

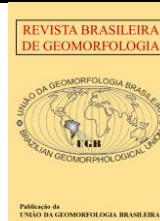


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 24, nº ESPECIAL (2023)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2323>



Artigo de Pesquisa

GPR como ferramenta para estudo do controle estrutural do substrato rochoso no desenvolvimento de voçorocas: Gouveia, Espinhaço Meridional, MG, Brasil

GPR as a tool for studying geological structural control of gully development: Gouveia, Espinhaço Meridional Range, MG, Brazil

Paulo Roberto Antunes Aranha¹, Cristina Helena Ribeiro Rocha Augustin², Marcos Antônio Timbó Elmiro³, Alexandre Uhlein⁴ e Henrique Chaves Joncew⁵

1. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Belo Horizonte, Brasil.
aranha1941@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7850-9590>
2. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Belo Horizonte, Brasil.
chaugustin@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3467-7776>
3. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Departamento de Cartografia, Belo Horizonte, Brasil.
timboelmiro@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7680-3131>
4. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Belo Horizonte, Brasil.
auhlein@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0768-608X>
5. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Doutorado em Geotectônica. São Paulo, Brasil.
henriquej.geologia@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1582-2798>

Recebido: 26/11/2022; Aceito: 07/12/2023; Publicado: 23/12/2023

Resumo: O voçorocamento constitui, hoje, um problema ambiental grave em vários países, incluindo no Brasil. Esse processo erosivo encontra-se associado à diversas causas, entre elas, o uso e manejo inadequado da terra e às características naturais das vertentes, como o substrato rochoso, que nem sempre são observáveis em levantamentos usuais dos fatores de susceptibilidade à erosão. Neste trabalho, busca-se identificar e analisar a influência do arcabouço geológico e de elementos do relevo com o uso do radar de penetração no solo (GPR) como uma contribuição às abordagens de identificação dos fatores associados ao desenvolvimento das voçorocas. Os resultados do estudo de uma voçoroca em área de domínio dos granitoides na Serra do Espinhaço Meridional, município de Gouveia, MG, Brasil, cujo avanço a montante apresenta uma deflexão da sua orientação original de W-L, para SW-NE, sugerem influência de elementos estruturais no direcionamento da evolução. Também atuam fatores geomorfológicos através da ação do modelado do relevo, cujos processos expõem as rochas subjacentes e acentuam o poder erosivo do escoamento superficial e infiltração da água de chuva, através do aumento da inclinação das encostas.

Palavras-chave: Estrutura regolito; fatores geológicos e geomorfológicos; feições erosivas; técnicas de análise subsuperfície.

Abstract: Today, gullies constitute a serious environmental problem in several countries, including Brazil. This erosion process is associated with several causes, including inadequate land use and management and the natural characteristics of the slopes,

such as the rocky substrate, which are not always observable in usual surveys of erosion susceptibility factors. In this work, we seek to identify and analyze the influence of the geological framework and relief elements, using ground penetrating radar (GPR), as a contribution to approaches to identifying factors associated with the development of gullies. The results of the study of a gully in an area dominated by granitoids in Serra do Espinhaço Meridional, municipality of Gouveia, MG, Brazil, whose advance upstream presents a deflection from its original orientation of W-L to SW-NE, suggest the influence of elements structural factors in directing evolution. Geomorphological factors also act through the action of relief modeling, whose processes expose the underlying rocks and accentuate the erosive power of surface runoff and infiltration of rainwater, through the increase in the slope of the slopes.

Keywords: Regolith structure; geological and geomorphological factors; erosive features; subsurface analysis techniques.

1. Introdução

O voçorocamento desencadeia uma série de eventos que, em última análise, tende a causar a perda de solo agricultável, estimada mundialmente em 100.000 km² (GUTIÉRREZ; SCHNABEL; CONTADOR, 2011; JAHANTIGH; LAL, 2001; MACEDO et al., 2019; PESSARAKLI, 2011; PIMENTEL, 2006). Por sua vez, a grande geração de sedimentos decorrente de processos erosivos, em especial os concentrados como o voçorocamento, encontra-se associada ao assoreamento de cursos de água, lagos e terras úmidas de um modo geral, à poluição da água de abastecimento, à desestruturação e ao empobrecimento de ecossistemas terrestres e aquáticos, o que, contribui, em última análise, para a redução do sequestro dos gases de efeito estufa pela vegetação (BEZERRA et al., 2020; CASTILHO; GÓMEZ, 2016; JAHANTIGH; PESSARAKLI, 2011; LAL, 2001; O'GEEN; MARTINELI; BACELLAR, 2007; PIMENTEL, 2000; POESEN et al., 2003; PORTO; WALLING; CAPRA, 2014; ROBERTSON et al., 2004). Causa, ainda, outros prejuízos socioeconômicos afetando diretamente infraestruturas urbanas, rurais, de serviços e várias atividades econômicas.

As voçorocas, formas geradas por essas feições erosivas, são canais escavados nas vertentes, produzidos, principalmente por escoamento superficial concentrado da água da chuva, que são grandes demais para serem reparados por operações convencionais de aterramento. Voçorocas apresentam paredes laterais íngremes, longas extensões longitudinais e erosão ativa a montante (BOCCO, 1991; BULL; KIRKBY, 1997; CROUCH, 1990; HUTCHINSON; PRITCHARD, 1976; IRELAND; SHARPE; EARGLE, 1939; KHALILI et al., 2013). Os efeitos do escoamento concentrado na geração de voçorocas podem ainda ser potencializados por processos de *piping* e de movimentos de massa, como deslizamentos e corridas de lama, como descritos por Augustin (1979; 1995), Augustin e Aranha (2006a, b), Pierson (1983) e Römkens (2009). Entre os elementos associados à ocorrência de *piping* estão aqueles ligados às características químicas e físicas das partículas dos regolitos/solos (AUGUSTIN, 1979; FIGUEIREDO; AUGUSTIN; FABRIS, 1999) e às variações litológicas e estruturais das rochas (BEAVIS, 2000; CROUCH, 1983; DUNNE, 1990; REZENDE et al., 2001). Pode-se assumir, portanto, que essas formas erosivas, como apontado por Martins et al. (2022), são controladas por uma ampla gama de fatores, o que as torna mais complexas, dificultando a identificação das causas mais diretamente relacionadas ao seu início e desenvolvimento, mesmo que, reconhecidamente, estas se encontrem atreladas aos processos hídricos (AMAH; SEU; KANU, 2008; BACELLAR; COELHO NETTO; DUNNE, 1990; LACERDA, 2005; TEBEBU et al., 2010).

Embora os fatores geológicos tendam a ser identificados, na literatura, como um dos que favorecem a ação erosiva da água concentrada de chuva, esta relação é, em geral, estabelecida basicamente quanto à erodibilidade do solo (AIGBADON; OCHELI; AKUDO, 2021; AMAGU; EZE; JUN-ICHI, 2018; OPARAKU; IWAR, 2018; RĂDOANE; RĂDOANE, 2017), ou às suas características geotécnicas. Entre elas, destacam-se às atreladas ao comportamento físico das propriedades do regolito/solos originados de determinada litologia (AMAGU; EZE; UN-ICHI, 2018; AMAH; SEU; KANU, 2008; CHIKWELU; OGBUAGU, 2014; COSTA; PARIZZI; AUGUSTIN, 1999; FERNANDES; COELHO NETTO, 1989; KHALILI et al., 2013; VALENTIN; POESEN, 2005). Também no Brasil, a associação mais comum é estabelecida com a litologia, como mostram os trabalhos de Bouramtane et al. (2022), no Mato Grosso, e o de Fernandez (2011), no Rio Grande do Sul, embora autores como Hasui et al. (1995), Cambra et al. (2005) e Rezende (2021), entre outros, destaquem aspectos mais amplos da influência do substrato rochoso. Ele tem, por exemplo, efeito reconhecido sobre a circulação hídrica subsuperficial, como apontado por Barcellar (2000), Cambra et al. (2019), Coelho Netto (1997), Dewandel e Wyns (2021), Elmahdy e Mohamed (2022), Hasui et al. (1995), Lachassagne, Kulatilake e Panda (2000), Silva et al. (2003), Tebebu et al. (2010) e Williams (2003). Nessa perspectiva, é possível destacar o trabalho de Beavis (2000), que explora a relação entre a estrutura geológica

(sistema de fraturas, acamamento, mergulho, falhas) e a macrofábrica do solo com a orientação do desenvolvimento da voçoroca.

Uma das causas da atenção ainda restrita sobre a influência litoestrutural na análise da evolução das voçorocas deve-se ao fato de que este tipo de dados é de difícil acesso, sendo obtido, quase sempre, a partir da abertura de trincheiras que, em alguns casos, podem atingir vários metros de profundidade. O Radar de Penetração do Solo (GPR), uma ferramenta geofísica, veio facilitar a coleta de dados e informações estruturais e também litológicas, tendo em vista sua eficiência na capacidade de exibir padrões de estruturas subsuperficiais, sendo, cada vez mais, utilizado para este fim. Entre os trabalhos sobre o uso do GPR destacam-se os de Bernatek-Jakiel e Kondracka (2016), mostrando a utilidade do GPR na localização de *pipings* associados ao aparecimento de voçorocas e o de Gomez et al. (2023), identificando a estrutura interna do depósito em forma de cone logo abaixo de uma voçoroca. Não menos importantes são as contribuições de Aranha et al. (2004) e Augustin e Aranha (2006a) em pesquisas de fatores geológicos envolvidos na evolução de voçorocas, conduzidos na mesma região do presente estudo.

O método do GPR baseia-se na emissão de ondas eletromagnéticas e no registro de suas reflexões em descontinuidades da subsuperfície em perfis denominados radargramas que permitem interpretações sobre a constituição física e estrutural do substrato com base nos padrões das reflexões observados. As reflexões que formam padrões hiperbólicos em um radargrama, correspondem à presença de dutos, pedregulhos ou diques verticais estreitos, enquanto reflexões lineares indicam superfícies e estruturas planares, como contatos geológicos, fraturas e cicatrizes de processos pretéritos de escorregamentos (ARANHA; AUGUSTIN; SOBREIRA, 2002; DAVIS; ANNAN, 1989; EVERETT, 2013). O GPR possui um amplo espectro de aplicação compreendendo arqueologia (VAUGHAN, 1986), contaminação ambiental (MARCAK; GOŁĘBIEWSKI, 2008), investigações forenses (KOPPENJAN et al., 2004), geotecnia (BENSON, 1995), águas subterrâneas (HARARI, 1996), prospecção mineral (FRANCKE, 2012), estratigrafia (HAGER; CARNEVALE, 2006) e pedologia (CHAPLOT et al., 2004; DOOLITTLE, 2011).

O presente estudo busca identificar a influência dos elementos estruturais do substrato rochoso no desenvolvimento de uma de duas voçorocas em vertente no município de Gouveia, na Serra do Espinhaço, Minas Gerais, com o auxílio do GPR. Ela apresenta uma evolução com mudança de direção a montante, sugerindo possível controle de estruturas das rochas. Os perfis de GPR foram executados para fornecer informações e insights sobre a influência dessas estruturas, bem como de aspectos geomorfológicos da vertente, na evolução dessa forma erosiva.

2. Área de Estudo

A voçoroca estudada encontra-se localizada em uma pequena bacia de drenagem (córrego Lava Pés), no limite oeste do perímetro urbano da sede do município de Gouveia, MG (Figura 1), onde essa forma erosiva é recorrente, tendo sido objeto de estudos anteriores (ARANHA et al., 2004; AUGUSTIN, 1995; AUGUSTIN; ARANHA, 2006a, 2006b; AUGUSTIN; ARANHA; COE, 2012).

No município afloram rochas da zona periclinal norte do Anticlinório de Gouveia, compostas por granitoides arqueanos (Complexo de Gouveia), metassedimentos do Supergrupo Paraúna, também arqueano, e as do Supergrupo Espinhaço, do paleo/mesoproterozóico (CRUZ; ALKMIN; LAGOEIRO, 2005). Os granitoides do Complexo de Gouveia são formados por leucogranitos peraluminosos, gnaisses, migmatitos e anfibolitos (COELHO, 2013; HOFFMAN, 1983; KNAUER; GROSSI-SAD, 1997), com idade aproximada de 2,8 Ga (ALMEIDA-ABREU, 1995; OLIVEIRA et al., 2019).



Figura 1. Mapa de localização da área de estudo, em Gouveia, Minas Gerais. Fonte: Imagens Google (2023).

Sobrepostas a elas, em contato direto por tectônica, encontram-se as rochas do Grupo Costa Sena, unidade de topo do Supergrupo Rio Paraúna, compostas por expressivas unidades paleo-mesoproterozoicas metassedimentares formadas por xistos, BIF's, metacherts, depósitos químicos e unidades vulcânicas meta-ultramáfica, meta-máficas e meta-ácidas (FOGAÇA; ALMEIDA-ABREU; SCHORSCHER, 1984; FOGAÇA; SCHÖLL, 1984), com idade aproximada de 2,05 Ga (OLIVEIRA et al., 2019). Rochas básicas, sob forma de diques e sills, cortam todas as unidades geológicas da Serra do Espinhaço Meridional (FOGAÇA; SCHÖLL, 1984). O afloramento dessas rochas na área de estudo (Figura 2) se dá na forma de uma janela estrutural (NOCE et al., 2007), resultante, segundo Augustin (1995), de um longo processo erosivo desta que é uma das estruturas regionais mais significativas da Cordilheira do Espinhaço, o Anticlinório de Gouveia (PFLUG, 1965), um grande sistema de dobras L-W e com planos axiais N-S, onde estão presentes a foliação NNE-SSW/N-S, fraturas, falhas e zonas de cisalhamento (CRUZ; ALKMIN; LAGOEIRO, 2005).

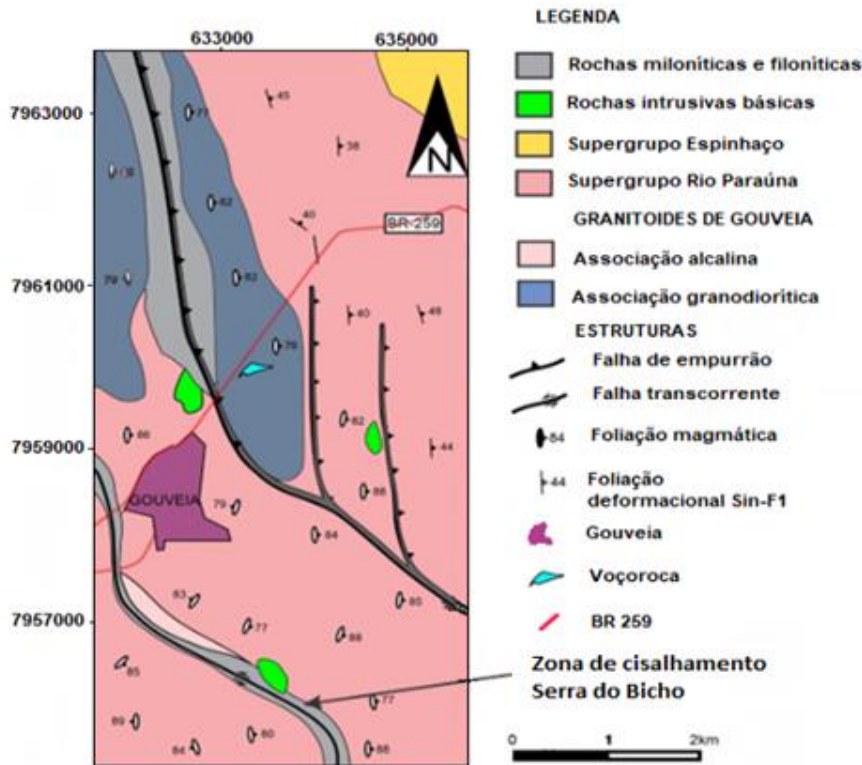


Figura 2. Mapa Geológico simplificado da área de ocorrência da voçoroca. Fonte: Modificado de Cruz et al. (2005).

