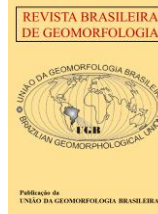


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 27, n° 2 (2026)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v27i2.2707>



Artigo de Pesquisa

Estimativa de perda de solo em voçorocas da bacia Colônia Antônio Aleixo, Manaus, Amazonas, Brasil

Soil Loss Estimation in Gullies of the Colônia Antônio Aleixo Basin, Manaus, Amazonas, Brazil

Armando Brito da Frota Filho¹, Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira² e Antonio Jose Teixeira Guerra³

¹ Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Geografia, Manaus, Brasil. E-mail. armando.filho@ufam.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6133-7788>

² Universidade Federal do Amazonas, Departamento de Geografia, Manaus, Brasil. E-mail. fabiovieira@ufam.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9416-8765>

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail. antoniotguerra@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2562-316X>

Recebido: 20/05/2026; Aceito: 09/06/2026; Publicado: 23/06/2026

Resumo: A ocorrência de voçorocas em áreas urbanas representa um desafio ao planejamento e à ocupação do solo, em função da intensidade com que esses processos evoluem e dos danos causados à infraestrutura e ao meio físico. Este estudo teve como objetivo monitorar quatro voçorocas localizadas na bacia hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, em Manaus (AM), com a finalidade de analisar suas características morfométricas e estimar as taxas de erosão associadas. Para isso, utilizaram-se registros cartográficos dos anos de 2006, 2012 e 2016, complementados por levantamentos realizados com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) em 2017 e 2020. As imagens geradas, com alta resolução espacial, permitiram detalhar as feições erosivas, enquanto os trabalhos de campo possibilitaram validar as informações obtidas. Os resultados indicam o alargamento das voçorocas e a redução de suas profundidades, sugerindo deposição interna de material. Também foi observada a coalescência de feições vizinhas, decorrente do recuo das bordas. O uso do VANT possibilitou identificar formas secundárias associadas ao retrabalhamento, como alcovas de regressão e caneluras. Conclui-se que a análise por perfis topográficos constitui uma ferramenta eficaz para compreender a morfologia e a dinâmica evolutiva de voçorocas em ambientes urbanos.

Palavras-chave: Perfil topográfico; monitoramento; bacia hidrográfica; VANT; erosão

Abstract: Gullies in urban environments pose challenges to urban land-use planning due to their rapid development and the impacts they cause on infrastructure and the physical environment. This study aimed to monitor four gullies located in the Colônia Antônio Aleixo watershed, in Manaus, Brazil, in order to analyze their morphometric characteristics and estimate associated erosion rates. The study was based on cartographic records from 2006, 2012, and 2016, complemented by Unmanned Aerial Vehicle (UAV) surveys conducted in 2017 and 2020. The high-resolution imagery provided detailed information on the erosive features, while fieldwork supported data validation. The results indicate widening of the gullies and reduction in their depth due to internal sediment deposition. Edge retreat also led to the coalescence of adjacent features. UAV monitoring made it possible to identify secondary landforms associated with reworking processes, such as headcut alcoves and small erosional channels. It is concluded that topographic profile analysis is an effective approach for understanding the morphology and evolutionary dynamics of gullies in urban environments.

Keywords: topographic profile; monitoring; watershed; UAV; erosion

1. Introdução

O monitoramento de voçorocas por meio de imagens de alta resolução espacial constitui uma ferramenta relevante para o estudo de processos erosivos e de suas dinâmicas, tanto em âmbito nacional quanto internacional. Essas imagens podem ser obtidas por satélites ou por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). Entre os trabalhos desenvolvidos sobre o tema, destacam-se os estudos de Shruthi et al. (2011) e Borrelli et al. (2022), que utilizaram imagens de alta resolução para monitoramento remoto, incluindo imagens do satélite Ikonos. Deve-se considerar a associação entre essas imagens e os trabalhos de campo, uma vez que as observações *in situ* são fundamentais para validar as informações obtidas remotamente e gerar produtos mais precisos e representativos das condições observadas em campo.

