negativos que as voçorocas podem causar, a quantidade de estudos voltados para a erosão em voçorocas aumentou consideravelmente (CASTILLO; GÓMEZ, 2016), inclusive no Brasil (PEREIRA; RODRIGUES, 2022). Contudo, pairam ainda muitas lacunas sobre sua formação e evolução, comprometendo o planejamento territorial dos municípios e dificultando a identificação das melhores práticas de conservação e recuperação (NYSSSEN et al., 2007; CAPRA, 2013), tais como aquelas apresentadas por Rodrigues, Confessor e Pereira (2023).

O município de Alegre, localizado no sul do Estado do Espírito Santo, apresenta um grande número de voçorocas que se destacam por suas incríveis dimensões e contraste com a paisagem natural. Estas feições estão esculpidas em solos residuais de gnaisses, em encostas íngremes, que são utilizadas para a pecuária bovina. Uma característica comum das voçorocas do município é que não interceptam o lençol freático (MARCHIORO; SILVA; CORREA, 2016; HARTWIG; RIBEIRO, 2021; HARTWIG; ALVES, 2022). Do exposto, o objetivo deste trabalho foi compreender as causas e os processos que levaram à formação de duas voçorocas.

## 2. Áreas de Estudo

A área de estudos fica localizada no sudeste do Brasil, na bacia do rio Alegre, a cerca de cinco quilômetros ao sul da cidade de Alegre (20°47'50"S, 41°32'38"W), sul do Estado do Espírito Santo (Figura 1). A área compreende uma encosta íngreme com variação altimétrica entre 236 e 305 m, atingindo aproximadamente 130 m de comprimento do topo até a base e abrangendo uma área de 15.176 m<sup>2</sup>.

O clima da região é caracterizado por um inverno seco e verão chuvoso, com precipitação média anual igual a 1.341 mm e temperatura média anual de 23,1 °C (LIMA et al., 2008). O regime pluviométrico para os últimos 15 anos manteve-se entre 885 e 1.836 mm.ano<sup>-1</sup>, com média igual a 1.253 mm.ano<sup>-1</sup>. Os meses de novembro e dezembro são os mais chuvosos, enquanto os meses de junho, julho e agosto são os mais secos. Os elevados volumes de precipitação que ocorrem entre os meses de outubro e abril estão relacionados a Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS (ANDRADE, 2011). De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da região é classificado como subtropical úmido (Cwa).

Geologicamente, a área de estudos está localizada na porção sul do Órogeno Araçuai de idade Neoproterozoica (PEDROSA-SOARES; WIEDMANN-LEONARDOS, 2000) e está inserida dentro do Complexo Paraíba do Sul (OLIVEIRA et al., 1983; VIEIRA, 1997; HORN et al., 2007), que é a unidade de mapeamento de maior incidência de voçorocas no município de Alegre (HARTWIG; ALVES, 2022). Essa unidade é composta por

paragneisses de médio a alto grau metamórfico que, localmente, podem estar milonitizados e migmatizados (OLIVEIRA et al., 1983; VIEIRA, 1997).

Argissolos vermelho e Latossolos Vermelho-Amarelo são encontrados sobre o substrato litológico na bacia do rio Alegre (PACHECO, 2011). Entretanto, no mapeamento realizado por Cunha et al. (2016), na escala de 1:400.000, os solos da área foram classificados como Nitossolo Vermelho. De acordo com Pacheco (2011) e Ab’Sáber (2012), os solos da bacia do rio Alegre geralmente apresentam um espesso horizonte de alteração (AB’SÁBER, 2012), exceto nas proximidades da cidade de Alegre, onde a alteração da rocha tende a ser pouco profunda (OLIVEIRA et al., 1983).

A paisagem da área é caracterizada pelos morros arredondados em forma de domo, conhecidos como “Mares de Morros” (AB’SÁBER, 2012). O uso do solo está associado a pecuária bovina, com a formação de pequenos degraus em toda a encosta, que são produzidos pelo efeito do pisoteio contínuo do gado. Esses degraus são conhecidos como terracetes.

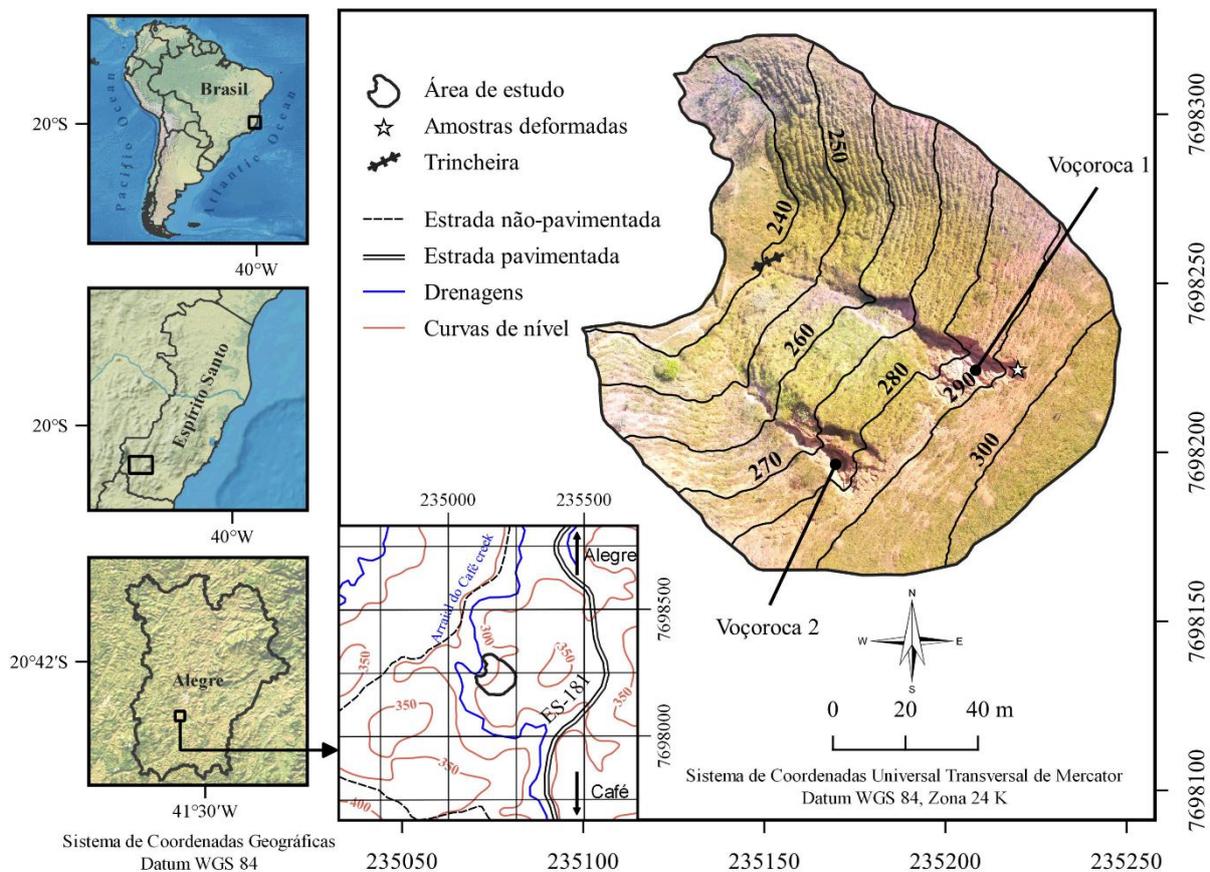


Figura 1. Localização das áreas de estudo.

### 3. Materiais e Métodos

#### 3.1. Caracterização geológica e pedológica

O material rochoso foi descrito conforme Fettes e Desmons (2014). Utilizou-se a notação *dip direction/dip* para o cadastramento de estruturas tectônicas. Escavou-se manualmente uma trincheira de 1,3 m de profundidade, 1,45 m de comprimento e 0,7 m de largura para a descrição dos materiais presentes no sopé da encosta (Figura 2). A trincheira foi aberta de modo a explicitar as características texturais e estruturais do depósito. A dimensão da trincheira foi limitada pelas condições de acesso ao local, bem como pelos equipamentos disponíveis. Procurou-se aprofundar a trincheira até o topo do depósito aluvionar subjacente. Além disso, realizou-se a descrição de um perfil de escavação fluvial as margens do Ribeirão Arraial do Café. Os materiais foram classificados a partir de seus aspectos texturais e estruturais.



**Figura 2.** Trincheira escavada manualmente para a descrição dos materiais presentes no sopé da encosta.

A descrição do solo seguiu as orientações indicadas em Prado (1995) e Vaz (1996). O solo foi classificado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (SANTOS et al., 2018) e os principais critérios morfológicos avaliados em cada horizonte de alteração foram: cor (tabela de cores de Munsell), cerosidade, consistência, plasticidade e granulometria.