A Depressão de Gouveia constitui um baixo topográfico praticamente modelado nos granitoides arqueanos, circundado por unidades geomorfológicas que podem ter até 300 m de elevação, criando escarpas nas quais afloram os quartzitos dobrados e fraturados do Supergrupo Espinhaço (AUGUSTIN, 1995) e, abaixo destes, rochas epiclásticas do Supergrupo Paraúna que, por vezes, formam patamares aplainados. Segundo a autora, o relevo da depressão erosiva é caracterizado por morros de vertentes longas com topos relativamente achatados. O principal sistema fluvial é formado pelo ribeirão Chiqueiro, afluente do rio Paraúna, que deságua no ribeirão Cipó, afluente do rio das Velhas e, este, do rio São Francisco. A combinação de relevo relativamente suave, clima tropical de altitude, com precipitação média anual de 1.400 mm e temperatura média anual acima de 20° C no domínio da Depressão, facilita o intemperismo químico e a formação de camadas espessas de regolito, incluindo latossolos bem desenvolvidos (DINIZ; OLIVEIRA; AUGUSTIN, 2005). As estações chuvosas concentradas no período do verão (outubro a março), por sua vez, favorecem o escoamento concentrado da enxurrada aumentando sua ação erosiva na superfície da vertente, causando sulcos profundos. A infiltração relativamente intensa da água de escoamento (PORTILHO, 2003) também favorece a ocorrência de movimentos de massa, levando à formação de voçorocas na área de domínio das rochas do Complexo Granítico de Gouveia (ARANHA, 2003; ARANHA; AUGUSTIN; SOBREIRA, 2002; AUGUSTIN, 1995; BARBOSA; AUGUSTIN, 2000; MARCHIORO, 2002).

A voçoroca (1) estudada (Figura 3), localizada na vertente à direita da BR-259, direção Belo Horizonte-Diamantina, acompanhada pela voçoroca (2), apresenta largura máxima de 63 m, profundidade máxima de 20 m em sua zona central, e inclinação média de 7° no trecho entre a cabeceira e o fundo de vale do córrego Lava Pés. Como pode ser observado nessa figura, as duas voçorocas, embora tenham direções iniciais de evolução levemente diferentes a partir da confluência com o córrego Lava Pés, apresentam recuo com direções semelhantes a montante (SW-NE), o que indica fatores comuns de influência.

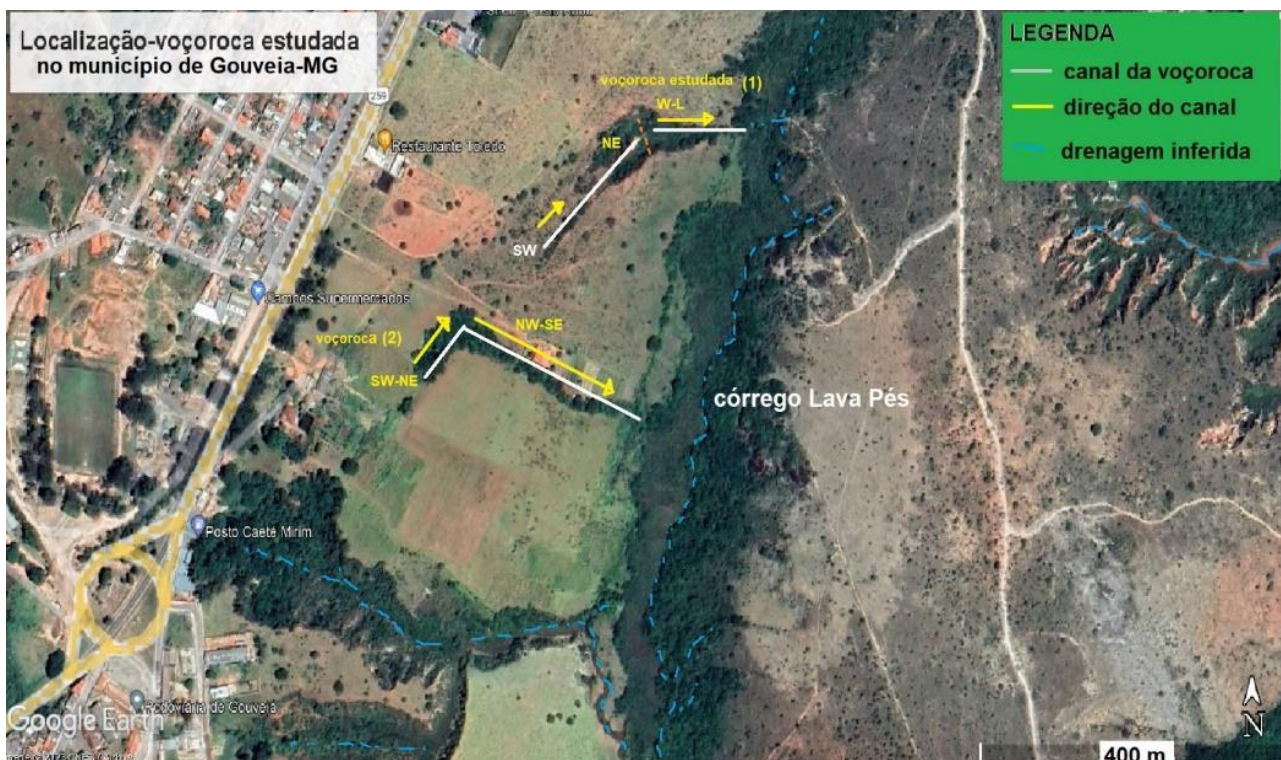


Figura 3. Vertente com duas voçorocas, incluindo a estudada (1), mostrando as direções da evolução delas. Fonte: Imagens Google Earth (2023).

O material das paredes da voçoroca (1) é formado por um regolito de cor vermelha (7.5 YR, Munsell Color Chart), sugestiva de origem meta-máfica da rocha (Figura 4a), com espessura média de 20 m ao longo da vertente. Ao longo da parede esquerda (assim denominada tomando como referência a direção do fluxo de água que escoam no canal da voçoroca em períodos de chuva), é possível distinguir três zonas distintas, observáveis, em detalhe, na Figura 4b. Ela mostra um esporão deixado pela incisão da drenagem, cuja porção superior já foi erodida, no qual pode se identificar: A) do topo até 80 cm de espessura (que na vertente ainda não erodida pode chegar a 1,60 m),

material vermelho, possivelmente decorrente de enriquecimento do ferro pela flutuação do nível freático, constituindo horizonte C de um Latossolo Vermelho; B) zona esbranquiçada, com cerca de 30 cm de espessura média, que pode ser atribuída à caulínização no saprólito, decorrente da perda de ferro e acumulação de alumínio, típica de áreas com águas de pH baixo e flutuação do nível freático, contrastando com a porção acima, de cor vermelha, do enriquecimento de ferro; C) rocha matriz, na qual ainda é possível identificar suas estruturas, apesar da intemperização química.

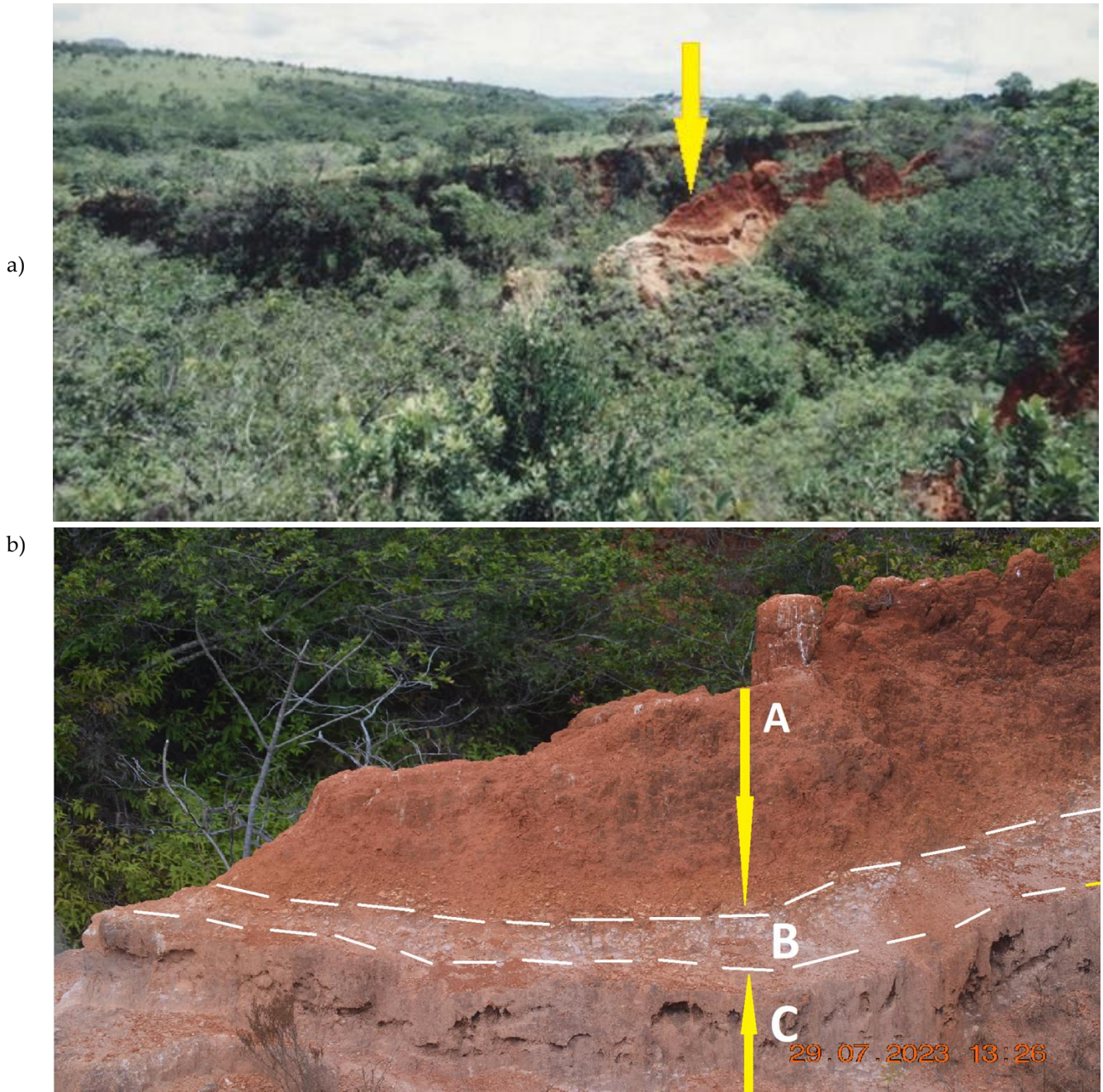


Figura 4. Fotos da voçoroca estudada: a) vista do lado esquerdo, no sentido NW, com seta amarela indicando a localização do perfil analisado na Figura 4b, correspondente a um esporão deixado pelo recuo das paredes da voçoroca pela incisão da drenagem nos períodos de chuva; b) perfil de detalhe do perfil acima (lado esquerdo), onde é possível identificar através de setas amarelas, mesmo após a erosão de cerca de 80 cm do topo, três zonas principais: (A) formada por material vermelho corresponde provavelmente a uma zona de enriquecimento de ferro pela flutuação do freático; B) zona de caulínização no saprólito, com perda de ferro e acumulação de alumínio, e, C) rocha matriz intemperizada, na qual é ainda é possível distinguir características de parte de suas estruturas originais.

O latossolo é rico em argila, enquanto a porção inferior é predominantemente silto-areno-argilosa (Figura 4b), mostrando estruturas residuais da rocha do complexo granítico, indicando tratar-se de material intemperizado *in situ* (elúvio), com coloração laranja leve para tons bege e rosa decorrente do enriquecimento de ferro (ARANHA, 2003).

Árvores predominantemente baixas, arbustos, samambaias e espécies herbáceas cobrem as paredes e o fundo da voçoroca, de onde, em sua porção média, projeta-se uma grande ilha remanescente da superfície original da vertente, antes da erosão separá-las (Figuras 4a, b).

3. Materiais e Métodos

A metodologia envolveu quatro abordagens diferentes: a) identificação de sítios geomorfológicos (SGs); b) amostragem do regolito, que também contém o solo pedológico, com o auxílio de um trado motorizado; c) aquisição de perfis de GPR (Figura 5b); d) análise físico-química das amostras de solo/regolito; e) a elaboração de um modelo simplificado das estruturas presentes na subsuperfície da área do entorno da voçoroca, nos itens 3.1 a 3.4. a seguir:

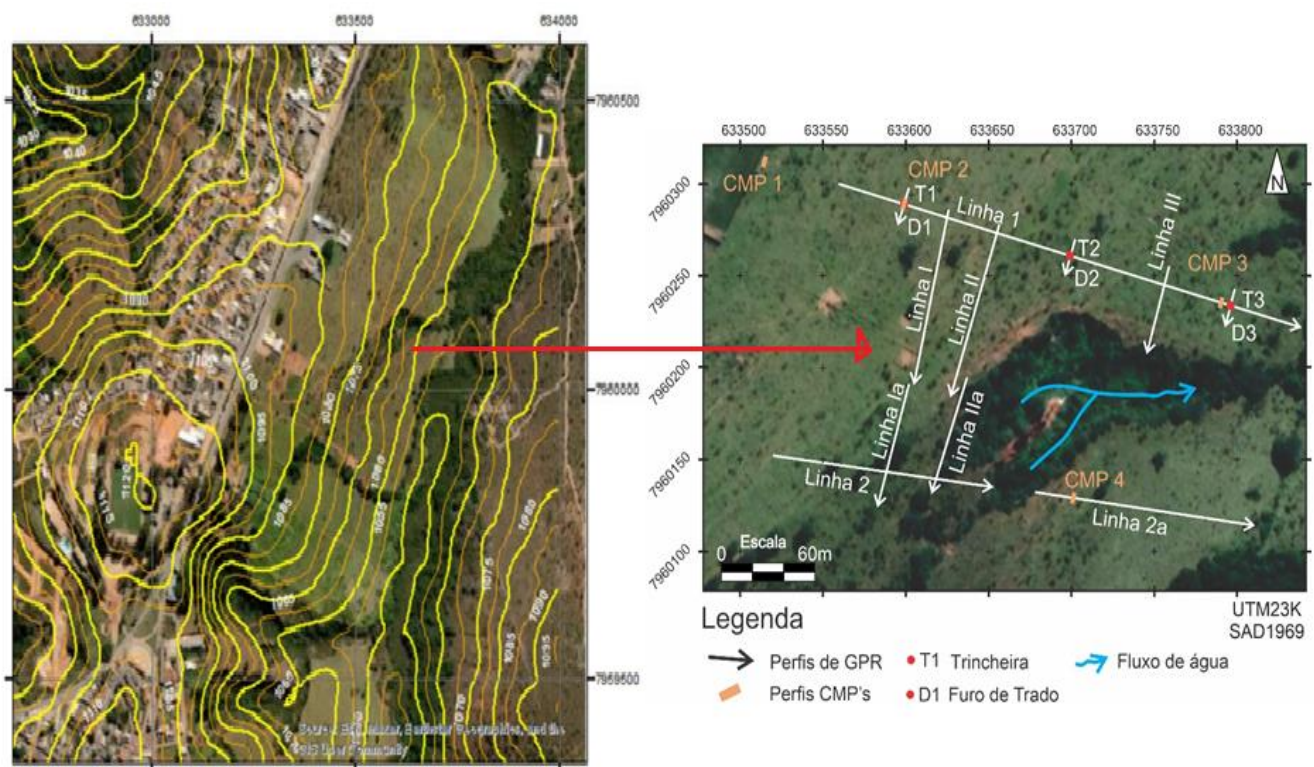


Figura 5. a) Mapa topográfico da vertente com a voçoroca estudada; b) imagem ampliada da vertente da voçoroca com os pontos de amostragem: posicionamento dos perfis de GPR, dos pontos da tradagem e das trincheiras.