Em estudos realizados na África do Sul, Krenz et al. (2018; 2019) e Krenz e Kuhn (2018) utilizaram VANTs para a geração de Modelos Digitais do Terreno (MDT), estimativa de áreas vulneráveis a processos erosivos, monitoramento da erosão, quantificação de perdas de solo e identificação de áreas degradadas com precisão semelhante à do mapeamento convencional de campo. Os autores destacam que essa abordagem permite identificar, de forma rápida e prática, áreas severamente degradadas, além de favorecer avaliações em paisagens heterogêneas. Segundo Krenz et al. (2018; 2019) e Krenz e Kuhn (2018), o voo aéreo proporciona uma visão mais ampla da paisagem quando comparado à observação realizada em solo.

Loureiro (2019) e Loureiro et al. (2020) utilizaram essa ferramenta para o monitoramento e a caracterização de uma voçoroca localizada às margens da rodovia RJ-155, entre Angra dos Reis e Rio Claro. Os resultados indicaram que as imagens aéreas obtidas por VANT e os produtos derivados permitiram identificar caminhos preferenciais de escoamento e variações no acúmulo de material erodido pela voçoroca.

Na região metropolitana de Manaus, o uso de imagens produzidas por VANT foi aplicado pela primeira vez na caracterização e no monitoramento de voçorocas por Silva (2017). O principal objetivo do estudo foi avaliar as potencialidades dessa ferramenta no monitoramento de voçorocas em áreas de difícil acesso no Amazonas. A autora utilizou os produtos gerados pelo VANT para descrever, em detalhe, a ocorrência de feições de retrabalhamento, como alcovas e marmitas, em voçorocas localizadas na cidade de Manaus, especificamente no bairro Nova Cidade e nas margens das rodovias AM-010 e BR-174. A análise revelou que apenas as voçorocas situadas ao longo das rodovias apresentavam pedestais em seu interior, sugerindo a atuação de escoamento superficial difuso associado à ação de *splash*.

Na cidade de Rio Preto da Eva, pertencente à região metropolitana de Manaus, o uso de VANT foi aplicado no monitoramento de três voçorocas. O levantamento considerou aspectos morfométricos extraídos a partir do processamento das imagens e da geração de Modelos Digitais do Terreno (MDT), conforme metodologia descrita por Silva e Vieira (2020). A análise permitiu identificar as formas das incisões e seus respectivos tipos com base nos modelos de Oliveira (1989) e Vieira (2008). Também foram obtidas medidas de largura média, comprimento, área (m²) e volume erodido (m³). As três incisões analisadas foram responsáveis por mais de 123 mil m³ de solo erodido, pela inutilização de aproximadamente 6.120 m² de área e pela criação de zonas de risco no entorno de duas das feições monitoradas (Vieira et al., 2022).

Irlanduba, outro município pertencente à região metropolitana de Manaus, também empregou VANT no monitoramento de seis voçorocas ao longo de um ano, acompanhando sua evolução (Silva, 2020). Entre essas incisões, destacou-se uma feição que apresentou expansão em área e volume, resultando na perda de moradias e de estruturas urbanas, como ruas, canaletas e postes (Silva; Vieira, 2021).

Esses exemplos corroboram os resultados descritos por Santana (2019), que destaca o uso crescente dos VANTs em diferentes aplicações, incluindo o monitoramento ambiental. O VANT consolidou-se como um instrumento relevante, especialmente quando associado a softwares especializados para tratamento de imagens e geração de dados. Dessa forma, áreas de difícil acesso podem ser exploradas e analisadas com maior eficiência (Santana, 2019). Essa perspectiva está alinhada à discussão apresentada por Vieira e Frota Filho (2023) sobre o uso de VANTs no monitoramento de feições erosivas e sobre a necessidade de integração com outras técnicas para ampliar a acurácia das análises.