Duas amostras deformadas de solo foram coletadas nos horizontes A e B, na porção superior da voçoroca 1, para a determinação da circularidade dos grãos e a mineralogia da fração areia e da fração argila do solo. A análise mineralógica da fração areia foi realizada através de lupa binocular no Laboratório de Sedimentologia, do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Utilizou-se o gráfico proposto por Krumbein (1941) para avaliar a circularidade dos grãos. A análise mineralógica da fração argila foi realizada apenas para o horizonte A, pelo fato deste horizonte apresentar maior conteúdo em argila e estar totalmente exposto aos processos de erosão hídrica. Nos resultados apresentados por Pacheco et al. (2018), em um estudo realizado no município de Alegre-ES, os solos apresentam pouca variação na composição mineralógica da fração argila entre os diferentes horizontes. A análise foi realizada através da difração de raios-X (DRX), 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.

### 3.2. Análise multitemporal de imagens

Para avaliar a evolução temporal das voçorocas foram interpretadas (visualmente) fotografias aéreas, ortofotos e imagens de satélite:

- Fotografia aérea de número 3707, obtida no aerolevantamento realizado pelo Instituto Brasileiro do Café (IBC), através do Grupo Executivo de Racionalização da Cafeicultura na década de 1970, disponibilizada gratuitamente em <https://geobases.es.gov.br/>;
- Ortofotomosaicos resultantes de levantamentos aerofotogramétricos estaduais em escala igual ou melhor a 1:25.000 nos anos de 2007 e 2013, com resoluções espaciais de 1 m e 0,25 m, respectivamente, disponibilizados em <https://geobases.es.gov.br/>;

- Ortofotos derivadas de levantamentos aerofotogramétricos locais com *Ground Sample Distance* (GSD) inferior a 10 cm/pixel, realizados nos anos de 2020, 2021 e 2022;
- Imagens de satélite do Google Earth Pro correspondentes aos anos de 2002, 2009, 2017 e 2019, com resolução espacial entre 0,2 e 0,6 m.

O levantamento aerofotogramétrico foi realizado com Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT) quadricóptero, modelo DJI Phantom 4 - Standard. O processamento das imagens foi realizado no software OpenDroneMap™ (WebODM), com intuito de gerar o ortofotomosaico e um modelo digital de terreno (MDT) recente e de alta resolução espacial. O MDT gerado baseia-se na técnica *Structure-from-Motion* Multi View Stereo (SfM-MVS). Detalhes podem ser conferidos em Westoby et al. (2012) e Carrivick, Smith e Quincey (2016).

No intuito de melhorar a nitidez de algumas imagens para fins de fotointerpretação utilizou-se a ferramenta PicWish (<https://picwish.com/>).

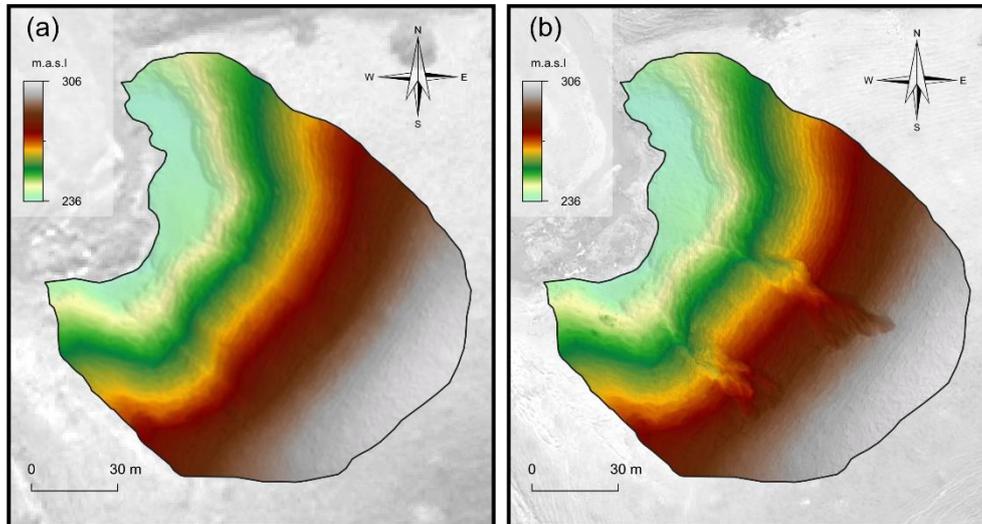
As imagens foram integradas no software ArcGIS 10.2 (ESRI) e a análise foi realizada em escala 1:500. Utilizou-se o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator e o *Datum* horizontal WGS-1984 (zona 24S).

### 3.3. Caracterização morfométrica e morfológica das voçorocas

A análise morfométrica consistiu na determinação dos seguintes parâmetros: comprimento, largura, perímetro e área em planta a partir da ortofoto obtida no ano de 2021. A profundidade máxima e o volume de material erodido foram estimados a partir do MDT, derivado das imagens de VANT do ano de 2021 (Figura 3).

O MDT pré-voçoroca foi reconstruído a partir do MDT atual. Para tanto, os dados de elevação presentes nas feições erosivas foram removidos e os demais dados foram interpolados através da técnica *thin plate spline* (WAHBA, 1991).

A análise morfológica consistiu na identificação das formas em planta e em perfil das voçorocas. Foram analisados três perfis transversais e um perfil longitudinal em cada voçoroca.



**Figura 3.** Modelos Digitais de Terreno (MDTs): (a) pré-voçoroca e (b) atual.

### 3.4. Identificação e análise das feições e processos erosivos

Para identificação das feições e processos erosivos foram realizadas inspeções periódicas nos anos de 2021 e 2022. Foram descritas as feições erosivas presentes nas paredes e no talvegue das voçorocas, bem como evidências de expansão das voçorocas, transporte e deposição de sedimentos.

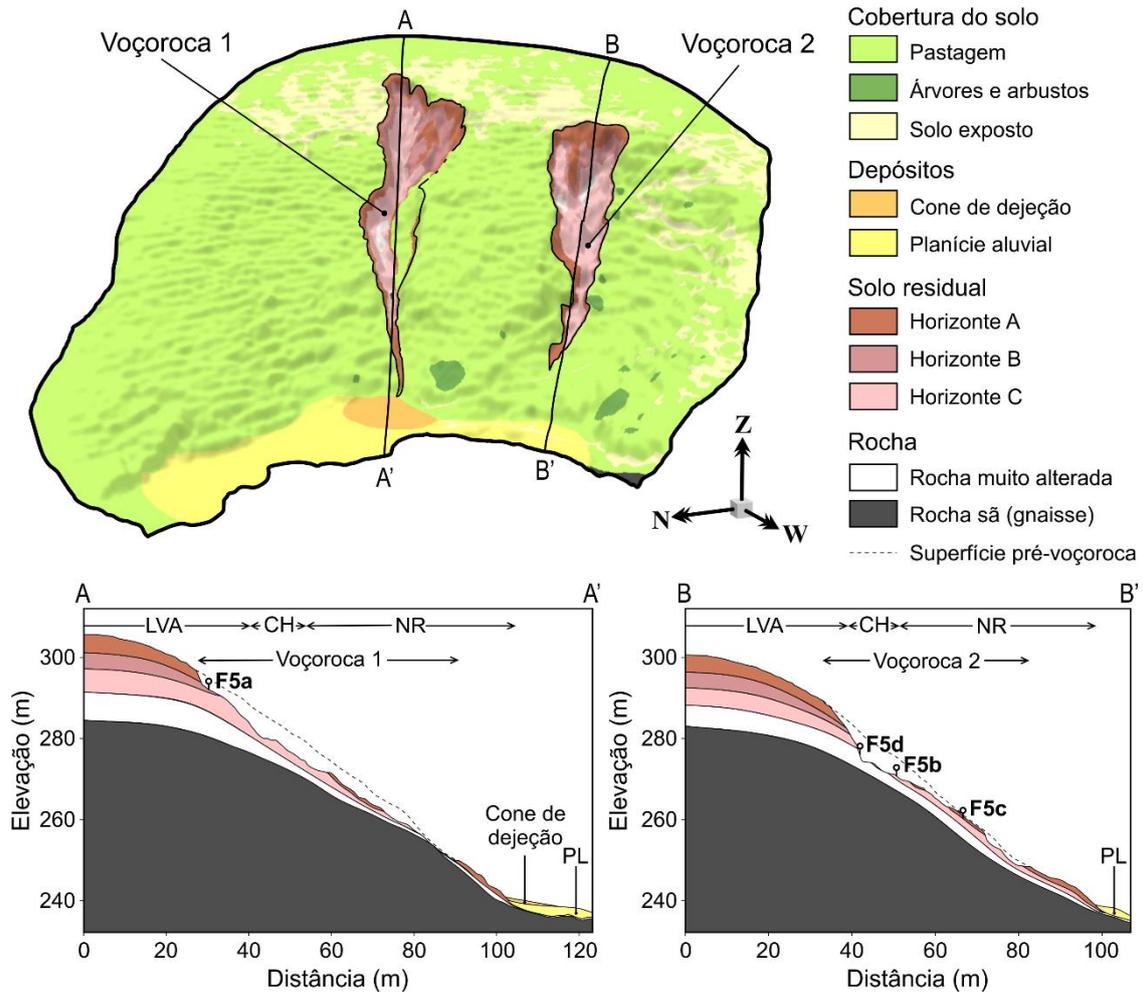
Oliveira (2007) descreve diversas feições erosivas associadas as voçorocas (e.g. pedestais, sulcos, alcovas, etc.) e relaciona essas feições aos mecanismos e processos erosivos atuantes no seu desenvolvimento. Este material foi utilizado como guia para realizar a descrição e reconhecimento das feições erosivas em campo.