3.1. Identificação do sítio geomorfológico (SG)

Foi realizado um transecto longitudinal do topo até a base da vertente em seu contato com as margens do córrego Lava Pés, para identificar unidades taxonômicas geomorfológicas, denominadas de Sítio Geomorfológico (SG), através de medidas de declividade em distâncias regulares de 15 m, do topo até a base da vertente, com o uso de um SUUNTO de leitura direta e três balizas de 2 m de altura, após o estabelecimento do azimute, seguindo metodologia descrita por Augustin (1979; 1995). Os SGs são identificados pela presença de rupturas de declive que marcam externamente alterações das características subsuperficiais, sejam estas decorrentes da variação dos fatores naturais ou não (AUGUSTIN, 1995; BRANTLEY; ELMAHDY; MOHAMED, 2013; GERRARDD, 1992; LEBEDEVA, 2020; MARTINS et al., 2013; YOUNG, 1992), o que pode orientar e auxiliar na interpretação das imagens geradas pelo GPR. A porção da vertente localizada entre as rupturas, seria, segundo Wright (1973), homogênea o suficiente para ser considerada uma unidade taxonômica geomorfológica menor do que a vertente, inclusive para fins de tratamento estatístico (AUGUSTIN, 1979).

3.2. Caracterização de regolito

Em cada SG identificado ao longo da Linha de aquisição de perfis GPR1, foi aberta uma trincheira de 1,5 m x 1,5 m (T1, T2 e T3), sempre do lado esquerdo da voçoroca, (Figuras 3 e 5), onde foram descritas as características do regolito, incluindo o solo pedológico, e coletadas amostras até 2 m de profundidade, perfazendo um total de 18 amostras coletadas. Nos mesmos pontos, foram também realizados 3 furos de tradagem com coleta de amostras a cada 1 m de profundidade, totalizando 64 amostras. Tendo em vista a homogeneidade do material em alguns níveis, somente 21 amostras foram tratadas no Laboratório de Geomorfologia do Instituto de Geociências, da Universidade Federal de Minas Gerais. As análises granulométrica e química foram realizadas seguindo os procedimentos do Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017, citado por DONAGEMA et. al., 2017). Elas forneceram mais dados e informações sobre a variação subsuperficial do material ao longo da trincheira, servindo de referência para interpretação dos radargramas.

3.3. Radar de penetração no solo (GPR)

Os perfis de GPR foram obtidos ao longo da vertente em ambos os lados da voçoroca (Figura 5), com o GPR Ramac da MalaGeoscience, usando antenas com frequência central de 50 e 100 MHz. A resposta de uma estrutura da subsuperfície à passagem da onda EM depende de suas dimensões e do comprimento de onda da antena utilizada, isto é, da frequência central da onda emitida. Assim, as ondas emitidas pelas antenas com frequências centrais mais altas (100 MHz), por apresentarem menor comprimento de onda, propiciam maior resolução vertical, conseguindo definir topo e base de estruturas menores com espessuras superiores a 1 m. No entanto, as ondas EMs emitidas por essas mesmas antenas são mais facilmente dispersadas e atenuadas pelo regolito, resultando em menor capacidade de penetração. O oposto acontece quando antenas com frequência central mais baixa são utilizadas, uma vez que estas apresentam menos detalhes, menor resolução vertical, menos dispersão e atenuação, alcançando profundidades maiores.

Os detalhes do padrão de aquisição dos perfis com as antenas utilizadas no campo são mostrados na Tabela 1. Para cada conjunto de antenas, uma série de perfis CMPs, com 7 a 10 m de abertura para cada lado, foram obtidas para aumentar a precisão na determinação das velocidades das ondas EMs na subsuperfície. Sabendo-se o perfil de velocidade, é possível calcular a permissividade dielétrica. Neste trabalho, foi utilizado apenas o perfil de velocidade para caracterização de regiões da subsuperfície. Os resultados auxiliaram tanto na caracterização do regolito (seção 3.3), quanto na modelagem das estruturas presentes na subsuperfície do entorno da voçoroca (item 3.4).

Tabela 1. Características da aquisição dos perfis de GPR – Afastamento comum.

| Antena F.C. (MHz) | Dist. Fonte-Receptor (m) | Amost. Espacial (m) | Amostras por traço | Stack | Janela de Tempo (ns) |
|-------------------|--------------------------|---------------------|--------------------|-------|----------------------|
| 50 | 2,0 | 0,5 | 512 | 16 | 842 |
| 100 | 1,0 | 0,20 | 512 | 16 | 440 |

Para investigar o entorno da voçoroca, foram realizadas cinco linhas no campo (Figura 5) com antenas de 50 e 100 MHz. Alguns dos perfis tiveram que ser subdivididos em seções ("Linha X e Xa") devido às condições do terreno. A Linha 1, que foi utilizada como seção padrão, possui uma extensão de 285 m, estendendo-se ao longo de todos os SGs (do topo à base da vertente), cobrindo uma grande extensão do lado esquerdo da voçoroca, (tomando como base de referência a direção do fluxo da água no canal), paralela à inclinação da encosta (N75°W). A Linha 2 (265 m) foi posicionada em direção semelhante (N82°W), no lado direito da voçoroca, também ao longo da vertente. As demais linhas: Linha I (163 m), Linha II (161 m) e Linha III (48 m), são transversais à inclinação da vertente, cruzando a Linha 1 e terminando nas proximidades das paredes da voçoroca (Figura 5). Os perfis foram obtidos em posições paralelas entre si, para permitir a observação da continuidade lateral dos lineamentos e das estruturas observadas em cada um deles.

O *software* Gradix (Interpex) foi utilizado para realizar o processamento dos dados, no intuito de melhorar a qualidade e a visibilidade dos radargramas. Os dados foram submetidos aos seguintes procedimentos: *Declip*;

dewow; marcação do tempo zero; remoção do ruído de fundo (*remove background*), migração; filtragem gaussiana de 50 e 100 MHz; correção estática e conversão em profundidade. A migração e a conversão de profundidade foram executadas utilizando-se os perfis de velocidades de onda EM na subsuperfície da área obtidos pelos levantamentos de quatro CMPs (*common mid point*) com antenas de 50 e de 100 MHz (ex. Figura 6) realizados ao longo da vertente.

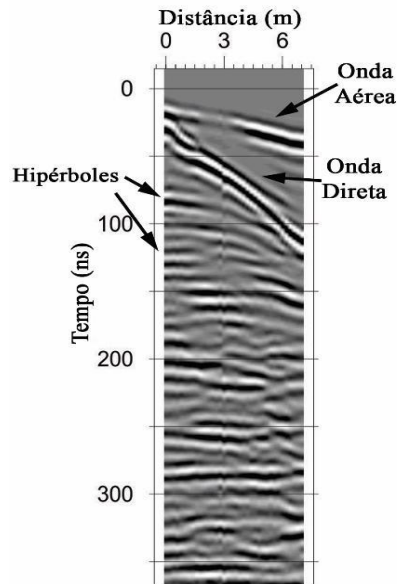


Figura 6. CMP 1 obtida nas proximidades da Linha 1 com antena de 100 MHz. Fonte: Aranha (2003).

3.4. Modelagem estrutural

Foi realizado um reconhecimento geológico preliminar no campo, com a descrição e medição de atitudes das estruturas geológicas. Essas informações forneceram apoio visual e auxiliaram nas análises sobre a influência do arcabouço estrutural no desenvolvimento da voçoroca.

4. Resultados

4.1. Sítio geomorfológico

Embora a inclinação da vertente na porção onde ocorre a voçoroca estudada seja relativamente suave e homogênea (Figura 3a), foram detectadas duas pequenas rupturas de declive que permitiram identificar três segmentos moderadamente homogêneos em termos de inclinação, correspondentes aos SGs 1, 2 e 3, da alta, média e baixa vertente, respectivamente. Como pode ser observado na figura 7, a inclinação aumenta ligeiramente de SG-1 para SG-2, enquanto um leve segmento convexo marca o limite entre o SG-2 e o SG-3.

Enquanto rochas metamáficas e veios de quartzo afloram em GS-1 e os granitoides do Complexo Gouveia são expostos em GS-1 e GS-2 (Figuras 7 e 8b), grande parte do SG-3 é completamente recoberto pela vegetação (Figuras 4a, b). Mesmo assim, nas proximidades da “foz” da voçoroca, observou-se na vertente uma sequência regular de pequenos terraços aluviais formados por sedimentos compostos por areia e seixos arredondados, típicos de ambiente fluvial e já expostos pela erosão basal, cuja sequência foi observada na parte final do radargrama da Linha 1 (Figura 8).

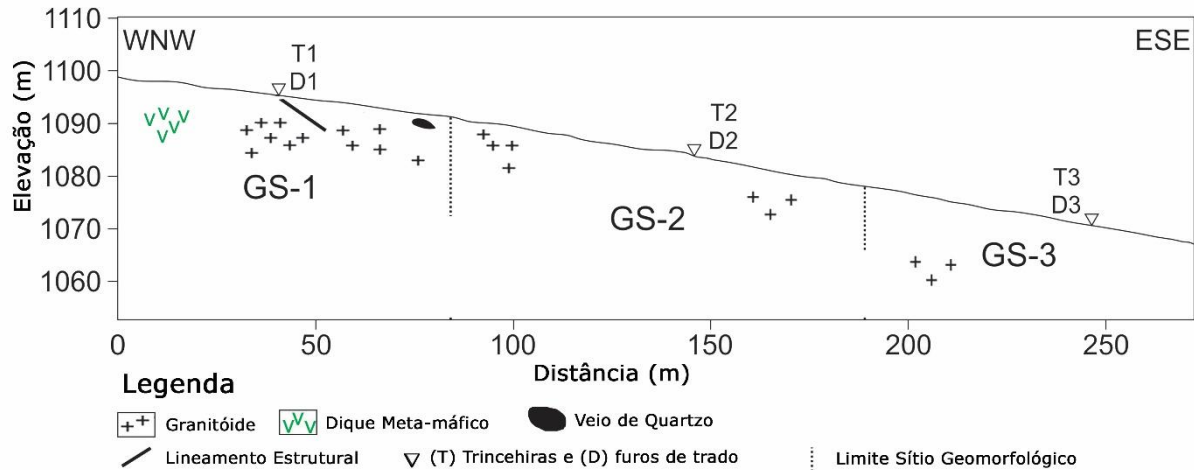


Figura 7. Perfil longitudinal mostrando a inclinação da vertente na qual a voçoroca estudada encontra-se localizada mostrando os limites identificados dos GSs, e a posição dos furos de trado e os das trincheiras para coleta de amostras do regolito. Fonte: Aranha (2003).

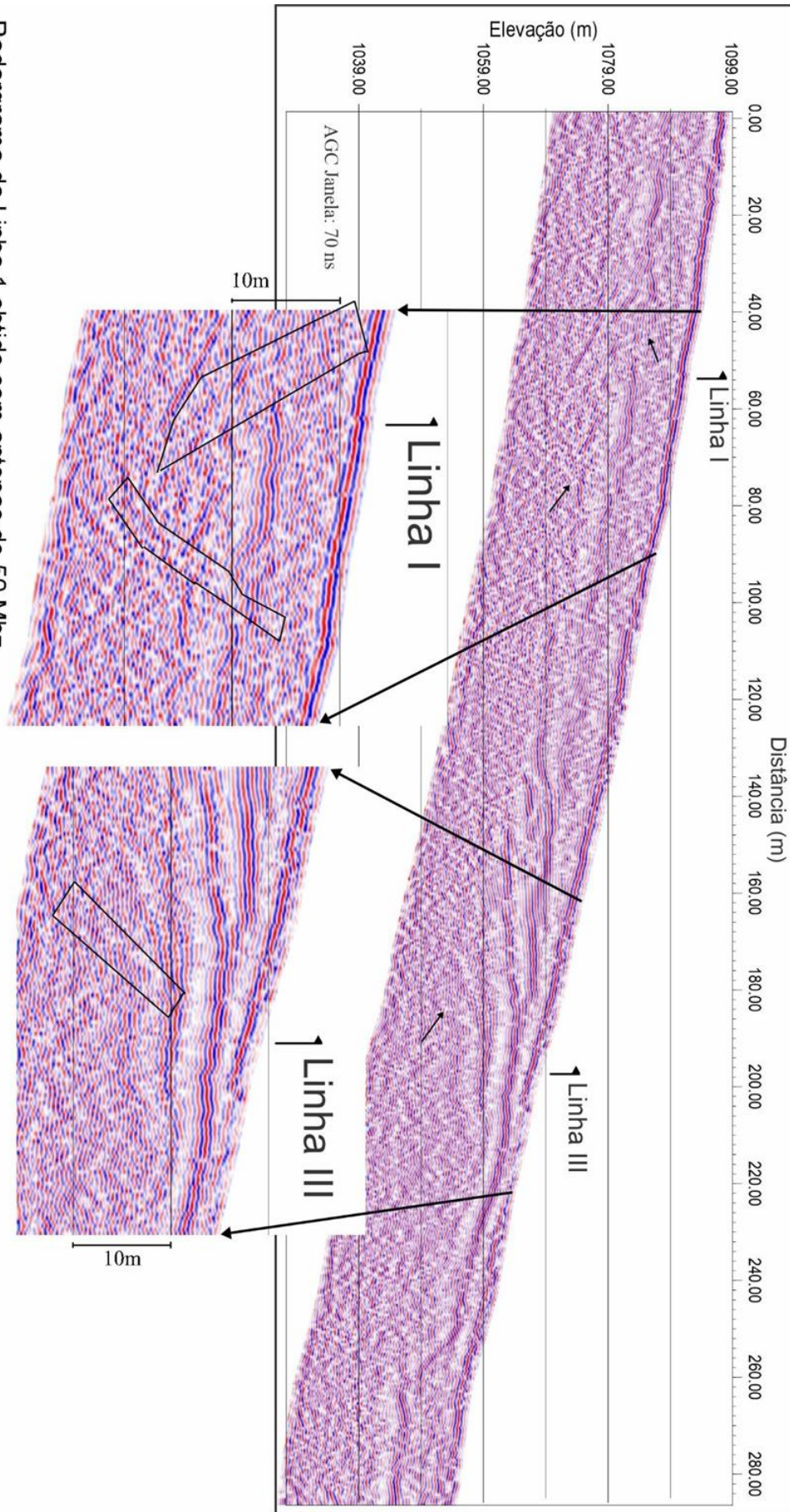
4.2. GPR

As figuras 8 e 9 apresentam os resultados do GPR correspondentes aos perfis no sentido da alta para a baixa vertente (Linhas 1 e 2) e dos perfis transversais à declividade da vertente (Linhas I a III). Para a conversão dos radargramas (tempo *versus* distância), para radargramas com escala em profundidade, utilizou-se as velocidades obtidas na interpretação das CMPs adquiridas espaçadamente na vertente da voçoroca. As hipérboles interpretadas nos perfis de CMPs (a figura 6 mostra o exemplo da seção CMP1), apresenta faixa de velocidade de propagação das ondas EM no regolito entre 0,84 m/ns perto da superfície e 0,66 m/ns na parte inferior. Através da análise da distribuição das velocidades obtidas nos perfis de CMP na área, foi possível considerar esse perfil de velocidade como constante em toda a vertente e aplicá-lo ao processamento de dados dos perfis de GPR.