Diante desse contexto, destaca-se a importância do mapeamento detalhado de voçorocas, pois essa abordagem fornece dados sobre taxas de crescimento das incisões, volume erodido, identificação de áreas de risco e impactos *off-site*. O presente trabalho buscou caracterizar a evolução de quatro voçorocas quanto à morfometria e às feições de retrabalhamento, a partir do uso de VANT para monitoramento e cálculo de perda de solo.

2. Área de estudo

Esta pesquisa foi desenvolvida na bacia Colônia Antônio Aleixo (Figura 1), localizada na zona leste da área urbana de Manaus, com drenagem direta para o rio Amazonas. Em termos geológicos, a área situa-se sobre a Formação Alter do Chão, pertencente ao Mesozóico (Franzinelli; Piucci, 1988). A geomorfologia local integra o Planalto da Amazônia Oriental (Ross, 2000), caracterizado pela intensa atuação de processos erosivos (Vieira, 2008).

Na área da bacia, a altimetria do relevo não ultrapassa 120 metros, sendo classificada como interflúvio tabular que termina em encostas predominantemente convexas em sua porção basal (Vieira, 2008). O elevado número de feições erosivas relaciona-se à geomorfologia local, com destaque para a declividade, a forma convexa da porção inferior das encostas e o sistema de drenagem pluvial (Vieira, 2008). Predominam na área solos do tipo Latossolo, Argissolo e Espodossolo (Leal, 1996; Vieira, 1998, 2008; Barbosa, 2013; Frota Filho, 2016, 2021). No caso das voçorocas estudadas, o desenvolvimento ocorreu sobre Latossolos.