#### 4. Resultados e discussão

##### 4.1. Geologia e pedologia da encosta

O substrato litológico foi classificado como uma biotita gnaisse milonítico com granadas, aflorando no leito e em alguns locais nas margens do Ribeirão Arraial do Café. O mesmo material também foi descrito por Coli, Hartwig e Pires (2022) em uma encosta a 2,2 km ao norte da área de estudos. O bandamento gnáissico possui atitude variando de 31°/30° a 50°/45°. A rocha pode conter enclaves máficos deformados de até aproximadamente 40 cm.

Sobre o substrato litológico, identificou-se um Latossolo Vermelho-Amarelo no terço superior da encosta, um Neossolo Regolítico no terço médio e inferior, e dois depósitos sedimentares no sopé da encosta (Figura 4).



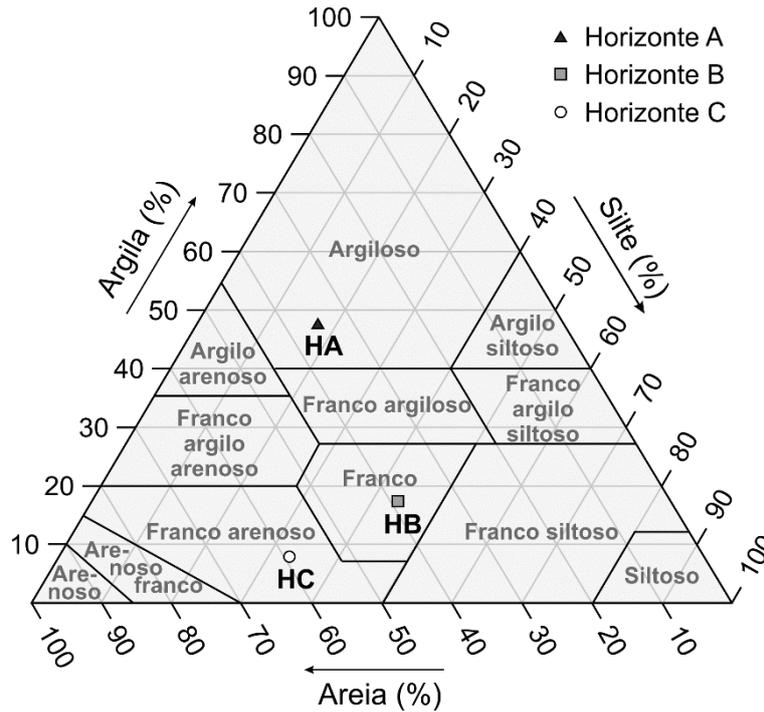
**Figura 4.** Geologia e pedologia da encosta em perspectiva (acima) e em perfil (abaixo). Legenda: LVA – Latossolo Vermelho-Amarelo, CH – Cambissolo Háplico, NR – Neossolo Regolítico, PL – Planície aluvial, e F5a, F5b, F5c, e F5d correspondem as posições das fotografias apresentadas na Figura 5.

O perfil de solo mostra variação lateral. No terço superior estão presentes os horizontes de alteração A, B e C, enquanto no terço médio e inferior apenas os horizontes A e C. Na transição do Latossolo Vermelho-Amarelo para o Neossolo Regolítico, o solo apresenta horizonte Bi (incipiente), caracterizando-se como Cambissolo Háplico (Figura 5b).



**Figura 5.** 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.

O horizonte A possui textura argilosa (Figura 6), cor marrom claro a marrom avermelhado (2,5YR 5/6), cerosidade fraca, coesão moderada e consistência dura e firme quando seco e ligeiramente plástica quando molhado, sendo caracterizado como horizonte A proeminente. A espessura do horizonte é variável, atingindo mais de 1,5 m na parte superior da voçoroca (Figura 5a) e 1 metro na parte inferior (Figura 5c), com elevada quantidade de raízes nos primeiros 20 cm de profundidade. No entanto, a transição do horizonte A para o horizonte Bw (latossólico) é pouco perceptível na porção superior da voçoroca, sendo reconhecida apenas após aproximadamente 2 m de profundidade.

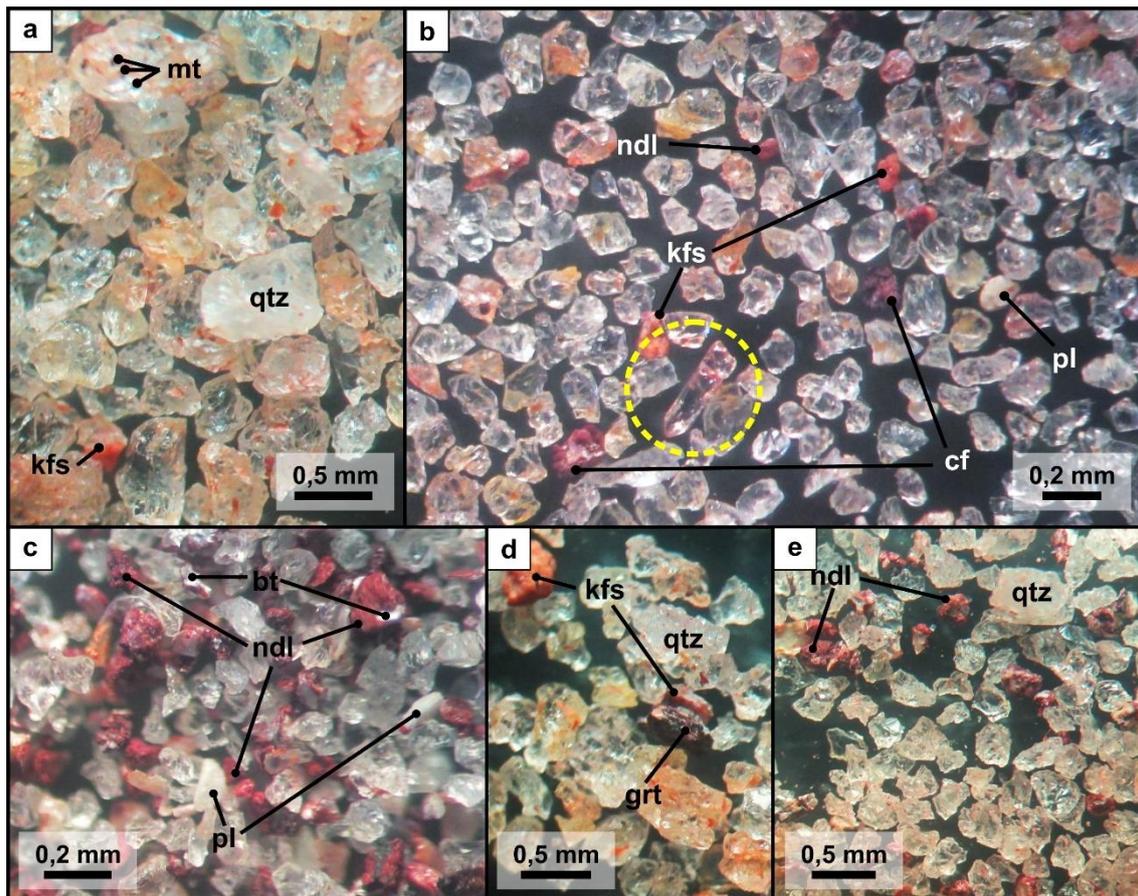


**Figura 6.** Diagrama de classificação textural dos horizontes de solo. Fonte: Adaptado de Soil Survey Division Staff (1993).

O horizonte Bw aparece apenas no terço superior da encosta, possui textura franca, cor marrom avermelhado (10R 4/8), cerosidade moderada, coesão baixa e consistência macia e firme quando seco e não plástica quando molhado. A espessura deste horizonte também é variável, atingindo espessuras maiores que 1 m no terço superior da encosta (Figura 5a), afinando ladeira abaixo (Figura 5b), onde assume características de um horizonte Bi. No entanto, não foi possível mensurar a espessura máxima deste horizonte em nenhum dos perfis observados.

O horizonte C possui textura predominantemente franco arenosa, com foliação herdada da rocha subjacente, que resulta em um horizonte com diferentes cores (rosa, cinza e verde amarronzado) (Figura 5b, c, d). Essas cores estão relacionadas, principalmente, a concentração de determinados minerais, como caulinita (rosa), biotita e quartzo (cinza) e micas (verde amarronzado). Este horizonte apresentou coesão muito baixa, sendo facilmente desagregado, principalmente quando molhado.