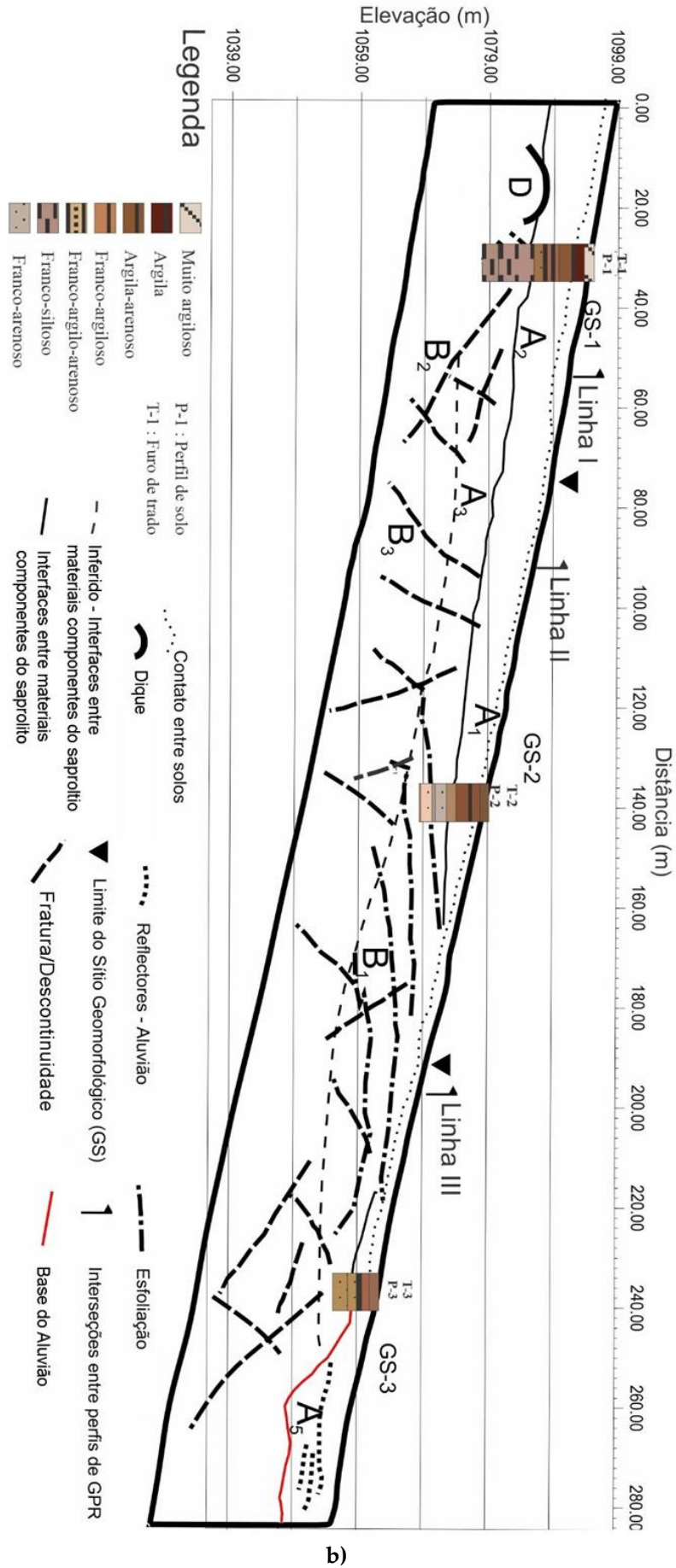
Dois refletores pouco abaulados (H) ocorrem perto do início dos radargramas obtidos com antenas de 50 MHz das Linhas 1 e 2, ambas com distância de aproximada de 18,5 m, enquanto no radargrama das antenas de 100 MHz, ela ocorre com mais detalhe sem o abaulamento (Figuras 8a, 8b). Esta feição aparece como hipérboles nos radargramas de campo das duas linhas e nos radargramas nas fases anteriores à migração dos dados. Ela indica a presença de uma estrutura estreita e subvertical acima do ponto mais alto da voçoroca associada a um dique meta-máfico identificado comumente em vários mapeamentos da área (FOGAÇA; ALMEIDA-ABREU; SCHORSCHER, 1984; FOGAÇA; SCHÖLL, 1984). Sua presença no topo do SG-1 é indicada pela forte coloração vermelha (2.5YR 3/6) do latossolo (Figura 3).

Foram identificados ainda, como pode ser observado nos radargramas mostrados na figura 8, dois grandes grupos de feições lineares realçados com *zoom* em algumas partes do perfil. O primeiro é formado pelos refletores AX (A1, A2, A3, A4 e A5), associados aos diferentes materiais da composição do regolito incluindo o aluvião (Tabela 2), enquanto o segundo, pelos refletores BX (B1, B2, B3), relacionados às feições estruturais do substrato geológico da área. Esses dois grupos de feições são mostrados nos modelos interpretados da vertente a partir dos radargramas obtidos, podendo ser vistos nas figuras 8b e 8e. Como exemplos de feições inclinadas interpretadas como fraturas mostradas nos radargramas das figuras 8a e c, estas feições interpretadas estão indicadas nestas figuras, por setas e delimitadas por pequenos blocos, bem como pelas figuras em *zoom*, de maneira a melhor evidenciá-las.

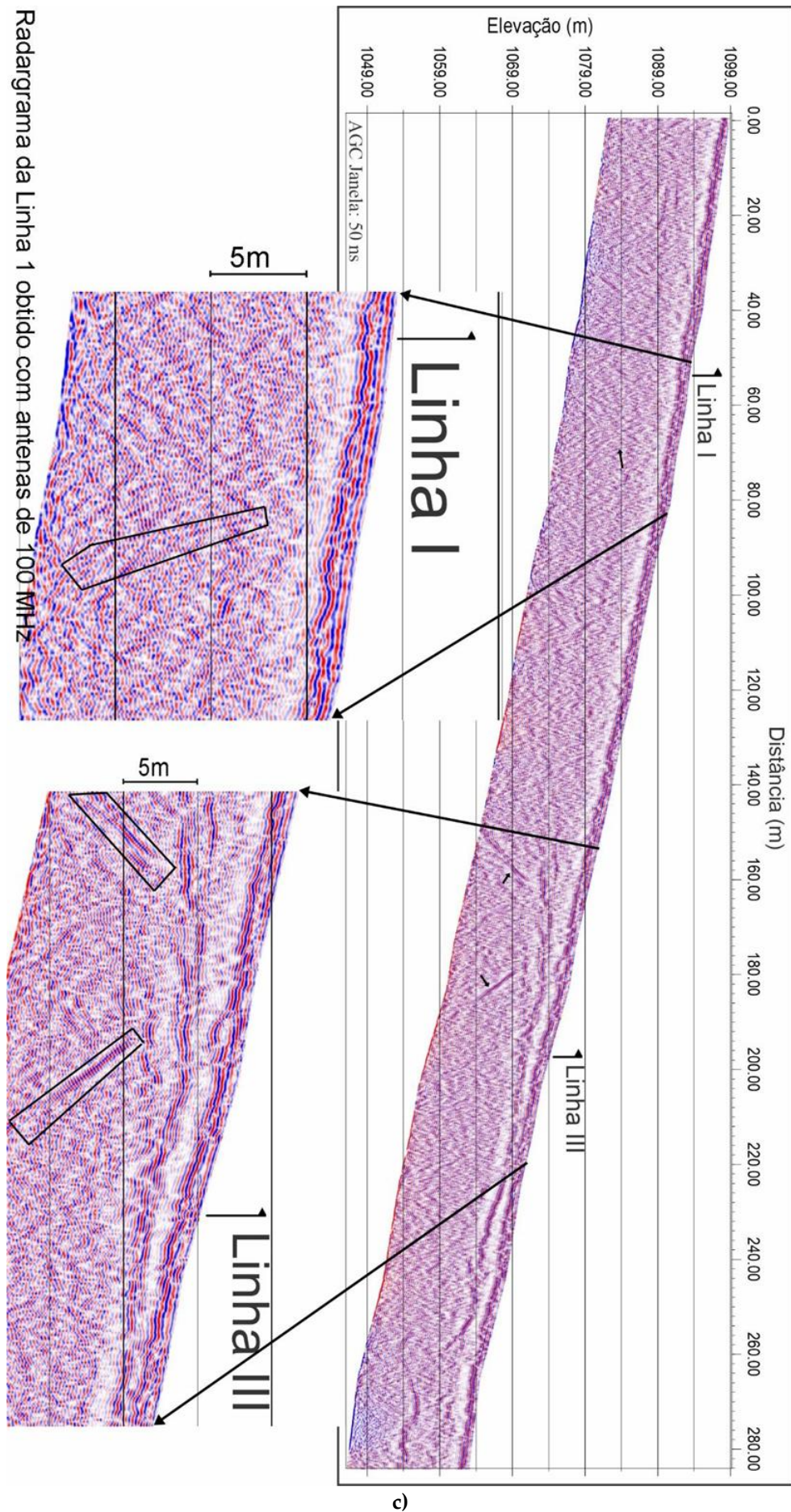
Radargrama da Linha 1 obtido com antenas de 50 Mhz



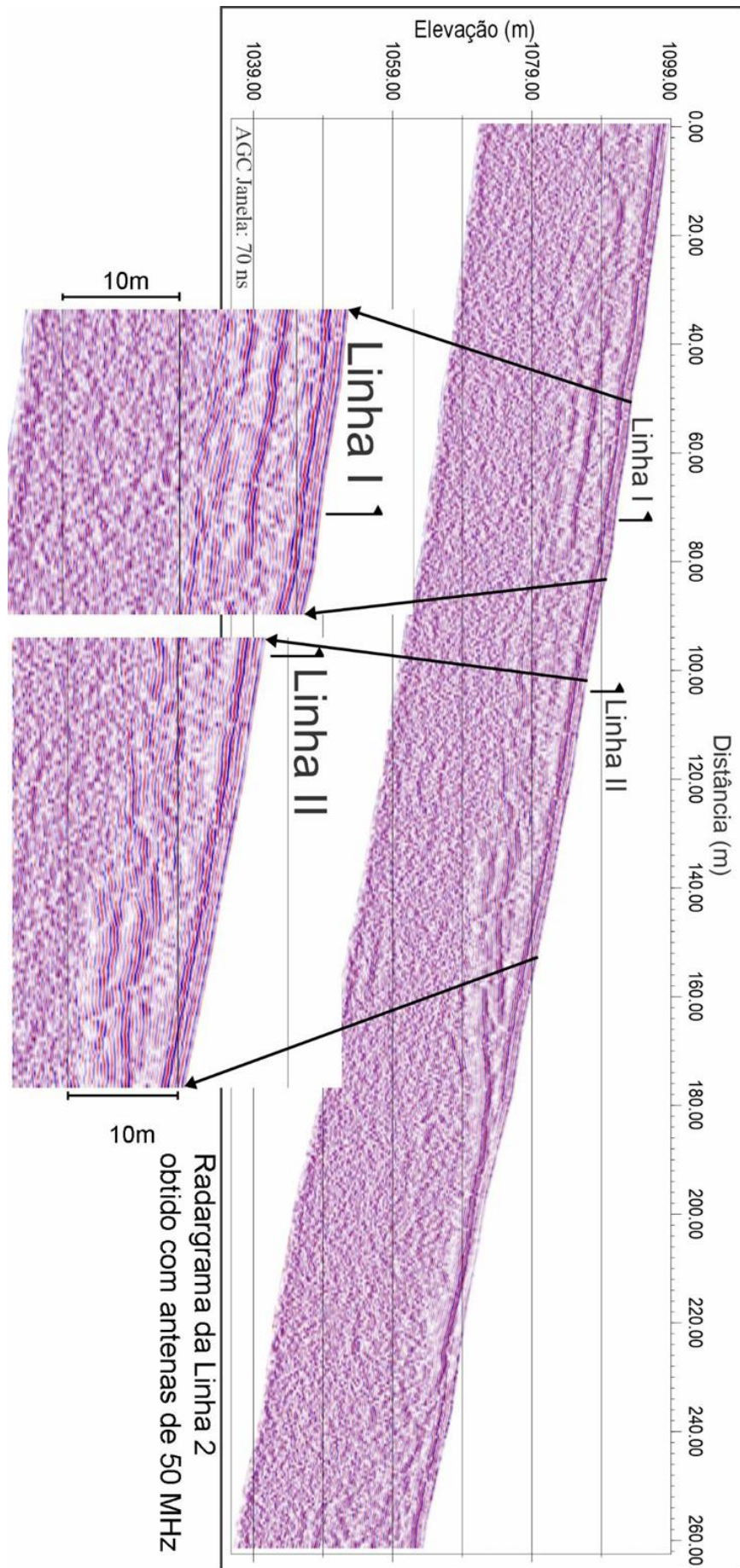
a)



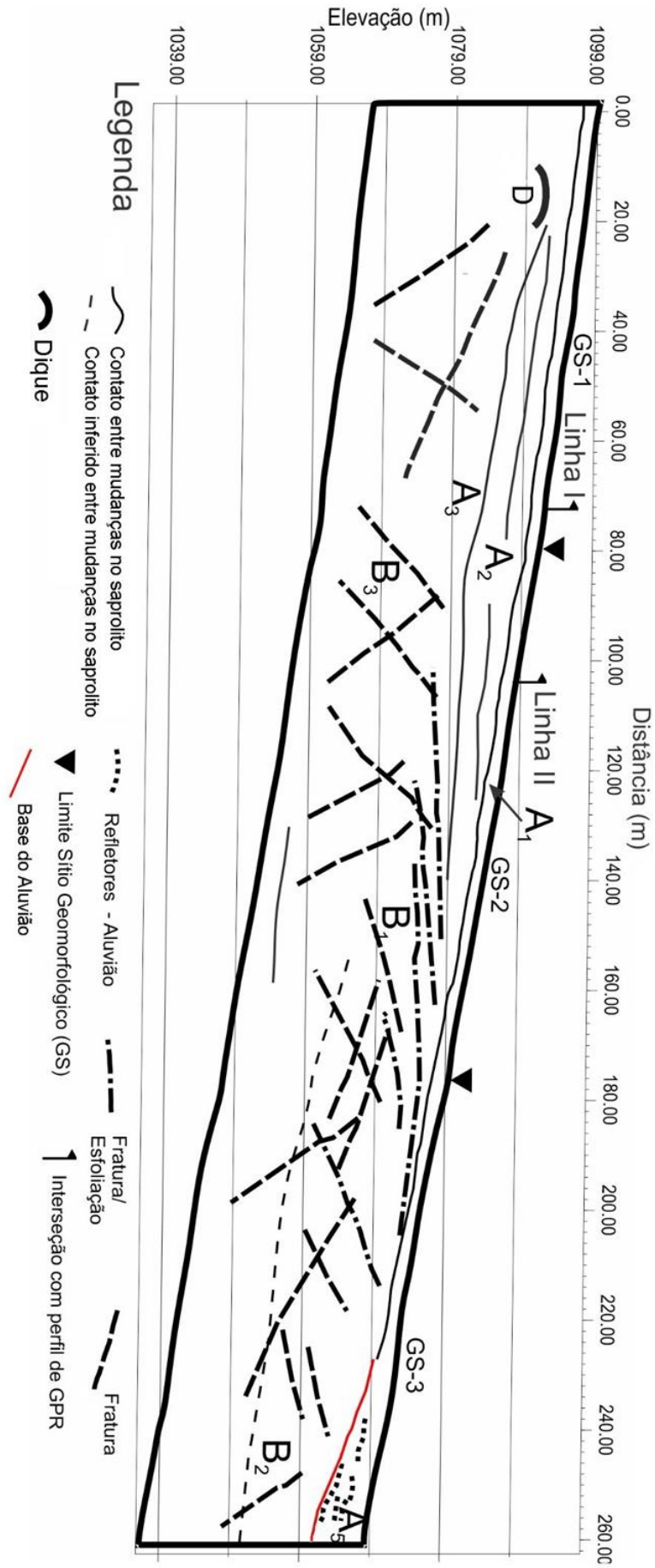
b)



Radargrama da Linha 1 obtido com antenas de 100 MHz



d)



e)