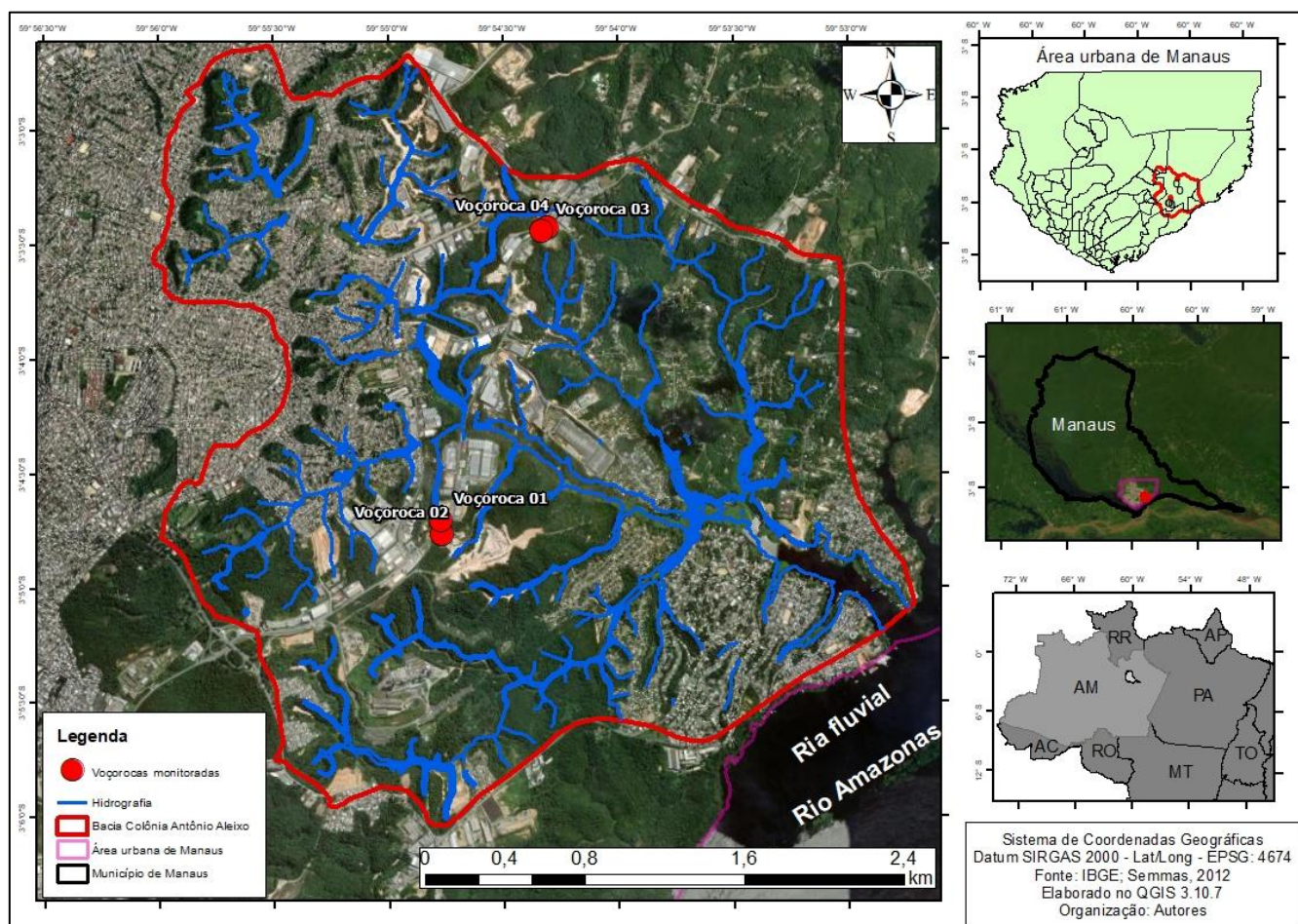


Figura 1. Localização das voçorocas monitoradas entre os anos de 2017 e 2020, na Bacia Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM, Brasil. Fonte de dados: IBGE, 2018 e ESRI. Arc Map v10.8. 2021 Org: Autores (2026).

O clima da região é do tipo equatorial quente úmido, com pluviometria média de 2339,3 mm no período de 1986 a 2015 (D'Ávila Junior; Vieira, 2019). A temperatura média para esse mesmo intervalo foi de 27,9 °C, variando entre 23,7 °C e 32,1 °C, correspondentes às médias mínimas e máximas, respectivamente (Santana, 2018). A hidrografia caracteriza-se pela presença de uma densa rede de canais em padrão arborescente (Frota Filho, 2016), conhecidos regionalmente como igarapés. A vegetação original é descrita como Floresta Ombrófila Densa (Vieira, 1998).

A bacia estudada concentra o maior número de voçorocas da área urbana de Manaus, apresentando 50 incisões em 2008 (Vieira, 2008), 38 em 2012 (Frota Filho, 2012), 22 em 2016 (Frota Filho, 2016) e 26 em 2021 (Frota Filho, 2021). A redução do número de voçorocas ocorreu principalmente em decorrência de medidas de contenção adotadas pelo poder público e de intervenções realizadas por moradores e pela sociedade civil, como o

aterramento das feições, que contribuíram para sua estabilização. Destaca-se a forte influência da urbanização como um dos principais fatores desencadeadores da erosão por voçorocas (Frota Filho, 2021).

3. Materiais e métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho, adotou-se o enfoque do monitoramento geomorfológico, que, segundo Crozier et al. (2010), permite observar quantitativa e qualitativamente as formas e mudanças ocorridas na paisagem. Para isso, podem ser empregadas diferentes técnicas e materiais, desde trenas, bússolas e teodolitos até imagens de satélite e, mais recentemente, imagens geradas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs).

Este estudo baseia-se nos resultados de mapeamentos e monitoramentos de voçorocas realizados na cidade de Manaus em três momentos distintos: 2006, 2012 e 2021 (Vieira, 2008; Frota Filho, 2012; 2021). A presente pesquisa incorpora aos resultados desses estudos o monitoramento realizado com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) pertencente ao Laboratório de Análise e Tratamento de Sedimentos e Solos (LATOSSOLO/DEGEOG/UFAM). A aferição dos resultados ocorreu por meio de trabalhos de campo, com o objetivo de confirmar a localização e a morfometria dos sítios monitorados.