Quanto a mineralogia da fração areia, no horizonte A, o quartzo compreende mais que 94% dos minerais, com uma quantidade muito menor de k-feldspato (2%), nódulos e concreções ferruginosas (2%) e magnetita (1%) (Figura 7a, b, d). Biotita e plagioclásio compõem menos de 1% da composição mineralógica e cristais de granada são encontrados eventualmente (Figura 7d).

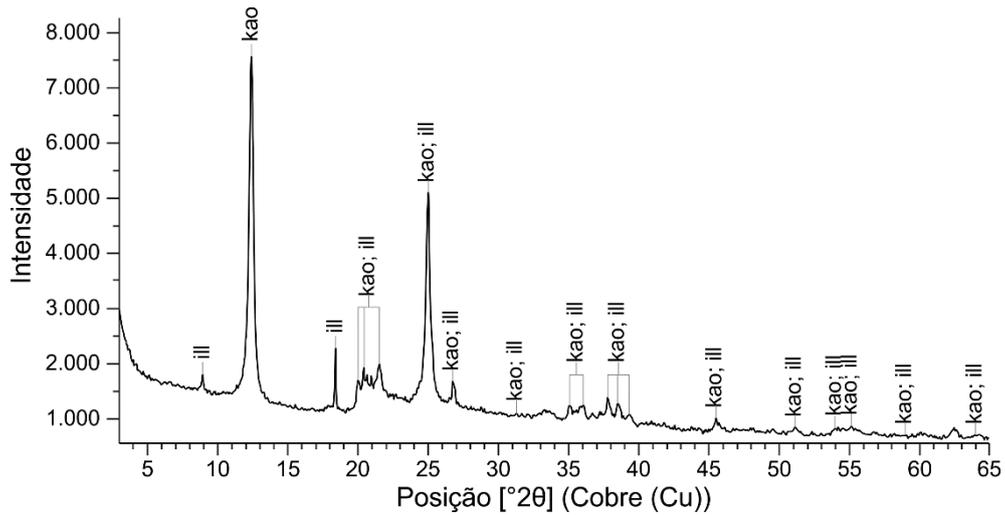


**Figura 7.** Fração areia das amostras de solo dos horizontes A e B sob lupa binocular: (a) fração areia grossa do horizonte A; (b) fração areia fina do horizonte A, com destaque para a presença de quartzo subbédrico; (c) fração areia fina do horizonte B; (d) fração areia média do horizonte A; e (e) fração areia média do horizonte B. Legenda: bt – biotita, cf – concreção ferruginosa, grt – granada, kfs – k-feldspato, mt – magnetita, ndl – nódulo, pl – plagioclásio, e qtz – quartzo.

No horizonte B também se observa o quartzo como o principal mineral na fração areia (83%). Em quantidades menores, identificou-se nódulos e concreções ferruginosas (10%), magnetita (3%), biotita (2%) e k-feldspato (1%). Assim como no horizonte A, praticamente todo o plagioclásio encontra-se alterado (1%). O teor de quartzo diminui da fração areia grossa para a fração areia fina, de 97% para 65%, enquanto o teor de nódulos e concreções aumenta da fração grossa para a fração fina, de 1% (Figura 7e) para 20% (Figura 7c) e de 1 para 3% para a biotita.

Ambos os horizontes A e B apresentam grãos de quartzo com faces angulosas. Isso pode contribuir para maiores valores do ângulo de atrito e resistência ao cisalhamento do solo, pois diversos trabalhos apontam que a angularidade dos grãos do solo pode influenciar 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; DOODS; SANTAMARINA, 2006; CHERIF TAIBA, 2018; CHERIF TAIBA, 2019; NAFISI et al., 2018)

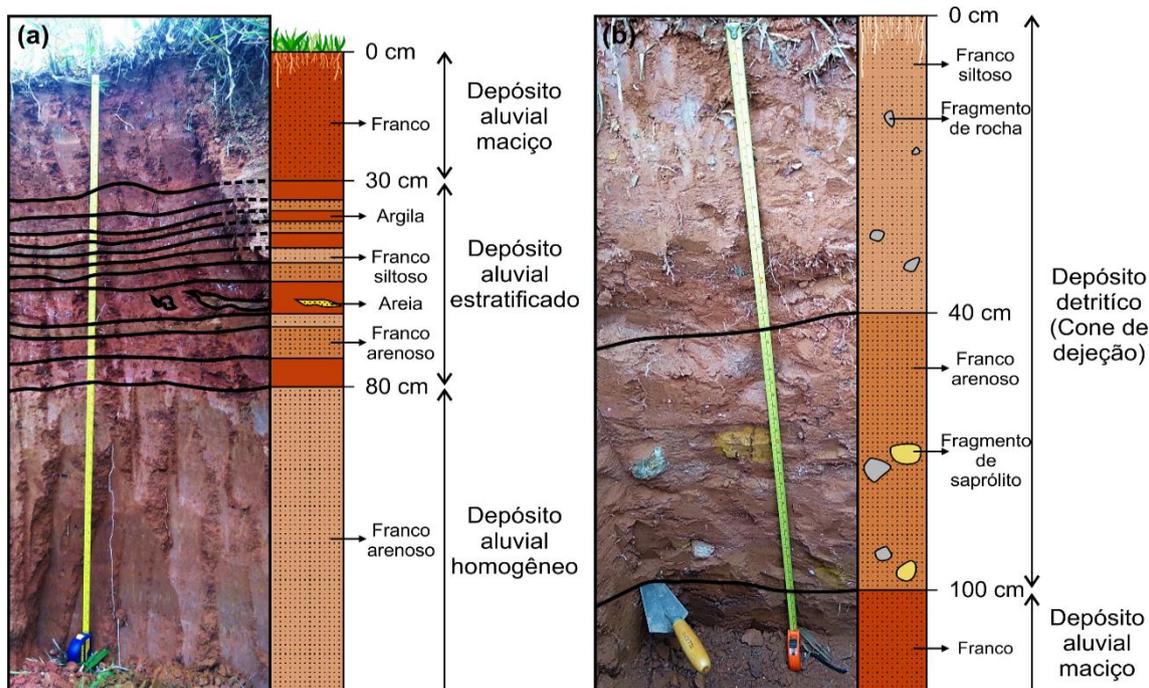
Em relação a fração fina, foi constatada a presença de caulinita e illita (Figura 8). De acordo com Rebertus, Weed e Buol (1986) e Banfield (1990), o processo de intemperismo químico dos feldspatos e da biotita pode resultar na formação de caulinita e illita.



**Figura 8.** Difratoograma de Raios-X da fração argila do horizonte A. Legenda: kao – caulinita e ill – illita.

A ausência de gibbsita no solo sugere que o intemperismo químico não foi tão intenso como na encosta estudada por Pacheco et al. (2018) no município de Alegre, onde ocorrem solos desenvolvidos sobre paragneisses do Complexo Paraíba do Sul, pois a caulinita geralmente é transformada em gibbsita (KÄMPF; MARQUES; CURTI, 2012).

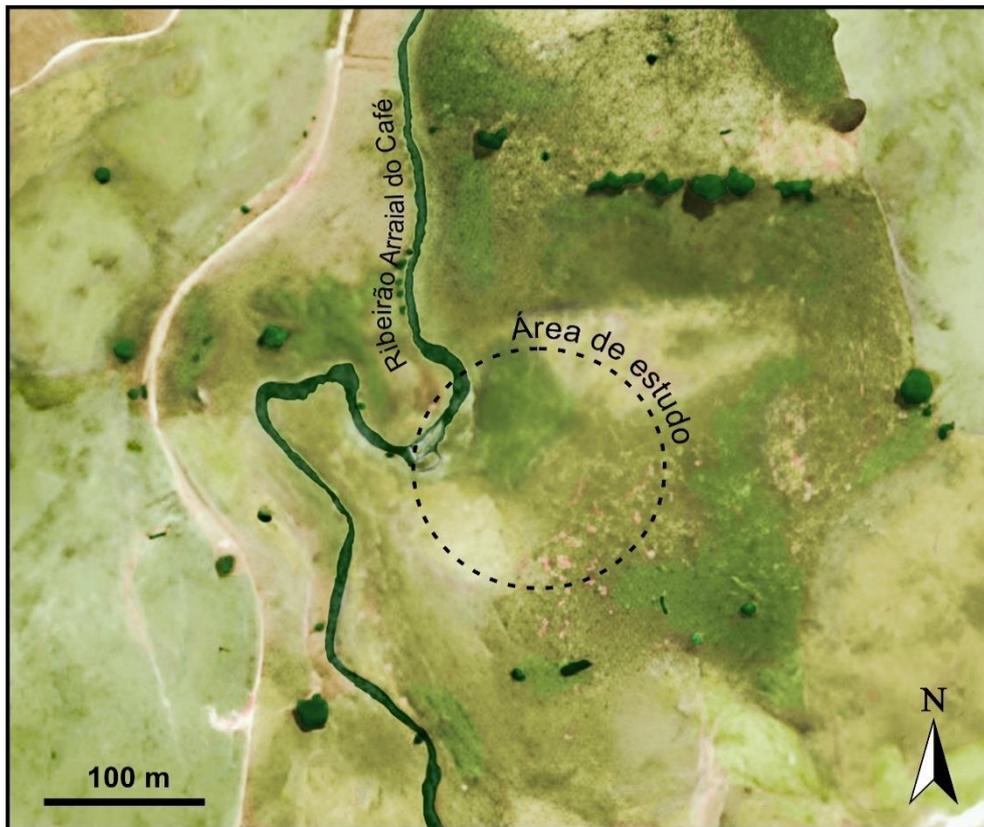
No sopé da encosta encontra-se depósitos de planície aluvial e de cone de dejeção (Figura 9). O depósito aluvionar apresenta estratificações plano-paralelas, com intercalação de pequenas camadas de composição argilosa, silto-arenosa, areno-siltosa e lentes de areia (Figura 9a). Esses sedimentos estão relacionados aos eventos de inundação do Ribeirão Arraial do Café. O cone de dejeção ocorre no sopé da voçoroca 1, depositado em discordância sobre o depósito aluvionar. Este depósito possui forma de leque e espessura de até 1 m, afinando progressivamente até desaparecer (Figura 9b). Apresenta estrutura maciça e grande quantidade de cristais de quartzo e feldspato centimétricos, além de fragmentos de rocha e saprólito, com até 20 cm. O depósito é decorrente do entalhamento da voçoroca 1.