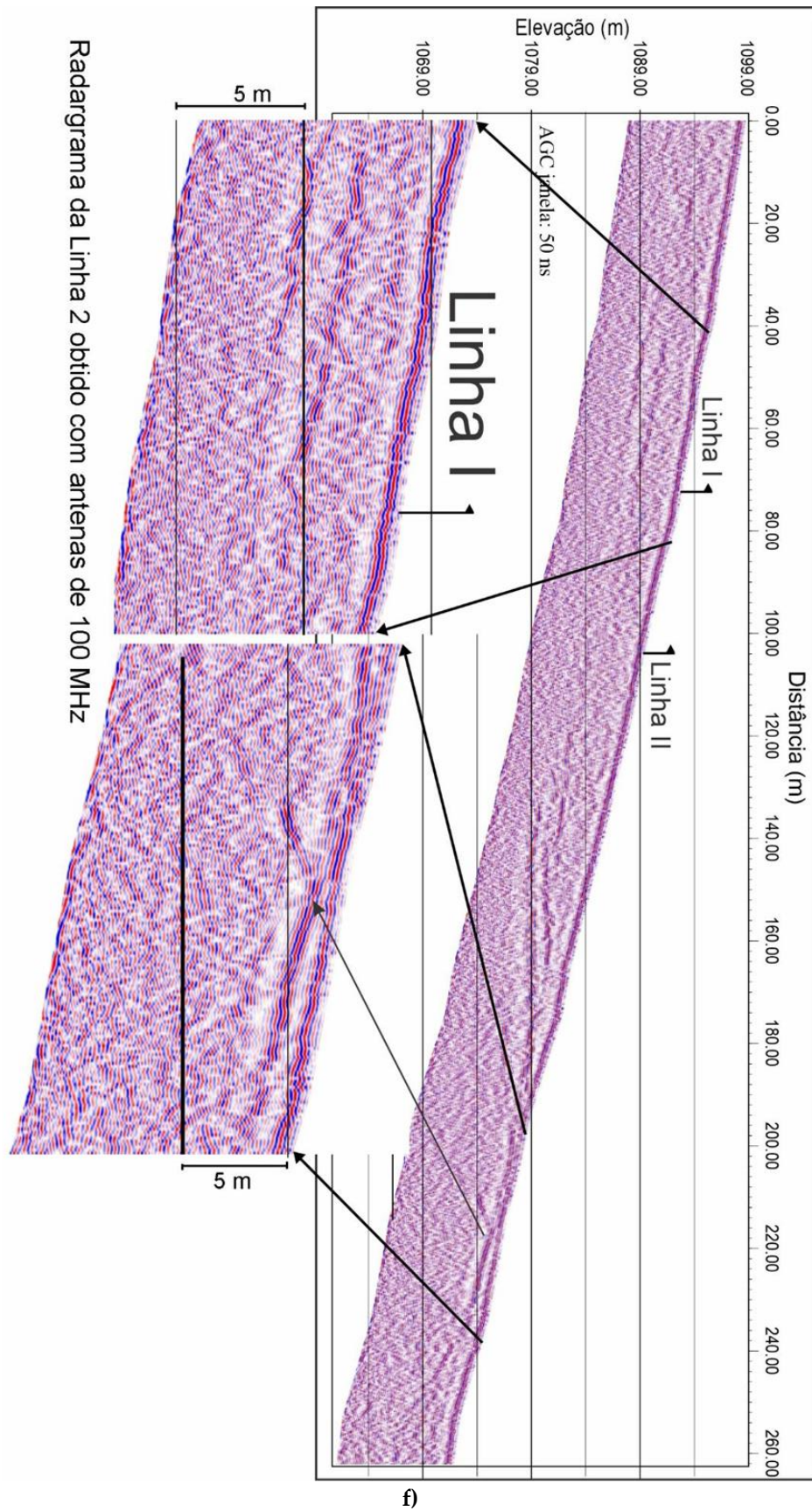


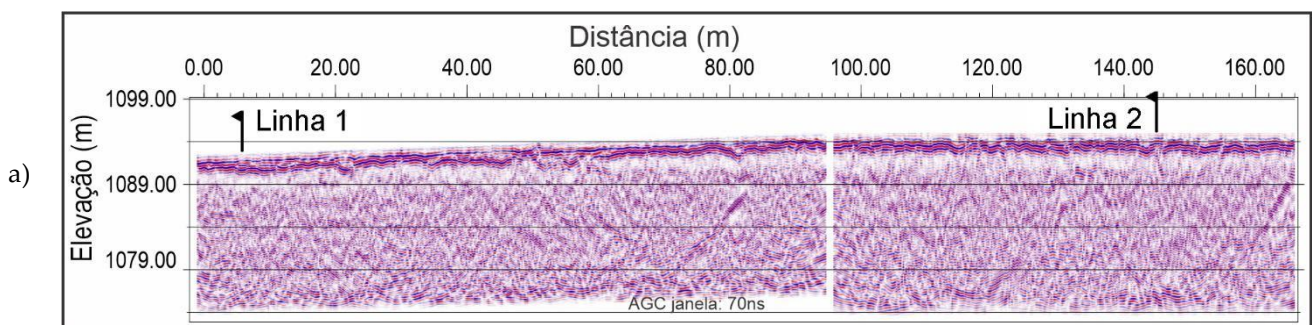
Figura 8. Radargramas obtidos ao longo da vertente à esquerda e à direita (tomando como base a direção do fluxo do canal) da voçoroca: a) radargrama da Linha 1 – 50 MHz; b) modelo da subsuperfície da Linha 1 interpretado a partir das figuras 8a e 8c; c) radargrama da linha 1 – 100 MHz; d) radargrama da Linha 2 – 50 MHz; e) modelo da subsuperfície da Linha 2 interpretado a partir das figuras 8d e f; f) radargrama da Linha 2 – 100 MHz.

Toda a porção mais superficial das paredes da voçoroca, em especial a da esquerda, é formada por regolito já pedogeneizado com a presença de latossolo separado da porção inferior (rocha intemperizada), por uma zona de caulinição esbranquiçada (Figuras 4a e 4b) interpretada nos radargramas como refletor A1 (Figuras 8a, b, c). Os refletores A2 e A3 marcam duas outras variações em níveis mais profundos do material nas paredes da voçoroca, observáveis em campo, e que parecem corresponder aos níveis diferenciados de intemperismo expressos na variação da granulometria medida em laboratório (Tabela 2). Nesse caso, os refletores Bxs, são interpretados como descontinuidades inclinadas associadas com foliações/lineamentos que, por estarem inclinadas, apresentam reflexão menos nítida do que quando aparecem mais horizontalizadas.

Mesmo com variação irregular, o refletor A1 é aproximadamente paralelo à superfície da vertente ao longo de toda sua extensão. O refletor A2 segue a mesma tendência, embora nas proximidades da base da encosta, ele se confunda com o refletor que marca a presença de um paleocanal aluvial depositado diretamente sobre a rocha, identificado em campo e mostrado na figura 8a, 8c. Dentro do canal, um conjunto de refletores (A5) forma padrões de interrupção indicando diferentes camadas de deposição do material aluvial (Figura 8d, e, f). O refletor A3 tem início no centro do SG-1 com convexidade para cima e em seguida se inclina para baixo, terminando com uma inclinação para cima no centro do SG-2, sendo interrompido, em ambos os casos, pelo refletor A2 (Figura 8a, 8c).

Nos radargramas obtidos com antenas de 50 MHz, os limites entre alguns segmentos texturais dentro do regolito aparentam uma nitidez maior em função da amplitude da reflexão. No entanto, por possibilitar melhor definição vertical, os perfis obtidos com antenas de 100 MHz, embora com amplitudes menores do que aquelas apresentadas nos radargramas com antenas de 50 MHz, apresentam limites mais bem delineados, possibilitando a observação das variações de pouca espessura dentro do regolito, o que pode ser notado com base em mudanças nos padrões de reflexão em cada nível (Figura 8a, 8c).

As rochas miloníticas/filoníticas do granitoide de Gouveia exibem foliação com mergulhos anormalmente altos, que seria, segundo Cruz et al. (2005), induzida pela trama primária, cuja disposição espacial é muito próxima da atitude das zonas de cisalhamento encaixadas nos granitoides da área de estudo, que ocorrem em faixas de alto ângulo de mergulho, com atitude modal média em torno de $090^{\circ}/60^{\circ}$. Isto pode ser observado nos lineamentos presentes nos radargramas interpretados como fratura/foliação (Figura 8b, 8d). A análise dos refletores indica que estruturas reliquias do substrato rochoso (Figura 9c, 9e) estão presentes apenas na parte inferior da parede da voçoroca (Figuras 4 e 8), logo abaixo da zona de caulinição mostrada na figura 4b, identificada inclusive em campo, como elúvio. Os refletores do Grupo B1 mergulham com ângulos baixos na porção topograficamente mais baixa do transecto (WNW), tendo sido interpretados como juntas de exfoliação pretéritas, típicas do granitoide. Quatro tipos de fraturas (B2, B3, B4 e B5) ocorrem persistentemente com um padrão semelhante de linhas de mergulho de alto ângulo ao longo de toda a extensão dos perfis, mas em direção a quadrantes opostos. As direções B1, B2 e B3 são identificadas nas Linhas 1 e 2, enquanto as B4 e B5, destacam-se nas Linhas I a III (Figura 9). As reflexões podem apresentar maiores amplitudes, como observáveis na figura 9a, nos casos em que as fraturas são mais detectáveis, como pode ser observado na reflexão da fratura que começa na posição 80 m e profundidade 1089 m, com caimento para a esquerda, em contraste com outros lineamentos inclinados. O refletor A4 que não é facilmente observável nos radargramas das linhas 1 e 2 (8a, 8c, 8d, 8f) aparecem de forma menos sutil nos radargramas da figura 9a, 9c, 9e.



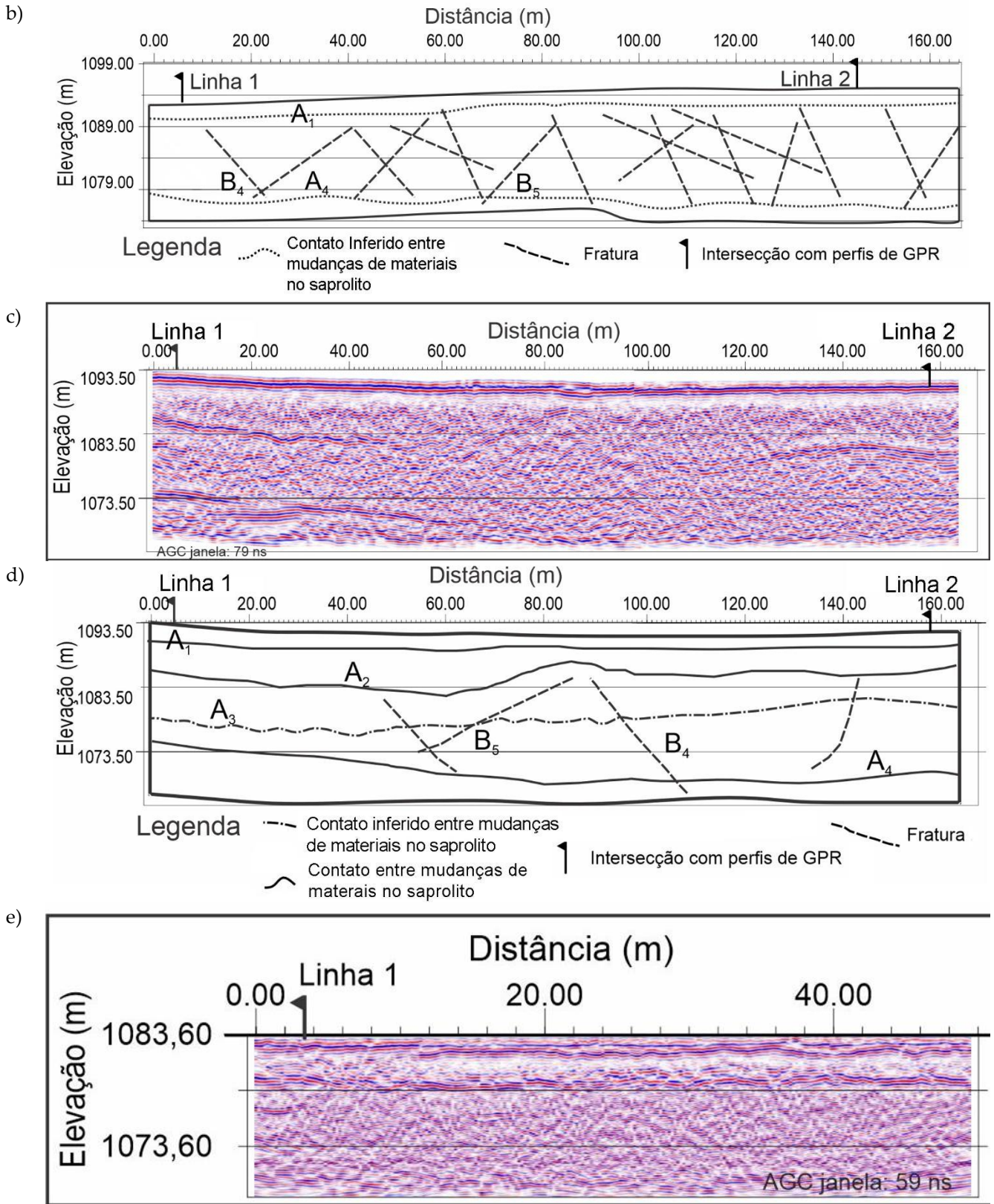


Figura 9. Radargramas das linhas transversais à vertente: a) radargramas das Linhas I e Linha Ia – Antena de 50 MHz; b) modelo interpretado da subsuperfície; c) radargramas das Linhas II e IIa – Antena de 50 MHz; d) modelo interpretado da subsuperfície; e) radargrama da Linha III – Antena de 100 MHz.

4.3. Caracterização do regolito ao longo da voçoroca em estudo

As seções transversais do regolito abertas ao longo das paredes da voçoroca mostram que, embora sua porção superior (solo pedogênico) seja aproximadamente paralelo à superfície, o saprolito formado *in situ* é muito mais assimétrico, variando em largura e geometria. O limite entre o solo pedogênico e o saprolito *in situ* (elúvio) é visível ao longo de toda a parede da voçoroca (Figuras 8 e 9), marcado pela zona esbranquiçada de caulinição (Figura 4b). Ela é composta por pedregulhos angulares de quartzo, areia grossa e material fino argiloso, apresentando uma cor vermelha escura (2,5YR 2/4), que dá lugar a tons mais claros, alaranjados e rosa, com a presença de fraturas reliquias e superfícies de foliação, na porção mais inferior da linha (Tabela 2). Como normalmente acontece em perfis sem grandes variações estratigráficas, o teor de argila do regolito cai bruscamente em profundidade à medida que se aproxima de porções menos intemperizadas da rocha, na qual a areia torna-se a fração predominante, com a ocorrência significativa de textura franco arenosa (Tabela 2). Este padrão é quebrado em GS-2, onde um nível rico em argila (atingindo 42,14 %) ocorre mais profundamente no perfil.

Tabela 2. Características física e química do regolito em cada um dos Sítios Geomorfológicos.

| Furo (SG) | Profund. (m) | pH | Cor | Areia Grossa % | Areia Fina % | Silte % | Argila % | Classe |
|-----------|--------------|-----|------------|----------------|--------------|---------|----------|-----------------------|
| 1 | 1,65 | 5,5 | 2,5 yr 2/6 | 7,6 | 34,68 | 7,48 | 50,24 | Franco-Arenoso |
| 1 | 3,1 | 6,1 | 2,5 yr 3/6 | 6,7 | 42,42 | 11,9 | 38,98 | Argiloso |
| 1 | 5,7 | 5,7 | 2,5 yr 4/8 | 6 | 34,26 | 15,44 | 44,3 | Argiloso |
| 1 | 8,2 | 5,6 | 2,5 yr 5/8 | 8,4 | 26,04 | 34,72 | 30,84 | Areno-Argiloso |
| 1 | 9,65 | 5,6 | 7,5 yr 5/8 | 9,3 | 39,92 | 40,36 | 10,42 | Franco-Siltoso |
| 1 | 15,3 | 5,6 | 10 r 6/4 | 10,2 | 33,76 | 47,86 | 8,18 | Arenoso |
| 1 | 17,95 | 5,6 | 5 yr 6/4 | 22,6 | 21,54 | 47,24 | 8,62 | Arenoso |
| 2 | 1,45 | 5 | 5 yr 4/6 | 14,1 | 36,48 | 9,78 | 39,64 | Argiloso |
| 2 | 5,5 | 5,5 | 10r 4/8 | 6,2 | 32,96 | 18,7 | 42,14 | Argiloso |
| 2 | 7,1 | 5,6 | 7 yr 6/6 | 10,3 | 34,88 | 22,68 | 32,14 | Argiloso |
| 2 | 9 | 5,5 | 7,5 yr 7/2 | 3,3 | 67,44 | 14,92 | 14,34 | Franco-Siltoso |
| 2 | 9,5 | 5,4 | 5 yr 6/2 | 3,7 | 25,06 | 28,6 | 42,64 | Franco-Areno-Argiloso |
| 2 | 11,4 | 5,4 | 2,5 yr 8/4 | 57,2 | 30,32 | 6,28 | 6,2 | Franco-Siltoso |
| 2 | 11,65 | 5,6 | 7,5 yr 6/8 | 63,7 | 23,3 | 6,34 | 6,66 | Franco-Siltoso |
| 3 | 2,1 | 5,1 | 5 yr 5/6 | 11,4 | 34,6 | 9,44 | 44,56 | Argiloso |
| 3 | 3,7 | 5 | 2,5 yr 5/8 | 10,4 | 34,2 | 15,6 | 39,8 | Argiloso |
| 3 | 4,1 | 5,2 | 10 yr 7/6 | 12,2 | 36,06 | 32,72 | 19,02 | Franco |
| 3 | 4,8 | 5,5 | 10 yr 7/8 | 10 | 39,36 | 39,4 | 11,24 | Franco |
| 3 | 6,7 | 5,7 | 10 yr 6/8 | 6,2 | 54,86 | 30,84 | 8,1 | Franco-Siltoso |
| 3 | 9,9 | 5,8 | 10 yr 6/8 | 5,6 | 61 | 27,16 | 6,24 | Franco-Siltoso |

3.4. Modelagem estrutural

Com o auxílio dos perfis do GPR, foram identificadas e medidas no campo em afloramentos da margem oposta do córrego Lava Pés e no elúvio da voçoroca estudada, várias estruturas rochosas reliquias, tais como foliação magmática, juntas de exfoliação e quatro tipos de fraturas, como pode ser visualizado na figura 10. Destas feições reliquias, a foliação mais fracamente marcada tem a orientação N-S/60°E, mostrando que os lineamentos presentes na área destoam daqueles de tendência regional.

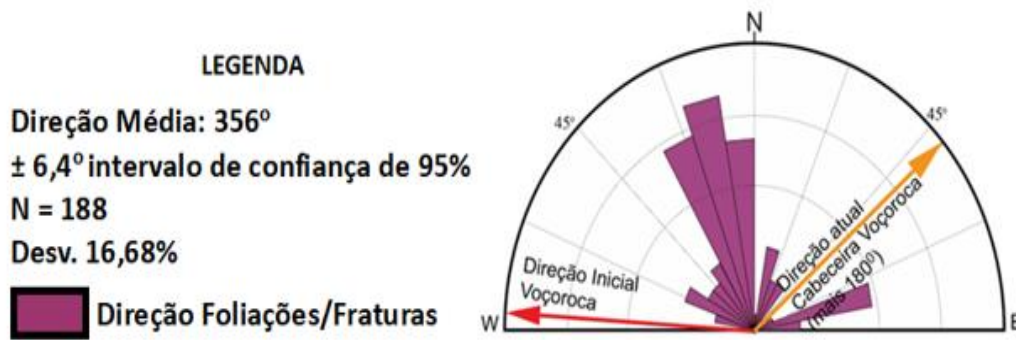


Figura 10. Roseta com as direções dos lineamentos e fraturas medidas em campo, juntamente com a direção das ramificações da voçoroca.

Os radargramas obtidos neste estudo revelaram diferentes características subsuperficiais do regolito. Correlacionando suas imagens com os dados e informações das amostras das trincheiras, tradagem (submetidas às análises laboratoriais) e medições estruturais, foi possível atribuir às feições geofísicas observadas nos perfis, os contatos entre diferentes porções do regolito, incluindo o solo pedológico e/ou às estruturas da rocha alterada (saprólito), que pode ser considerada como sendo o elúvio. A combinação de dados de campo e seções de GPR permitiu uma investigação mais aprofundada dessas estruturas no regolito, em especial em zona menos intemperizada, através de uma reconstituição tridimensional, inicial, do arcabouço geológico estrutural (Figura 11) e do seu papel no desenvolvimento da voçoroca. Observa-se que as direções dos tipos de foliação/fraturas das estruturas B1, B2 e B3, preservados no elúvio, constituem os eixos preferenciais da evolução da voçoroca, como mostrado na roseta, enquanto as direções das estruturas B4 e B5, parecem não apresentar papel importante nesta evolução (Figura 10).

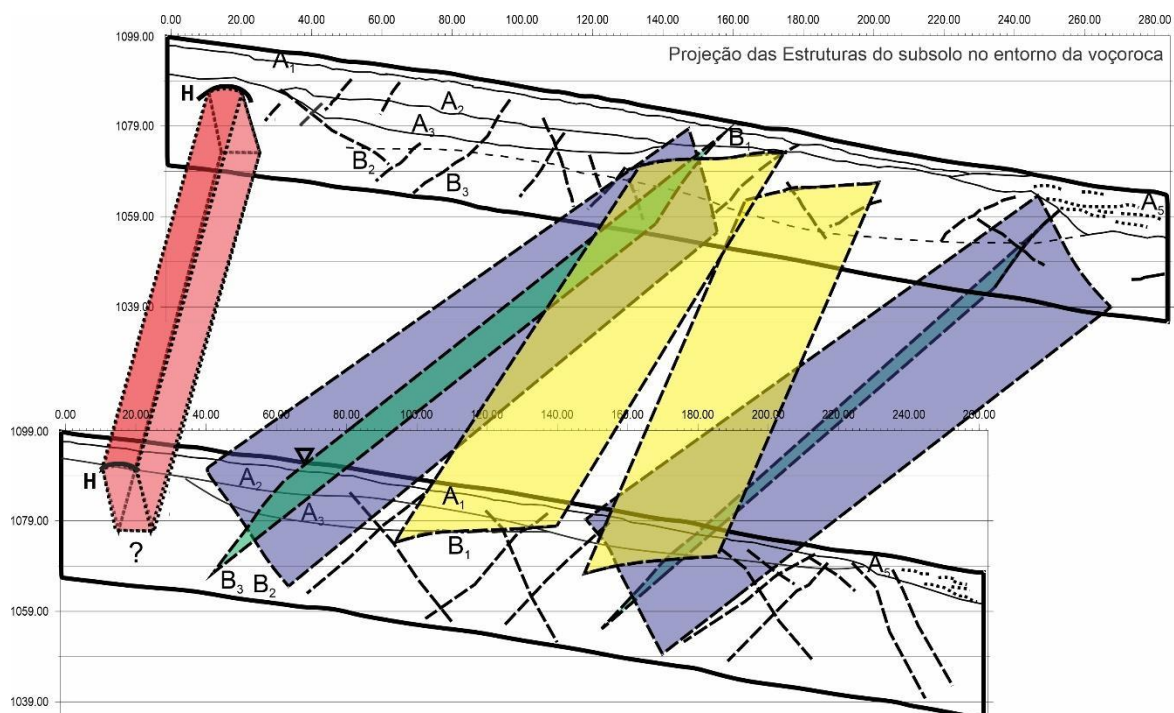


Figura 11. Projeção das estruturas da subsuperfície observadas nos perfis de GPR no entorno da voçoroca.

O arcabouço geológico estrutural da pequena bacia onde ocorre a voçoroca é marcado pela presença de juntas de esfoliação e de fraturas como observado em campo, sugerindo que eles favoreceram a infiltração subsuperficial da água de chuva e, assim, constituíram fortes impulsionadores do processo erosivo.

5. Discussão dos Resultados

Para investigar os fatores associados à essa mudança abrupta de direção de uma voçoroca em vertente modelada em um substrato granito-milonítico, em Gouveia, MG, na serra do Espinhaço, sudeste do Brasil, foi utilizada abordagem multidisciplinar, com ênfase no uso do GPR para a obtenção de dados subsuperficiais da encosta, que pudessem ser indicativos de possível influência na evolução desta forma erosiva. A voçoroca instalou-se em uma pequena bacia de drenagem (Figura 12, Estágio I) e apresenta como principal característica uma deflexão abrupta na medida que evoluía a montante (Figura 12, Estágio 2). Na baixa vertente, a direção inicial é aproximadamente E/W (N87°W), coincidente com o sistema de dobras vergentes para W do evento orogênico Brasileiro (N81°E), entre 600 e 550 Ma, identificado na área do Complexo granitoide de Gouveia. Posteriormente, na alta vertente, deflete aproximadamente 45° no sentido anti-horário e passa a evoluir na direção predominante NE/SW (N132°W), que é típica da foliação principal das direções de foliações/fraturas das dobras das zonas de cisalhamento do Espinhaço (AUGUSTIN, 1995). Essa reorientação de direção da incisão erosiva foi, como demonstrado, resultado da influência de feições estruturais geológicas, não apresentando correspondência com as variações texturais e composicionais do perfil mais, ou menos, intemperizado do regolito, embora a morfologia da vertente possa eventualmente ter redirecionado o escoamento superficial para um canal inicial (Figura 12).

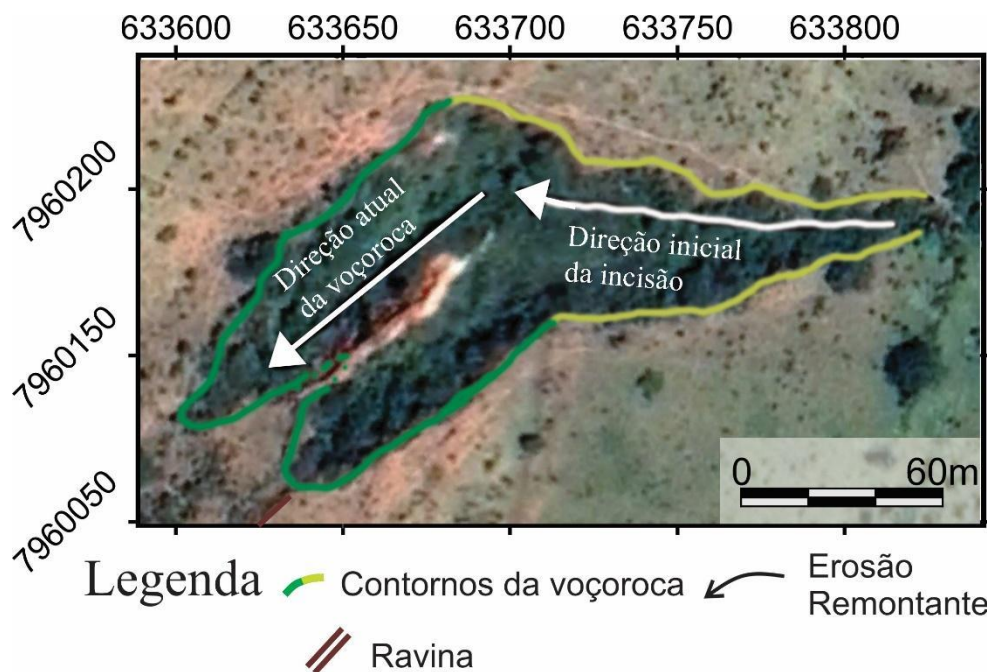


Figura 12. Estágios de evolução da voçoroca: direção inicial e atual da voçoroca.

Como evidenciado por Berkowitz (2002), Dimmen, Rotevatn e Nixon (2020), Henriksen (2006), Henriksen e Braathen (2006), e Williams (2003), as fraturas e juntas das rochas são mais suscetíveis à infiltração e ao escoamento de água do que as massas compactas, o que resulta em direcionamento preferencial para o fluxo subsuperficial da água. Nesse sentido, as foliações/fraturas B2 e B3 tiveram papel de destaque nesse processo, pois o eixo geral se desenvolveu paralelo à direção destas fraturas (aproximada N49°E), embora estas estruturas não sejam as mais representativas no contexto da escala regional (Figura 10) que apresentam direções predominantes NS e EW. Esses resultados apoiam-se no fato de que as feições geológicas estruturais são ainda identificáveis nas rochas granito-gnáissicas intemperizadas *in situ*. Embora a foliação magmática presente nos granitoides de Gouveia apresente direções N-S e NNE-SSW, com ângulos de mergulho elevados de aproximadamente 75°, segundo Knauer e Grossi-Sad (1997), ela pode variar localmente (CRUZ, 2000; CRUZ; ALKMIM; LAGOEIRO, 2005). Esse é o caso das atitudes das foliações/fraturas (B1) encontradas nas paredes da voçoroca estudada, detectadas com o auxílio do GPR. Elas apresentam atitudes conflitantes com as descritas pelos primeiros autores (citados acima), sugerindo que se trata de feições resultantes de alívio de tensão, a qual, reconhecidamente, potencializa a formação de novas

feições de caráter estrutural nas rochas (Figuras 8b, 8f e 10). As juntas de foliação são aproximadamente paralelas à superfície indicando que são feição herdada desde a sua origem, surgindo na superfície como resultado da remoção erosiva do material intemperizado. Isto, porque essas estruturas são formadas sob alta pressão, quilômetros abaixo da crosta, longe do alcance do intemperismo e da pedogênese, apontando para o fato de que o granitoide original se rompeu antes de ascender à crosta (CRUZ; ALKMIM; LAGOEIRO, 2005).

A presença de um paleocanal na zona de contato da baixa vertente com o córrego Lava Pés mostra que a voçoroca teve início na base da vertente, conectada ao sistema de drenagem do córrego, antes de evoluir a montante, ocupando a encosta. As evidências resultantes do GPR sugerem que, por causa da presença de estruturas rochosas bem preservadas na vertente, ela foi impelida, em seu médio curso, a tomar a direção NE/SW, na qual ocorre uma zona quimicamente mais intemperizada e, assim, mais suscetível à erosão. As diferentes influências geológicas são assinaladas por rupturas de declividade, mostrando que a vertente responde e registra a variação geológica interna, como defendido por Wright (1973) e Augustin (1979, 1995).

O uso do radar de penetração no solo (GPR) provou ser uma técnica bem-sucedida para detectar e mostrar características na morfologia do regolito e de estruturas das rochas no subsolo, mesmo quando estas se encontram parcialmente intemperizadas. O refletor A4 observado no radargrama obtido com a antena de 50 MHz, por exemplo, é marcado por uma variação nos padrões de reflexão no regolito que permitiu a detecção em maior profundidade, da presença de material quimicamente alterado (Figura 8a). Por outro lado, as características das foliações/fraturas são mais claramente identificadas no radargrama obtido com as antenas de 100 MHz (Figura 8c). Os diferentes aspectos identificados de cada estrutura, por sua vez, dependeram da profundidade e da posição no qual ocorrem ao longo da vertente e na parede da voçoroca, tendo sido captados através dos perfis de GPR, utilizando antenas com frequências centrais diferentes. Ao combinar os resultados da interpretação de cada perfil, os dados geofísicos forneceram uma base confiável de dados e informações da estruturação da subsuperfície da vertente.