**Figura 9.** Coluna estratigráfica dos depósitos sedimentares: (a) perfil do depósito aluvionar as margens do Ribeirão Arraial do Café; e (b) perfil do depósito do cone de dejeção.

#### 4.2. Origem e evolução das voçorocas

A imagem aérea mais antiga mostra que desde 1970, a encosta já era utilizada como pastagem, com áreas de solo exposto na porção sudoeste da área de estudos (Figura 10). No ano de 2002 ainda não haviam sinais de processos erosivos na encosta onde se formaram as voçorocas estudadas.

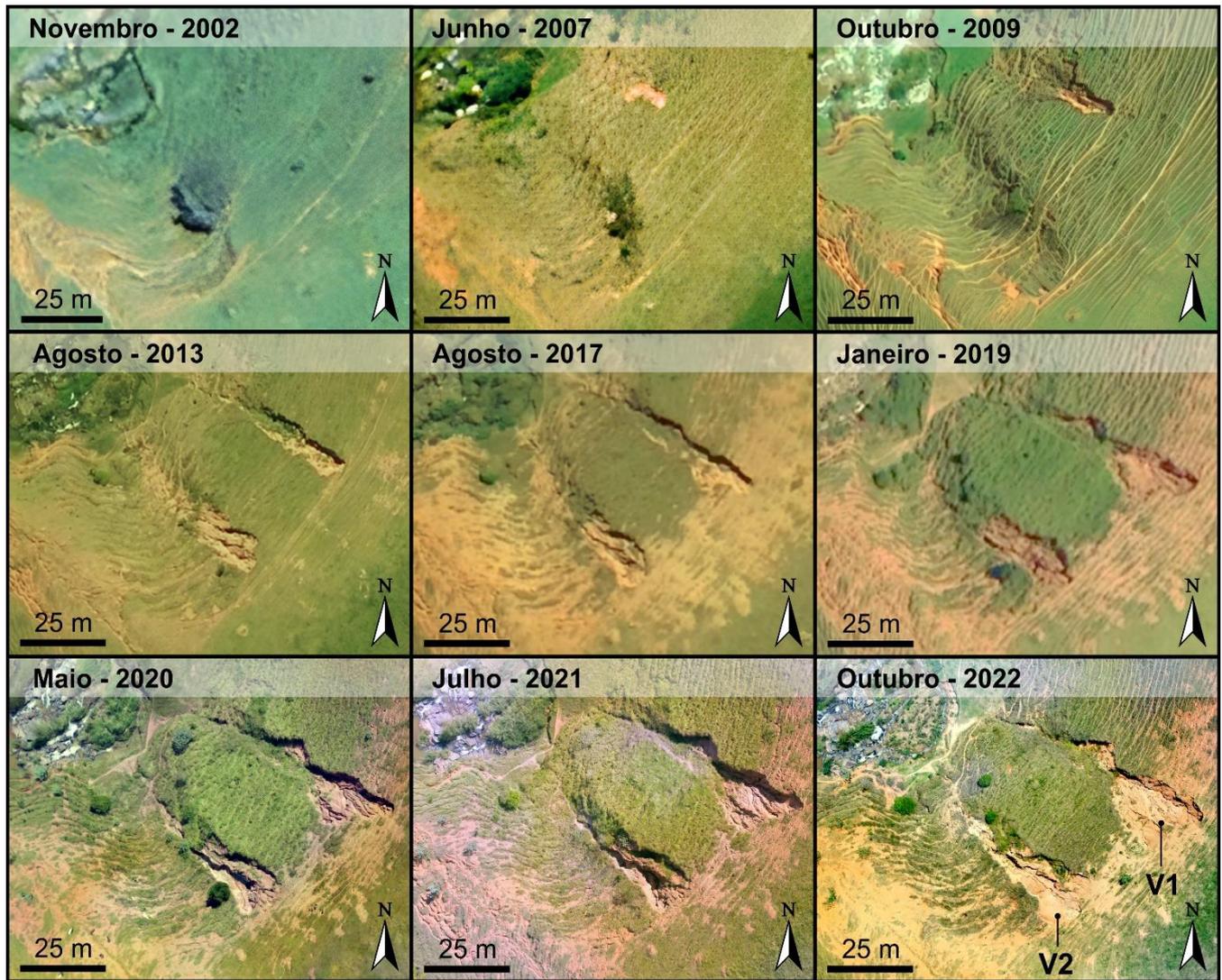


**Figura 10.** Fotografia aérea do ano de 1970 (colorida artificialmente) do Instituto Brasileiro do Café (IBC), evidenciando a presença de pastagem na área de estudos muito antes do surgimento das voçorocas. As áreas mais esbranquiçadas indicam provável solo exposto.

As imagens de satélite e fotografias aéreas indicam que as voçorocas se formaram em tempos diferentes. A Figura 11 mostra que a voçoroca 1 surgiu aproximadamente no ano de 2007, enquanto a voçoroca 2 surgiu entre os anos de 2009 e 2013. Hartwig e Alves (2022) constataram que quase todas as voçorocas presentes no município de Alegre se formaram antes de 2009 e algumas delas se formaram antes de 1970 (MARCHIORO; SILVA; CORREA, 2016).

Os caminhos de gado, que aparecem com mais clareza nas imagens a partir de 2007 como estreitas faixas aproximadamente paralelas que acompanham a topografia da encosta (terracetes), evidenciam o pisoteio do gado durante décadas, o que contribuiu para a degradação do solo. De acordo com Oliveira (2018), a concentração do fluxo superficial e o pisoteio do gado pode levar a ruptura do terracete. Os terracetes facilitam a saturação local do solo superficial, que leva a uma perda da resistência, podendo desencadear pequenas instabilizações na encosta (ANDERSON; ROWNTREE; LE ROUX, 2021) e ensejar o processo erosivo. Neste processo, pode ocorrer a exposição dos horizontes de solo mais vulneráveis à erosão.

A análise das imagens da Figura 11 revela que a voçoroca 1 apresenta cerca de 10 m de comprimento e 4 m de largura no ano de 2007 e dobrou de comprimento até o ano de 2009, expandindo-se rapidamente à montante. Em 2013, a voçoroca 2 já aparece bem desenvolvida, ocupando o terço superior da encosta. Posteriormente, ambas as voçorocas continuaram se expandindo à montante. Contudo, após o ano de 2013, a voçoroca 1 exibe certa estabilidade, possibilitando a fixação temporária de vegetação na porção intermediária. Nos anos seguintes, as voçorocas se mantiveram ativas com expansão à montante e aprofundamento dos canais principais (visível pelo efeito de sombra).



**Figura 11.** Serie temporal de imagens orbitais e aéreas da área de estudos.

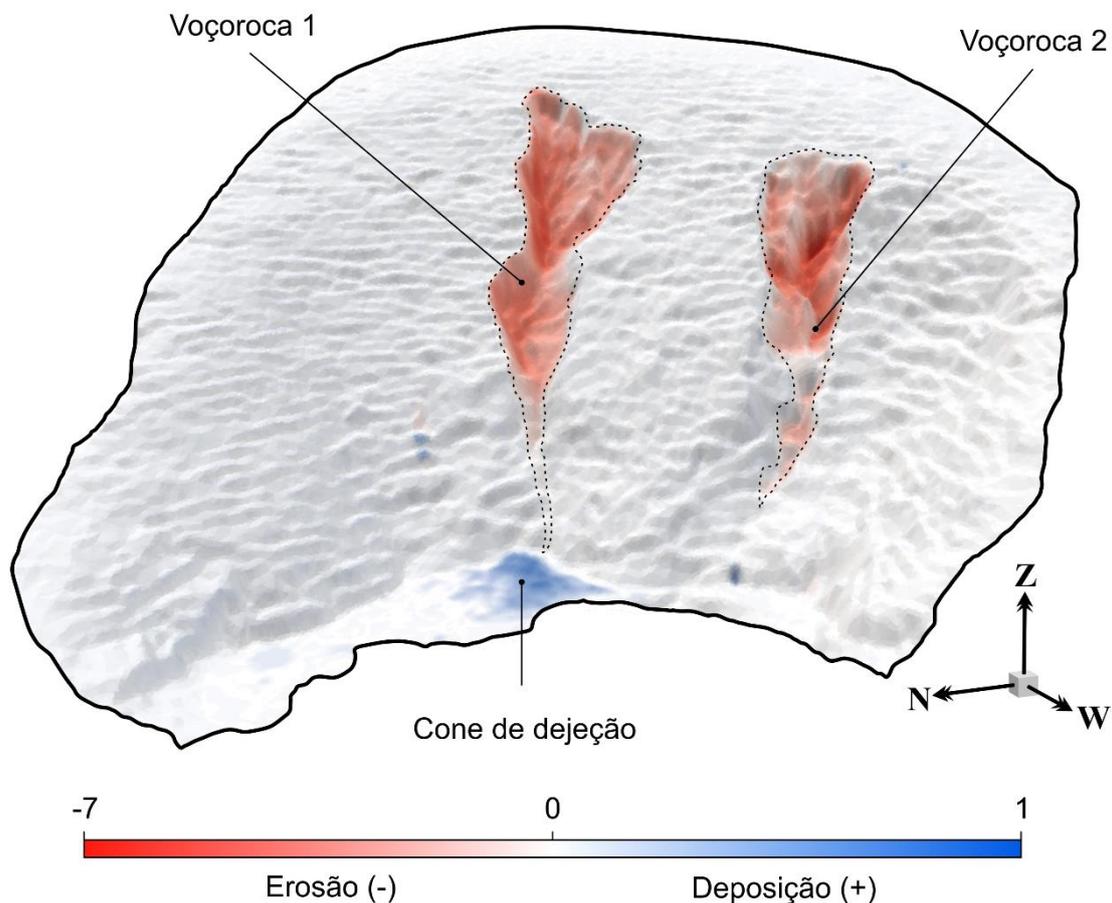
#### 4.3. Morfometria e morfologia das voçorocas

As duas voçorocas estudadas totalizam um volume de material removido de cerca de 2.779 m<sup>3</sup>, volume equivalente ao de uma piscina olímpica. A taxa de erosão estimada foi de aproximadamente 198 m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>. O volume de material removido foi maior na voçoroca 1, que também possui maior comprimento, perímetro e área em planta (Tabela 1). As maiores profundidades ocorrem na voçoroca 2, a qual possui declividade média ligeiramente superior a da voçoroca 1.

**Tabela 1.** Parâmetros morfométricos das voçorocas para o ano de 2021.

Parâmetros	Unidade	Voçoroca 1	Voçoroca 2
Área	m <sup>2</sup>	708	497
Volume	m <sup>3</sup>	1.700	1.079
Taxa média de erosão	m <sup>3</sup> .ano <sup>-1</sup>	121	77
Comprimento	m	77	54
Perímetro	m	187	134
Profundidade máxima	m	5,98	8,73
Declividade média	grau	47,3	49,3

A Figura 12 mostra a diferença de elevação causada pelo processo de erosão. As incisões mais profundas ocorrem no terço médio da encosta, seguindo a linha do talvegue das voçorocas. No sopé da encosta, próximo a voçoroca 1, observa-se a deposição de sedimentos provenientes da erosão. Os sedimentos da voçoroca 2 são, em sua maioria, transportados diretamente para o ribeirão Arraial do Café, não sendo possível a formação de um cone de dejeção, pois a planície aluvial é mais estreita e inclinada.

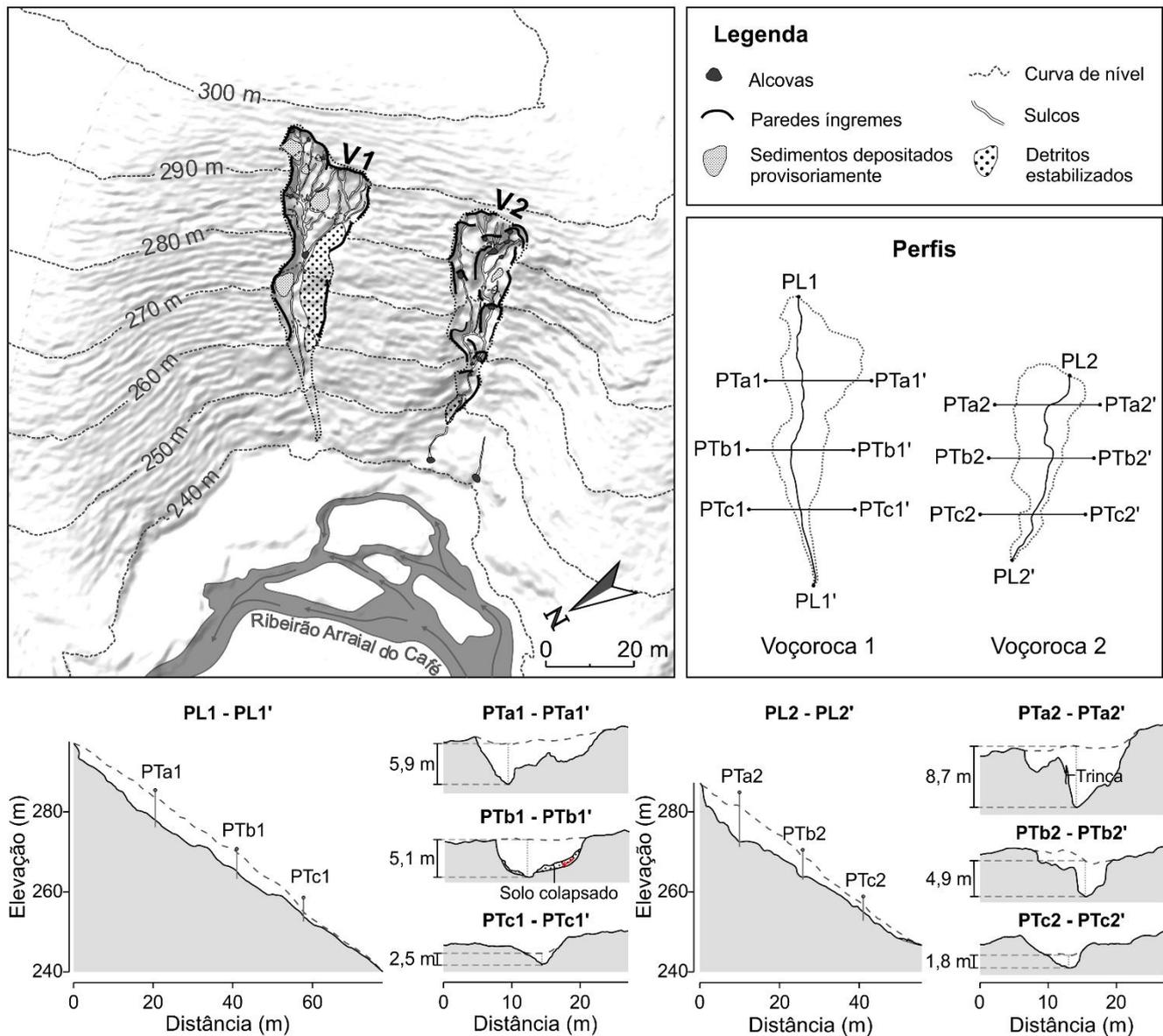


**Figura 12.** Mapa da diferença de elevação (m) entre os MDTs pré-voçoroca e atual.

Morfologicamente as voçorocas possuem forma bulbosa, com a cabeceira se dividindo em dois segmentos principais de drenagem e afinando para a jusante (Figura 13). Esse tipo de voçoroca foi descrito como “spoon gullies” (LI et al., 2022), devido a sua forma semelhante ao de uma colher.

A seção longitudinal ao longo do talvegue das voçorocas apresenta expressivas variações, principalmente na voçoroca 2. Essas variações estão associadas a presença de escarpas e alcovas. Transversalmente, as voçorocas apresentam variação significativa desde a cabeceira até a base, com perfil topográfico em forma de “W” na porção superior, em forma de “U” na porção intermediária e em forma de “V” na porção inferior (Figura 13).

De acordo com Way (1978) e Ghosh et al. (2022) a seção transversal em forma de “V” se desenvolve em locais onde o solo subsuperficial é mais resistente à erosão que o solo sobrejacente. Ireland, Sharpe e Eagle (1939) propõe que a forma da seção transversal pode estar relacionada ao estágio de desenvolvimento da voçoroca. Hartwig e Ribeiro (2021) sugerem que a seção transversal em forma de “W” poderia indicar um estágio intermediário entre as formas em “V” e “U”. No entanto, os dados mostram que as diferentes formas podem ser encontradas em diferentes porções de uma mesma voçoroca.