6. Conclusões

O estudo mostra que a voçoroca estudada, localizada nas rochas do Complexo granitoides de Gouveia, Serra do Espinhaço, MG, evoluiu em duas direções principais influenciada por fatores geomorfológicos (declividade) e estruturais, como fraturas e/ou foliação das rochas do substrato da vertente. Inicialmente, a cabeceira avançou com direção aproximada de W-WSW seguindo a declividade da pequena bacia de drenagem do córrego Lava Pés. À medida que recuava a montante, passou a se desenvolver da direção E-W para SW, seguindo a orientação predominante da borda W do sistema de dobras com um plano axial N-S. No entanto, na meia encosta, a direção do canal muda para NE-SW, direção que corresponde ao sistema de foliação/fraturas e falhas das zonas de cisalhamento dos granitoides/milonitos da região de Gouveia. A combinação de dados de campo e seções de GPR permitiu uma investigação mais aprofundada da continuidade dessas estruturas no regolito, em especial em sua porção intemperizada, que manteve feições geológicas originária. Essa combinação mostrou que a voçoroca modificou sua direção de incisão em função das estruturas da subsuperfície. Contudo, nem todas as fraturas/foliações tiveram papel relevante, pois os tipos de foliação/fraturas B4 e B5, de caráter local, com direção aproximada E-W preservados no elúvio, parecem não demonstrar influência importante no desenvolvimento da voçoroca, uma vez que os eixos de evolução desta, acabaram por assumir as direções NE-SW, que é a mesma das estruturas de B1, B2 e B3.

Os resultados obtidos a partir da base de dados criada pela combinação de diferentes abordagens metodológicas, entre as quais a do radar de penetração no solo (GPR) com antenas de diferentes frequências centrais, teve um papel fundamental na análise dos fatores que atuam subsuperficialmente para a evolução da voçoroca estudada. O GPR mostrou-se eficaz em detectar a participação da estrutura geológica nessa evolução, mesmo em regolitos espessos, produzindo informações detalhadas sobre as feições subsuperficiais, o que permitiu a elaboração de um modelo estrutural simplificado para orientar as interpretações sobre a evolução deste tipo de erosão. O método evidenciou, assim, sua versatilidade e validade como ferramenta auxiliar prática a ser implantada em estudos de erosão concentradas, mostrando que características subsuperficiais da vertente necessitam ser consideradas em futuras intervenções de controle e mitigação dessas formas erosivas, como demonstrado no caso do estudo no município de Gouveia.

Contribuições dos Autores: Aquisição, processamento e interpretação dos dados geofísicos, geomorfológicos, P.R.A.A.; Aquisição de dados geomorfológicos, interpretação de dados, C.H.R.R.A.; Aquisição de dados topográficos e GPS, modelo topográfico da área, M.A.T.E.; Aquisição e interpretação de dados geológicos, A.U.; Confecção de mapas e figuras, interpretação de dados de GPR, H.C.J.

Agradecimentos: Agradecimentos: à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento da pesquisa e ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC-UFMG) pela infraestrutura de apoio.

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

Referências

1. AIGBADON, G. O.; OCHELI, A.; AKUDO, E. O. Geotechnical evaluation of gully erosion and landslides materials and their impact in Iguosa and its environs, southern Nigeria. *Environ. Syst. Res.*, v. 10, p. 36, p. 1-17, 2021.
2. ALMEIDA-ABREU, P. A. O Supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço Meridional (Minas Gerais): o rifte, a bacia e o orógeno. *Geonomos*, v. 3, n. 1, p. 1-18, 1995.
3. AMAGU, A. C.; EZE, S. N.; JUN-ICHI. Geological and Geotechnical Evaluation of Gully Erosion at Nguzu Edda, Afikpo Sub-Basin, Southeastern Nigeria. *Journal of Environment and Earth Science*, v. 8, n. 12, p. 148-158, 2018.
4. AMAH, E. A.; ESU, E. O.; KANU, E. O. Hydrogeological and Geotechnical Investigations of Gully erosion sites in Calabar area, Southeastern, Nigeria. *Global Journal of Pure and Applied Science*, v.14, p. 423-431, 2008.
5. ARANHA, P. R. A. **Estudo das coberturas superficiais e sua dinâmica na região de Gouveia, Serra do Espinhaço, MG: utilizando o Radar de Penetração no Solo (GPR)**. Tese (Doutorado, Programa de Pós-Graduação Evolução Crustal e Recursos Naturais), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 2003. 507p.
6. ARANHA, P. R. A.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; SOBREIRA, F. G. The use of GPR for characterizing underground weathered profiles in the sub-humid tropics. *Journal of Applied Geophysics*, v. 49, p. 195-210, 2002.
7. ARANHA, P. R. A.; MOURÃO, A. C. M.; SOBREIRA, F. G.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Relação entre o substrato rochoso e presença de voçorocas na bacia do Ribeirão do Chiqueiro, Serra do Espinhaço, Minas Gerais. In: V Simpósio Nacional de Geomorfologia/I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia. 2004. *Anais...* UFSM, Santa Maria, p. 1-15. 2004.
8. AUGUSTIN, C. H. R. R. **A preliminary integrated survey of the natural resources near Alcantarilla, Southeast Spain**. Mestrado (MSc Thesis), Geography Department, University of Sheffield, Sheffield, UK. 1979. 380p.
9. AUGUSTIN, C. H. R. R. **Geoökologische Studien im südlichen Espinhaçogebirge bei Gouveia, Minas Gerais, Brasilien, unter besonderer Berücksichtigung der Landschaftsentwicklung**. Tese (PhD Naturwissenschaften), Geowissenschaften Fachbereich, Johannes Wolfgang Goethe Universität, Frankfurt a.M., Germany. 1995. 294 p.
10. AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Piping em área de voçorocamento, noroeste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 7, p. 9-18, 2006a.
11. AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. A ocorrência de voçorocas em Gouveia, MG: características e processos associados. *Geonomos*, v. 14, p. 75-86, 2006b.
12. AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A.; COE, H. H. Distribuição espacial das voçorocas em Gouveia-MG: fatores associados. *Geonorte*, Edição Especial 4, v. 1, p. 634-647, 2012.
13. BACELLAR, L. A. P. **Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do rio Maracujá. Ouro Preto, MG**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2000. 226p.
14. BACELLAR, L. A. P.; COELHO NETTO, A. L.; LACERDA, W. A. Controlling factors of gullying in the Maracujá Catchment, southeastern Brazil. *Earth Surf. Process. Landf.*, v. 30, p. 1369-1385, 2005.
15. BARBOSA, V. C. C.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Estudo preliminar da variação das microformas e da cobertura vegetal na geração do runoff e perda de solo em vertente do município de Gouveia. *Geonomos*, v. 8, n. 2, p. 1-7, 2002.
16. BEAVIS, S.G. Structural controls on the orientation of erosion gullies in mid-western New South Wales, Australia. *Geomorphology*, v. 33, p.59-72, 2000.
17. BENSON, A. K. Applications of GPR in assessing some geological hazards: Examples of ground water contamination, faults, cavities. *Journal of Applied Geophysics*. v. 33, p. 177-193, 1995.
18. BERKOWITZ, B. Characterizing flow transport in fractured geological media: A review. *Adv. Water Resour.* v. 25, p. 861-884, 2002.
19. BERNATEK-JAKIEL, A.; KONDRACKA, M. Combining geomorphological mapping and near surface geophysics (GPR and ERT) to study piping systems. *Geomorphology*, v. 274, p. 193-209, 2016.
20. BEZERRA, M. O.; BAKER, M.; PALMER, M. A.; FILOSO, S. Gully formation in headwater catchments under sugarcane agriculture in Brazil. *J. Environ. Manag.* 2020, Sep 15;270:110271 doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110271. Epub 2020 Jun 9.

21. BOARDMAN, J.; PARSONS, A. J.; HOLLAND, R.; HOLMES, P. J.; WASHINGTON, R. Development of badlands and gullies in the Sneeuberg, Great Karoo, South Africa. *Catena*, v. 50, p. 165–184, 2003.
22. BOCCO, G. Gully Erosion: Processes and Models. *Progress in Physical Geography*, v. 15, n. 4, p. 392-406, 1991.
23. BOURAMTANE, T.; HILAL, H.; REZENDE-FILHO, A. T.; BOURAMTANE, K.; BARBIERO, L.; ABRAHAM, S.; VALLES V.; KACIMI, I.; SANHAJI, H.; TORRES-RONDON, L.; CASTRO, D. D. de; SANTOS, J. C. V.; OUARDI, J.; EL BEQQALI, O.; KASSOU, N.; MORARECH, M. Mapping Gully Erosion Variability and Susceptibility Using Remote Sensing, Multivariate Statistical Analysis, and Machine Learning in South Mato Grosso, Brazil. *Geosciences* 2022, 12(6), 235doi.org/10.3390/geosciences12060235.
24. BRANTLEY, S. L.; LEBEDEVA, M. I. Relating land surface, water table, and weathering fronts with a conceptual valve model for headwater catchments. *United States: N. p.*, 2020. Web. doi:10.1002/hyp.14010.
25. FROTA FILHO, A. B. da; PEREIRA de ABREU, N. R.; VIEIRA, A. F. S. G. Processo de voçorocamento e feições secundárias: um estudo de caso em Manaus-AM. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 21, n. 74, p. 313–323, 2020.
26. BULL, L. J.; KIRKBY, M. J. Gully processes and modeling. *Progress in Physical Geography*, v. 21, n. 3, p. 354-374, 1997.
27. CAMBRA, M. F. E.; SILVA, L. G. E.; DANTAS, M. E.; COELHO NETTO, A. L. Litoestruturas pré-cambrianas no controle do voçorocamento atual: Subsídios a modelagem sobre expansão da rede de canais na bacia do rio Piracema (SP/RJ). In: Simpósio nacional de Geografia Física Aplicada 6, Goiânia, 1995. *Anais... Goiânia, UFG*, v. 1, p. 487-492, 1995.
28. CASTILHO, C.; GÓMEZ, J. A. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, v. 160, p. 300-319, 2016.
29. CHAPLOT, V.; WALTER, C.; CURMI, P.; HOLLIER-LAROUSSE, A.; ROBAIN, H. Combining geophysical methods to estimate the spatial distribution of soils affected by water saturation. *Comptes Rendus Geoscience*, v. 336, p. 553–560, 2004.
30. CHEMALE Jr, F.; DUSSIN, I. A.; MARTINS, M. S.; NASCIMENTO, M. Nova abordagem tectono-estratigráfica do Supergrupo Espinhaço em sua porção meridional (MG). *Geonomos*, v. 19, p. 173–179, 2011.
31. CHIKWELU, E. E.; OGBUAGU, F. U. Geotechnical Investigation of soils around Mbaukwu Gully Erosion Sites South – Eastern part of Nigeria. *Journal of Applied Geology and Geophysics*. v. 2, p. 6 – 17, 2014.
32. COELHO NETO, A. L. Mudanças ambientais recentes, mecanismos e variáveis – controle do voçorocamento atual na bacia do rio Bananal, SP-RJ: Bases metodológicas para previsão e controle da erosão. In: V Simpósio Nacional de Controle da Erosão, 1995, Baurú, SP. *Anais... ABGE/UNESP*, v. 1, p. 377-422, 1995.
33. COELHO NETTO, A. L. Mecanismos e condicionantes geo-hidrológicos do voçorocamento em ambiente rural: implicações na estabilidade de encostas. In: XXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 1997, Rio de Janeiro, RJ. *Anais... EMBRAPA-CNPS e Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, CD-ROM, 1997.
34. COELHO, R. M. **Petrografia e litoquímica dos granitos peraluminosos de Gouveia, MG**. Dissertação (Mestrado em Geologia), Programa de Pós-Graduação de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, Brasil. 2013. 42p.
35. COSTA, W. D.; PARIZZI, M. G.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Geotecnological analysis of gully process of Gouveia – MG. In: Regional Conference on Geomorphology, 1999, Rio de Janeiro. *Abstracts... International Association of Geomorphologists (IAG)*, Cunha, S. B.; Guerra, A. T. (Eds.), p. 17-22, 1999. 70p.
36. CROUCH, R. S. The role of tunnel erosion in gully head progression. *J. Soil Conserv.*, N. S. W, 39, p. 145-155, 1983.
37. CROUCH, R. J. Erosion Processes and Rates for Gullies in granitic soils Bathurst, New South Wales, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 15, p. 169-173. 1990.
38. CRUZ, S. C. P.; ALKMIN, F. F.; LAGOEIRO, L. E. Zona de cisalhamento do núcleo do Anticlinório de Gouveia, cordilheira do Espinhaço, MG: geometria, cinemática e processos deformacionais. *Rev. Bras. de Geociências.*, v. 35, n. 4, p. 441-452, dez 2005.
39. CRUZ, S. C. P. **Zonas de cisalhamento no núcleo do Anticlinólio de Gouveia (MG): processos deformacionais e metamórficos**. Dissertação (Mestrado em Geologia), Programa de pós-graduação – Evolução Crustal e Recursos Naturais. Universidade Federal de Ouro Preto, MG, Brasil. 2000. 277p.
40. DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground Penetrating Radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v. 37, p. 531–551, 1989.
41. DIMMEN, V.; ROTEVATN, A.; NIXON, C. W. The Relationship between Fluid Flow, Structures, and Depositional Architecture in Sedimentary Rocks: An Example Based Overview. *Geofluids*, v. 2020, Article ID 3506743, 19 p. <https://doi.org/10.1155/2020/3506743>.
42. DINIZ, A. D.; OLIVEIRA, C. V.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Relações solos-superfícies geomórficas na porção norte da Bacia do Ribeirão Chiqueiro- Gouveia, MG. *Geonomos*, v. 13, n. 1-2, p. 19-27, 2005.
43. DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. Embrapa Solos, Rio de Janeiro. 2017. 230p.