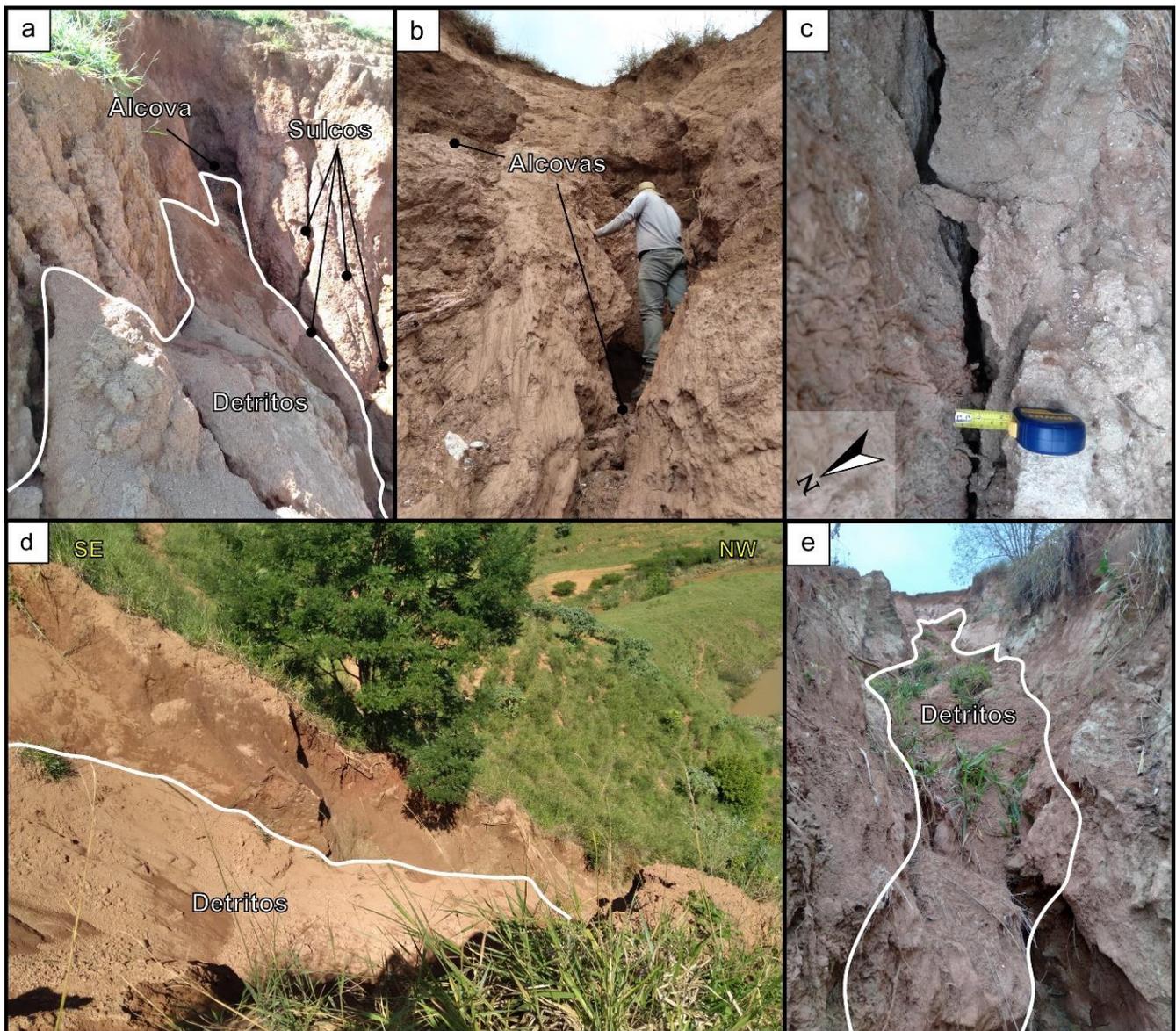
**Figura 13.** Aspectos morfológicos e feições associadas às voçorocas estudadas. As linhas tracejadas nos perfis indicam a paleotopografia. Legenda: V1 - voçoroca 1, V2 - voçoroca 2, PL – perfil longitudinal, PT – perfil transversal.

#### 4.4. Feições e processos erosivos

Nenhuma das voçorocas estudadas exibiu indícios de erosão tubular (*piping*). Marchioro, Silva e Correa (2016) fizeram a mesma constatação em uma voçoroca localizada a cerca de 5 km da área de estudos. A ausência de erosão subsuperficial parece ser comum nas voçorocas da região, pois o lençol freático tende a ser profundo nas encostas da região.

As principais feições erosivas encontradas no interior das voçorocas foram alcovas, sulcos e trincas subverticais (Figuras 13 e 14). Além disso, áreas de acumulação provisória de sedimentos são encontradas nas porções menos declivosas das voçorocas (patamares internos), como mostrado nas Figuras 13 e 14a.

Na voçoroca 1, constatou-se a existência de detritos estabilizados. De acordo com Kirkby e Bracken (2009), os detritos provenientes da voçoroca podem se depositar em um ângulo de repouso estável, propício para o desenvolvimento de vegetação e estabilização da voçoroca. Entretanto, a voçoroca 1 permaneceu ativa no período. Portanto, os detritos são provenientes de colapsos das paredes laterais durante fases de expansão, analogamente ao que foi observado após as fortes chuvas que ocorreram em fevereiro do ano de 2022. Nesta ocasião, as paredes colapsaram e a calha das voçorocas foram preenchidas provisoriamente por detritos (Figura 14d, e).



**Figura 14.** Feições observadas nas voçorocas durante as inspeções de campo: (a) alcovas e sulcos na parede superior da voçoroca 1; (b) alcovas na parte mais íngreme da voçoroca 2; (c) trinca na parede lateral da voçoroca 2; (d) material produzido por movimentos de massa preenchendo a calha da voçoroca 2; e (e) material produzido por movimentos de massa preenchendo a calha da voçoroca 2.

As alcovas ocorrem na parte inferior das paredes superiores (Figura 14a, b), contribuindo para o aprofundamento da voçoroca, desestabilização das paredes e, conseqüentemente, movimentos de massa gravitacionais (BURKARD; KOSTASCHUK, 1995; CHEN et al., 2013; ZHANG et al., 2019; GAO et al., 2021). Os movimentos de massa foram identificados como o principal processo de expansão da cabeceira das voçorocas estudadas durante o período monitorado (2021 a 2022). A importância desse processo para a expansão de voçorocas foi reportada em vários estudos (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).

Xia et al. (2019) constataram que rachaduras verticais presentes em solo residual de granito induzem o colapso do solo. Neste sentido, a presença de rachaduras (Figura 14c) contribuíram para o colapso das paredes das voçorocas estudadas.

## 5. Considerações finais

No presente estudo, investigou-se diversas características de duas voçorocas localizadas nas proximidades da rodovia ES-181, que liga a cidade de Alegre ao distrito do Café, Estado do Espírito Santo, sudeste do Brasil.

As análises mineralógicas mostraram que a fração areia dos horizontes de solo A e B é constituída principalmente por quartzo, um mineral resistente ao intemperismo, com faces angulosas, indicando pouco ou nenhum transporte. A fração argila do horizonte superficial é constituída de caulinita, um argilomineral encontrado em solos derivados da decomposição química de rochas granitoides e gnaisses.

A encosta estudada apresenta declividade média de 45 graus e desnível de 60 m. Os principais solos identificados foram o Latossolo Vermelho-Amarelo e o Neossolo Regolítico. Os tipos de solo encontrados e as condições topográficas da encosta são comuns na região sul do Estado do Espírito Santo.

O local vem sendo explorado a cerca de meio século como pasto para rebanhos bovinos. Os dados mostraram que as voçorocas se instalaram após várias décadas de ocupação. Contudo, uma vez instaladas, evoluíram rapidamente, apresentando taxa média de erosão da ordem de 198 m<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup> entre os anos de 2007 a 2021.

O estudo também mostrou que as formas das voçorocas quando vistas em perfil transversal, não podem ser utilizadas diretamente para especular sobre seu estágio evolutivo, pois a mesma voçoroca pode exibir diferentes formas em perfil.

Acredita-se que as voçorocas estudadas tenham se originado em razão do rompimento de terracetes. Identificou-se que a presença de trincas de tração e os movimentos de massa gravitacional contribuíram significativamente para o processo de erosão do solo.

A ação humana apresentou-se como um fator determinante no processo de erosão hídrica da encosta estudada. Isso mostra a importância e a necessidade de se adotarem práticas de conservação e manejo do solo para minimizar os danos ambientais.