44. DOOLITTLE, J. Ground-penetrating radar, Soil Exploration. In: GLIŃSKI, J.; HORABIK, J.; LIPIEC, J. (eds) **Encyclopedia of Agrophysics**. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_270. 2011
45. DOTTERWEICH, M.; SCHMITT, A.; SCHMIDTCHEN, G.; BORK, H. R. Quantifying historical gully erosion in northern Bavaria. **Catena**, v. 50, p. 135–150, 2003.
46. DUNNE, T. Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. In: HIGINS, C. G.; COATES, D. R. Groundwater Geomorphology. **Geological Society of America Special Paper**, v. 252, p. 1–28, 1990.
47. ELMAHDY S.I.; MOHAMED, M.M. Relationship between geological structures and groundwater flow and groundwater salinity in Al Jaaw Plain, United Arab Emirates; mapping and analysis by means of remote sensing and GIS. **Arabian Journal of Geosciences**, March 2013. DOI: 10.1007/s12517-013-0895-4.
48. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2nd ed. Rio de Janeiro, RJ, 1997. 212p.
49. EVERETT, M. E. **Near-surface applied geophysics**. 1st Ed. Cambridge University Press, New York. 2013.
50. FERNANDES, N. F.; COELHO NETTO, A. L. Hidrologia subsuperficial e mecânica do solo no complexo de rampa, Bananal, SP. In: III Encontro Nacional de Geografia Física Aplicada, 1989, Nova Friburgo, RJ. **Anais... III Encontro de Geografia Física Aplicada**, v. 1, p. 71–87, 1989.
51. FERNANDEZ, J. A. **Estudo de Erosividade de Solos e Rocas de uma Voçoroca em São Valentim, RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia), Universidade Federal de Santa Maria, RS. 2011. 127p.
52. FIGUEIREDO, M. A.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; FABRIS, J. D. Mineralogy, size, morphology and porosity of aggregates and their relationship with soil susceptibility to water erosion. **Hyperfine Interactions**, v. 122, p. 177–184, 1999.
53. FOGAÇA, A. C. C.; ALMEIDA-ABREU, P. A.; SCHORSCHER, H. D. Estratigrafia da sequência supra-crustal arqueana na porção mediana central da Serra do Espinhaço, MG, 33^o Congresso Brasileiro de Geologia. SBG, Rio de Janeiro, **Anais...** p. 2652–2667, 1984.
54. FOGAÇA, A. C. C.; SCHÖLL, W. U. Estratigrafia e tectônica das rochas arqueanas e proterozóicas da região de Guinda e Gouveia, MG. 33^o Congresso Brasileiro de Geologia. SBG, Rio de Janeiro, **Anais...** p. 2638–2651, 1984.
55. FRANCKE, J. A review of selected ground penetrating radar applications to mineral resource evaluations. **Journal of Applied Geophysics**, v. 81, p. 29–37, 2012.
56. GERRARD, J. **Soil geomorphology - An integration of Pedology and Geomorphology**. 1th ed. London: Chapman & Hall, 1992.
57. GOMEZ, C.; HOTTA, N.; SHINOHARA, Y.; PARK, J. H.; TSUNETAKA, H.; ZHANG, M.; BRADAK, B.; HADMOKO, D. S.; WIBOWO, S. B.; DAIKAI, R.; YOSHIDA, M. Formation Processes of Gully-side Debris-Cones Determined from Ground-Penetrating S. Budi Radar (Mt. Unzen, Japan). **Journal of Applied Geophysics**, v. .209, 104919, 2023.
58. GRECO, M.; MARTINO, G.; MARCHESE, D.; ROMANIELLO, D. Monitoring of coastal erosion/ progradation phenomena via ground penetrating radar (GPR) 12th Plinius Conference on Mediterranean Storms, held September 1-4, 2010 in Corfu Island, Greece. <http://meetings.copernicus.org/plinius12>, id.75. 2010.
59. GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. C. O.; ALEXANDRE, S. T. Soil erosion and conservation in Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, UFRJ, v. 37, p. 81–91, 2014.
60. GUTIÉRREZ, Á. G.; SCHNABEL, S.; CONTADOR, F. L. Processes, factors, and consequences of gully erosion; investigations in the Iberian Peninsula. **Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles**, v. 55, p. 385–387, 2011.
61. HAGER, J.; CARNEVALE, M. The application of low frequency GPR to stratigraphic investigations [WWW Document]. **Hager Geosci. Inc**. URL http://www.hagergeoscience.com/pdf_files/MLF_paper.pdf.
62. HARARI, Z. Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. **Journal of Applied Geophysics**, v. 36, p. 43–52, 1996.
63. HARTWIG, M. E.; ALVES, J. P. I. Análise espaço-temporal de voçorocas e fatores ambientais controladores no município de Alegre (Estado do Espírito Santo, Sudeste do Brasil). **Geologia USP. Série Científica**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 29–42, 2022. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v22
64. HASUI, Y.; FACINCANI, E. M.; SANTOS, M.; JIMÉNES-RUEDA, J. R. Aspectos estruturais e neotectônicos na formação de boçorocas na região de São Pedro, SP. **Geociências**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 59–76, 1995.
65. HENRIKSEN, H. Fracture lineaments and their surroundings with respect to groundwater flow in the bedrock of Sunnfjord, Western Norway. **Norwegian Journal of Geology**, v. 86, p. 373–386, 2006.
66. HENRIKSEN, H.; BRAATHEN, A. Effects of fracture-lineaments and in situ rock stresses on groundwater flow in hard rocks: A case study from Sunnfjord, Western Norway. **Hydrogeology Journal**, v. 14, p. 444–461, 2006.
67. HOFFMAN, C. The archean peraluminous Gouveia granite, its structure, geochemistry and phase petrology (Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil). **Neues Jarb. für Mineral.**, v. 2, p. 359–371, 1983.
68. HOLDEN, J.; BURT, T. P.; VILAS, M. Application of ground-penetrating radar to the identification of subsurface piping in blanket peat. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 27, p. 235–249, 2002.

69. HUTCHINSON, D. E.; PRITCHARD, H. W. Resource conservation glossary. **J. Soil Water Conserv.**, v. 31, p. 1–63, 1976.
70. IRELAND, H. A.; SHARPE, C. F. S.; EARGLE, D. H. Principles of gully erosion in the Piedmont of South Carolina. **Technical Bulletin 663**. US Department of Agriculture, Washington D.C. 1939.
71. JAHANTIGH, M.; PESSARAKLI, M. Causes and effects of gully erosion on agricultural lands and the environment. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, v. 42, p. 2250–2255, 2011.
72. JONES, J. A. A. The effects of soil piping on contributing areas and erosion patterns. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 12, p. 229–248, 1987.
73. KAKEMBO, V.; XANGA, W. W.; ROWNTREE, K. Topographic thresholds in gully development on the hillslopes of communal areas in Ngqushwa local municipality, Eastern Cape, South Africa. **Geomorphology**, v. 110, p. 188–194, 2009.
74. KHALILI, J. A.; RACLOT, D.; HABAEIB, H.; LAMACHÈRE, J. M. Factors and processes of permanent gully evolution in a Mediterranean marly environment (Cape Bon, Tunisia). **Hidrol. Sci. J.**, v. 58, p. 1519–1531, 2013.
75. KNAUER, L. G.; GROSSI-SAD, J. H. Geologia da Folha Presidente Kubitschek. In: GROSSI-SAD, H.; LOBATO, L. M.; PEDROSA-SOARES, A. C. (eds.), **Projeto Espinhaço** CD-ROM (Textos, Maps e Anexos). COMIG, Belo Horizonte, p. 1901–2055. 1997.
76. KOPPENJAN, S.; STREETON, M.; LEE, H.; LEE, M.; ONO, S. Advanced Signal Analysis for Forensic Applications of Ground Penetrating Radar. In: 10th International Conference on Ground Penetrating Radar. 2004. Delft. **Proceedings of ...** Netherlands, 2004.
77. KULATILAKE, P. H. S. W.; PANDA, B. B. Effect of rock block and joint geometry on jointed rock hydraulics. **Rev. Asce. J. Eng. Mech.**, v. 126, n. 8, p. 850–858, 2000.
78. LACHASSAGNE, P.; DEWANDEL, B.; WYNS, R. Review: Hydrogeology of weathered crystalline/hard-rock aquifers—guidelines for the operational survey and management of their groundwater resources. **Hydrogeology Journal**, v. 29, p. 2561–2594, 2021.
79. LAL, R. Soil degradation by erosion. **L. Degrad. Dev.**, v. 12, p. 519–539, 2001.
80. LE ROUX, J. J.; SUMNER, P. D. Factors controlling gully development: comparing continuous and discontinuous gullies. **L. Degrad. Dev.**, v. 23, p. 440–449, 2012.
81. LIMA, A. P. M. **Distribuição espacial dos processos de voçorocamento no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul-RJ**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Departamento de Geografia e Meio Ambiente. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. RJ. 2019. 97p.
82. LUFFMAN, I. E.; NANDI, A.; SPIEGEL, T. Gully morphology, hillslope erosion, and precipitation characteristics in the Appalachian Valley and Ridge province, southeastern USA. **Catena**, v. 133, p. 221–232, 2015.
83. MACEDO, L. T. S.; MORAES Jr., J. L. S.; SANTOS, A. L.; FARIAS FILHO, M. S. Mapeamento de voçorocas e do risco de erosão em área urbana no oeste do estado do Maranhão. **Revista GeoUECE (Online)**, v. 8, n. 14, jan./jun. 2019. ISSN 2317-028X.
84. MARARAKANYE, N.; SUMNER, P. D. Gully erosion: a comparison of contributing factors in two catchments in South Africa. **Geomorphology**, v. 288, p. 99–110, 2017.
85. MARCAK, H.; GOŁĘBIEWSKI, T. Changes of GPR spectra due to the presence of hydrocarbon contamination in the ground. **Acta Geophys.**, v. 56, p. 485–504, 2008.
86. MARCHIORO, E. **Perda de solo por escoamento superficial difuso em vertente do córrego Quebra, no município de Gouveia - MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2002. 129p.
87. MARTINELLI, C. F.; BACELLAR, L. A. P. Analysis of the influence of gully erosion in the flow pattern of catchment streams, Southeastern Brazil. **Catena**, v. 69, p. 230–238, 2007.
88. MARTINS, B.; NUNES, A.; MEIRA-CASTRO, A.; LOURENÇO, L.; HERMENEGILDO, C. Local Factors Controlling Gully Development in a Mediterranean Environment. **Land**, 11, 204. 2022. <https://doi.org/10.3390/land11020204>.
89. MARTINS, R. M.; AMORIM, M. A. F.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; AZEVEDO, P. A. A. Relação entre forma da vertente, cobertura superficial e sítios geomorfológicos na bacia do ribeirão do Chiqueiro, Depressão de Gouveia, Serra do Espinhaço Meridional – MG. **Geonomos**, v. 21, n. 2, p. 38–45, 2013.
90. MIRANDA, R. B.; SCARPINELLA, G. D.; SILVA, R. S.; MAUAD, F. F. Water Erosion in Brazil and in the World: A Brief Review. **Mod. Environ. Sci. Eng.**, v. 1, p. 17–26, 2015.
91. NEVES, W. N.; MENEZES, E. P.; OLIVEIRA, F. S.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Estudo das coberturas superficiais na interface cerrado-vereda no Norte de Minas Gerais. **Rev. Bras. Geomorfologia**, v. 16, p. 351–367, 2015.
92. NICU, I. C. Is overgrazing really influencing soil erosion? **Water** 2018, 10(8), 1077; <https://doi.org/10.3390/w10081077>.
93. NOCE, C. M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; SILVA, L. C.; ARMSTRONG, R.; PIUZANA, D. Evolution of polycyclic basement complexes in the Araçuai Orogen, based on U-Pb SHRIMP data: Implications for Brazil-Africa links in Paleoproterozoic time. **Precambrian Res.**, v. 159, p. 60–78, 2007.

94. O'GEEN, A. T.; SCHWANKL, L. J. Understanding soil erosion in irrigated agriculture, **Publication 8196. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources**, Oakland. 2006.
95. OLIVEIRA, L. B. E. R.; ROSIÈRE, C. A.; ROLIM, V. K.; SANTOS, J. O. S. Novos dados geocronológicos U-Pb de zircões detríticos na Serra do Espinhaço Meridional, regiões de Altamira e Ipoema. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 38, n. 3, p. 611 - 637, 2019.
96. OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (orgs.) **Erosão e Conservação de Solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, Cap. 2, p. 57-94. 1999.
97. OPARAKU, A. L.; IWAR, T. R. Relationships between average gully depths and widths on geological sediments underlying the Idah-Ankpa Plateau of the North Central Nigeria L. **International Soil and Water Conservation Research**. v. 6, p. 43–50, 2018.
98. PFLUG, R. A. A geologia da parte meridional da serra do Espinhaço e zonas adjacentes. Rio de Janeiro; DNPM/DGM. **Boletim** 226. 1966. 51p.
99. PIERSON, T.C. Soil pipes and slope stability. **Q. J. Eng. Geol.**, v. 16, p. 1-11, 1983.
100. PIMENTEL, D. Soil erosion and the threat to food security and the environment. **Ecosyst. Heal.**, v. 6, p. 221–226, 2000.
101. PIMENTEL, D. Soil erosion: a food and environmental threat. **Environ. Dev. Sustain.**, v. 8, p. 119–137, 2006.
102. POESEN, J. W.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, p. 91–133, 2003.
103. PORTILHO, S. **Perda de solo por escoamento superficial e os padrões de infiltração e percolação da água no solo, microbacia do Córrego Quebra, Gouveia, Espinhaço Meridional, MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2003. 117p.
104. PORTO, P.; WALLING, D. E.; CAPRA, A. Using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb measurements and conventional surveys to investigate the relative contributions of interrill/rill and gully erosion to soil loss from a small, cultivated catchment in Sicily. **Soil Tillage Res.**, v. 135, p. 18–27, 2014.
105. RĂDOANE, M.; RĂDOANE, N. Gully Erosion. In: Landform Dynamics and Evolution in Romania, RĂDOANE; A. VESPREMEANU-STROE (eds.). Springer International Publishing Switzerland 2017. **Springer Geography**, Chapter 16. p. 371-397, 2017.
106. REZENDE, E. A. Estudo da influência da zona de cisalhamento de Três Corações na ocorrência de voçorocamentos. **Revista de Geografia**, Juiz de Fora, v. 11, n. 1, p. 2021.
107. ROBERTSON, G. P.; BROOME, J. C.; CHORNESKY, E. A.; FRANKENBERGER, J. R.; JOHNSON, P.; LIPSON, M.; MIRANOWSKI, J. A.; OWENS, E. D.; PIMENTEL, D.; THRUPP, L. A. Rethinking the vision for environmental research in US agriculture. **Bioscience**, v. 54, p. 61–65, 2004.
108. RÖMKENS, M. J. M. Estimating seepage and hydraulic potentials near incised ditches in homogeneous, isotropic aquifer. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 34, p. 1903–1914, 2009.
109. ROWNTREE, K. Debunking the myth of overgrazing and soil erosion. *Land Degradation & Development.*, v. 15, n. 3, p. 203–214. 2004.
110. SAMPAIO, L. F.; OLIVEIRA, M. P. P.; CASSARO, R.; RODRIGUES, V. G. S.; PEJON, O. J.; SÍGOLO, J. B.; FERREIRA, V. M. **Gully erosion, land uses, water and soil dynamics: A case study of Nazareno (Minas Gerais, Brazil)**. DYNA 83 (199), p. 198-206, December 2016. Medellín. Online DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n199.54843>.
111. SARTI, T. P. **Condicionantes litológicos e estruturais na evolução da rede de drenagem, Sapucaia-RJ, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geologia), Programa de Pós-graduação em Análise de bacias e faixas móveis, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2008. 91p.
112. SCHÖLL, W. U.; FOGAÇA, A. C. C. Estratigrafia da Serra do Espinhaço na região de Diamantina. In: I Simpósio de Geologia de Minas Gerais. Diamantina, MG, Brasil. **Anais... Boletim 1 – SBG-MG, Diamantina, MG**. p. 55–73, 1979.
113. SILVA, T. P.; SALGADO, C. M.; GONTIJO, A. H. F.; MOURA, J. R. S. A influência de aspectos geológicos na erosão linear - médio-baixo vale do Ribeirão do Secretário, Paty do Alferes (RJ). **Geosul**, Florianópolis, v. 18, n. 36, p. 131-150, jul./dez, 2003.
114. TAKAGAWA, T.; FUKASE, Y.; LIU, H.; SATO, S. Coastal erosion surfaces detected by ground penetrating radar and coring survey: a case study in coastal area around the Tenryu River mouth. In: Fourth International Conference on Scour and Erosion. **Proceedings of ...**, Tokyo, p. 336–339, 2008.
115. TEBEBU, T. Y.; ABIY, A. Z.; ZEGEYE, A. D.; DAHLKE, H. E.; EASTON, Z. M.; TILAHUN, S. A.; COLLICK, A. S.; KIDNAU, S.; MOGES, S.; DADGARI, F.; STEENHUIS, T. S. Surface and subsurface flow effect on permanent gully formation and upland erosion near Lake Tana in the northern highlands of Ethiopia. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 14, p. 2207–2217, 2010.
116. VALCÁRCCEL, M.; TABOADA, M. T.; PAZ, A.; DAFONTE, J. Ephemeral gully erosion in northwestern Spain. **Catena**, v. 50, p. 199–216, 2003.

117. VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, p. 132-153, 2005.
118. VAUGHAN, C. J. Ground-penetrating radar surveys used in archeological investigations. **Geophysics**, v. 51, p. 595–604, 1986.
119. VETTER, S.; BOND, W. J. Changing predictors of spatial and temporal variability in stocking rates in a severely degraded communal rangeland. **L. Degrad. Dev.**, v. 23, p. 190–199, 2012.
120. VIEIRA, A. F. G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e Impactos urbano-ambientais**. 2008. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2008. 310p.
121. WILLIAMS, L. J. Influence of foliation fracture systems on water availability in the Lawrenceville, Georgia area. **Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference**, April 23–24, 2003. Kathryn J. Hatcher, (ed.), Institute of Ecology, University of Georgia, Athens, Georgia. 2003.
122. WRIGHT, R. L. An examination of the value of site analysis in field studies in tropical Australia. **Zeitschrift der Geomorphologie**, v. 17, n. 1, p. 157-183, 1973.
123. YOUNG, A. **Slopes: Geomorphology Texts**. (1th ed). London: Longman. 1972. 320p.



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.