**Contribuições dos Autores:** J.P.I.A.: Concepção, Análise formal, Investigação, Curadoria dos dados, Redação – versão inicial, Visualização. M.E.H.: Concepção, Metodologia, Análise formal, Investigação, Recursos, Redação – versão inicial, Redação – revisão e edição, Supervisão, Administração do projeto. J.A.A.E.: Análise formal, Investigação, Recursos. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Financiamento:** Esta pesquisa é parte de uma dissertação de mestrado financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através de uma bolsa de mestrado, Nº 161484/2021-2.

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

## Referências

1. AB'SÁBER, A. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 7ª Ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2012.
2. ANDERSON, R.; ROWNTREE, K.; LE ROUX, J. An interrogation of research on the influence of rainfall on gully erosion. *Catena*, v. 206, n. 105482, 2021. DOI: 10.1016/J.CATENA.2021.105482
3. ANDRADE, F. M. **Influências remotas na previsibilidade, estrutura e ciclo de vida da Zona de Convergência do Atlântico Sul**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. 149p.
4. BANFIELD, J. F. Analytical Transmission Electron Microscope Studies of Plagioclase, Muscovite, and K-Feldspar Weathering. *Clays and Clay Minerals*, v. 38, n. 1, p. 77-89, 1990. DOI: 10.1346/CCMN.1990.0380111
5. BENNETT, S.; WELLS, R. Gully erosion processes, disciplinary fragmentation, and technological innovation. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 44, n. 1, p. 46-53, 2018. DOI: 10.1002/esp.4522
6. BURKARD, M. B.; KOSTASCHUK, R. A. Initiation and evolution of gullies along the shoreline of Lake Huron. *Geomorphology*, v. 14, p. 211-219, 1995. DOI: 10.1016/0169-555X(95)00059-E
7. 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**. New York: Nova Science Publishers, 2013. p. 109-141.
8. CARRIVICK, J. L.; SMITH, M. W.; QUINCEY, D. J. **Structure from motion in the geoscience**. Chichester: Wiley-Blackwell, 2016.
9. CASALÍ, J.; GIMÉNEZ, R.; BENNETT, S. Gully erosion processes: monitoring. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 34, n. 14, p. 1839-1840, 2009. DOI: 10.1002/esp.1867

10. 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. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.07.009
11. 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**, v. 109, p. 177-185, 2013. DOI: 10.1016/j.catena.2013.04.002
12. 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. DOI: 10.1080/17486025.2019.1648881
13. 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. DOI: 10.1080/19386362.2017.1302643
14. 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**, v. 132, n. 5, p. 591-602, 2006. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591)
15. 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](https://schenautomacao.com.br/cbge2022/envio/files/trabalho1_9.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2023.
16. 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.
17. DAEE/IPT. **Controle de erosão: bases conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e territorial; orientações para o controle de boçorocas urbanas**. 2ª Ed. São Paulo: DAEE/IPT, 1990.
18. 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**, 182, n. 104146, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104146
19. 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. DOI: 10.33552/GJES.2019.02.000541.
20. FERREIRA, V. M.; FERREIRA, R. R. M. (Coord.). **Apostila Técnica de Estabilização de Voçorocas**. Nazareno: Centro Regional Integrado de Desenvolvimento Sustentável, 2009.
21. FETTES, D. J.; DESMONS, J. (Ed.). Rochas metamórficas: classificação e glossário. REIS NETO, J. M. (Trad.). São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 313 p.
22. 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, n. 112683, 2021. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112683
23. GARCÍA-RUIZ, J. M. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. **Catena**, v. 81, p. 1-11, 2010. DOI: 10.1016/j.catena.2010.01.001
24. GARCÍA-RUIZ, J. M.; BEGUERÍA, S.; LANA-RENAULT, N.; NADAL-ROMERO, E.; CERD`A, A. Ongoing and emerging questions in water erosion studies. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 1, p. 5-21, 2017. DOI: 10.1002/ldr.2641
25. GHOSH, S.; GUCHHAIT, S. K.; ILLAHLI, R. A.; BERA, S.; ROY, S. Geomorphic character and dynamics of gully morphology, erosion and management in laterite Terrain: few observations from Dwarka – Brahmani Interfluve, Eastern India. **Geology, Ecology and Landscape**, v. 6, n. 3, p. 188-216, 2022. DOI: 10.1080/24749508.2020.1812148
26. 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**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 17-55.
27. 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**, v. 22, n. 2, p. 29-42, 2022. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v22-194316
28. 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. DOI: 10.1007/s12665-021-09831-z
29. 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. DOI: 10.1186/s40677-019-0138-4

30. 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: 10 out. 2023.
31. HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945. DOI: 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2
32. 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.
33. 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.
34. KIRKBY, M. J.; BRACKEN, L. J. Gully processes and gully dynamics. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, p. 1841-1851, 2009. DOI:10.1002/esp.1866
35. 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.
36. LI, C.; YANG, X.; LIU, H.; ZHU, H.; WEI, H.; NA, J.; CUI, X. Spatial distribution characteristics of discontinuous hillslope gullies on the Loess Plateau of China: A special focus on spoon gullies. **Catena**, v. 215, n. 106327, 2022. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106327.
37. 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. DOI: 10.1016/j.still.2019.03.016.
38. 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](https://www.researchgate.net/publication/47444401_Variabilidade_temporal_da_precipitacao_mensal_em_Alegre_ES)>. Acesso em: 10 out. 2023.
39. 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**, v. 17, n. 1, p. 191-204, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i1.712
40. MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behaviors**. 3ª Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
41. 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.
42. 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. DOI: 10.5539/jds.v4n5p196
43. 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.
44. OLIVEIRA, E. C. V. **Gênese e condicionantes na formação de terracetes do sudeste de Minas Gerais**. Monografia (Graduação em Geologia), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. 79f.
45. OLIVEIRA, M. A. T. de. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Ed.). **Erosão e Conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p 57-99.
46. OLIVEIRA, V.; COSTA, A. M. R.; AZEVEDO, W. P.; CAMARGO, M. N.; LARACH, J. O. I. Levantamento exploratório de solos. In: Ministério das Minas e Energia, Secretaria-Geral, Projeto Radambrasil. **Folhas SF23/24 Rio de Janeiro/Vitória, geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Projeto Radambrasil, Rio de Janeiro, 1983. p. 385-552.
47. PACHECO, A. A. **Pedogênese e distribuição espacial dos solos da bacia hidrográfica do Rio Alegre – ES**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011. 104f.
48. 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**, v. 42, 2018. DOI: 10.1590/18069657rbc20170291

49. 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.
50. PEREIRA, J. S.; RODRIGUES, S. C. Estudos sobre Voçorocas: uma avaliação da produção científica brasileira (2009/2019). **Sociedade e Natureza**, v. 34, 2022. DOI: 10.14393/SN-v34-2022-65923
51. 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)
52. PRADO, H. **A pedologia simplificada**. 2ª Ed. Piracicaba: POTAFOS, 1995.
53. 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. DOI: 10.2136/sssaj1986.03615995005000030049x
54. RODRIGUES, S. C.; CONFESSOR, J. G.; PEREIRA, J. S. Técnicas de manejo voltadas à recuperação de áreas degradadas por erosão: Análise de 15 anos de estudos na voçoroca da Fazenda Experimental do Campus Glória-UFU. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 00, e2317, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i00.2317
55. ROTTA, C. M. S.; ZUQUETTE, L. V. Processos erosivos. In: ZUQUETTE, L. V. (Org.). **Geotecnia Ambiental**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, v. 1, 2015. p. 113-152.
56. ROWE, P. W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles. **Proceedings of Royal Society A. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, v. 269, n. 1339, 1962.
57. SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. 5ª Ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>>. Acesso em: 10 out. 2023.
58. SOIL SURVEY DIVISION STAFF. Soil survey manual. Washington: U.S. Dept. of Agriculture Handbook, 1993.
59. 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**, v. 47, n. 1, p. 109-128, 2022. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.5291>
60. VALENTIN, C.; POESEN, J.; YONG, L. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, n. 2-3, p. 132-153, 2005. DOI: 10.1016/j.catena.2005.06.001
61. VANDEKERCKHOVE, L.; POESEN, J.; GOVERS, G. Medium-term gully headcut retreat rates in southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements. **Catena**, v. 50, n. 2-4, p. 329-352, 2003. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00132-7
62. 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.
63. 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.
64. WAHBA, G. **Spline models for observational data**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1990. DOI: 10.1137/1.9781611970128
65. 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. DOI: 10.1002/aqc.813
66. WAY, D. S. Terrain Analysis. New York: McGraw-Hill Inc, 1978.
67. 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**, v. 34, n. 14, p. 1867-1877, 2009. DOI: 10.1002/esp.1871
68. 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**, v. 101, p. 114-121, 2013. DOI: 10.1016/j.catena.2012.10.004.
69. 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. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021
70. XIA, J.; CAI, C.; WEI, Y.; WU, X. Granite residual soil properties in collapsing gullies of south China: spatial variations and effects on collapsing gully erosion, **Catena**, v. 174, p. 469-477, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2018.11.015.
71. 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. DOI: 10.1016/j.agee.2019.106580



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