Durante as atividades de campo, verificou-se a presença de feições de retrabalhamento, como alcovas de regressão, marmitas torrenciais e pedestais. A Tabela 1 sintetiza a localização e as características morfométricas das encostas afetadas pelas voçorocas estudadas.

Tabela 1. Características dos locais em que as voçorocas monitoradas se encontram.

Voc	Coordenadas	Declividade da encosta Grau (°)	Declividade da encosta (%)	Forma da encosta
1	S 03° 4'41.85" O 59°54'46.45"	19,67°	31,91	Convexa Divergente
2	S 03° 4'46.28" O 59°54'49.13"	24,11°	39,79	Retilínea Divergente
3	S 03° 3'25.64" O 59°54'19.78"	18,36°	26,66	Convexa Convergente
4	S 03° 3'24.66" O 59°54'18.20"	26,19°	43,62	Convexa Divergente

Org: Autores (2026).

Somente quatro das vinte e seis voçorocas ainda presentes na bacia Colônia Antônio Aleixo foram monitoradas neste trabalho (Figura 1). Essas feições localizam-se no bairro Distrito Industrial II e foram selecionadas por apresentarem maior extensão linear, profundidade e volume, além de figurarem entre as mais ativas e responsáveis pelos impactos mais significativos sobre a rede de drenagem urbana. A seleção considerou levantamentos de campo, registros cartográficos preliminares, inventários e monitoramentos anteriores (Vieira, 2008; Frota Filho, 2016; 2021), além de critérios de acessibilidade.

O monitoramento das voçorocas foi realizado com VANT modelo Phantom 4, por meio de voos executados em 10 de setembro de 2017 e 07 de janeiro de 2020. O planejamento e a execução dos voos foram realizados no software Pix4D para o VANT modelo Phantom 4 (Figura 2).

O equipamento foi configurado com sobreposição lateral e longitudinal de 75%, utilizando câmera com resolução 4K inclinada a 70°. O plano de voo foi definido no modo Grid Mission, a uma altura de 60 metros em relação à superfície. Essa configuração possibilitou resolução espacial de 10 cm/pixel, com *Ground Sample Distance* (GSD) planejado de 2,79 cm/pixel, garantindo cobertura adequada e elevada qualidade das imagens obtidas.

Conforme Sousa (2018), o VANT utilizado apresentou Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error* – RMSE) total de 9,81 m e Erro Circular (*Circular Map Accuracy Standard* – CMAS) total de 21,04 m. A análise da exatidão cartográfica indicou que a ortoimagem produzida pelo VANT, sem pontos de controle, possui qualidade geométrica compatível com produtos cartográficos de precisão PEC Classe B na escala 1:10.000 e PEC Classe A na escala 1:25.000, conforme Sousa (2018). Esses valores foram utilizados como referência para avaliar a confiabilidade dos modelos e das análises morfométricas.



Figura 2. Veículo Aéreo Não Tripulado – VANT modelo Phantom 4. Fonte: Autores (2026). Fotografia tirada em 05/02/2024.

O processamento das imagens obtidas durante o sobrevoo foi realizado no software Agisoft Metashape, utilizando as informações de altitude geométrica e localização (GPS) registradas em cada fotografia. A partir desses dados, foi gerada a nuvem densa de pontos e aplicada a texturização do modelo. Na etapa seguinte, foram produzidos o modelo digital do terreno, os ortomosaicos e o modelo tridimensional. Esses produtos foram posteriormente analisados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando o programa QGIS. Com base no tratamento realizado nesse ambiente, foi possível extrair produtos como o Modelo Digital do Terreno (MDT), curvas de nível e ortofotos (Figura 3), que serviram de base para a delimitação da voçoroca. Essa etapa foi feita manualmente, a partir das bordas iniciais das feições erosivas, e resultou na criação de arquivos shapefile (.shp) com polígonos representando cada incisão.

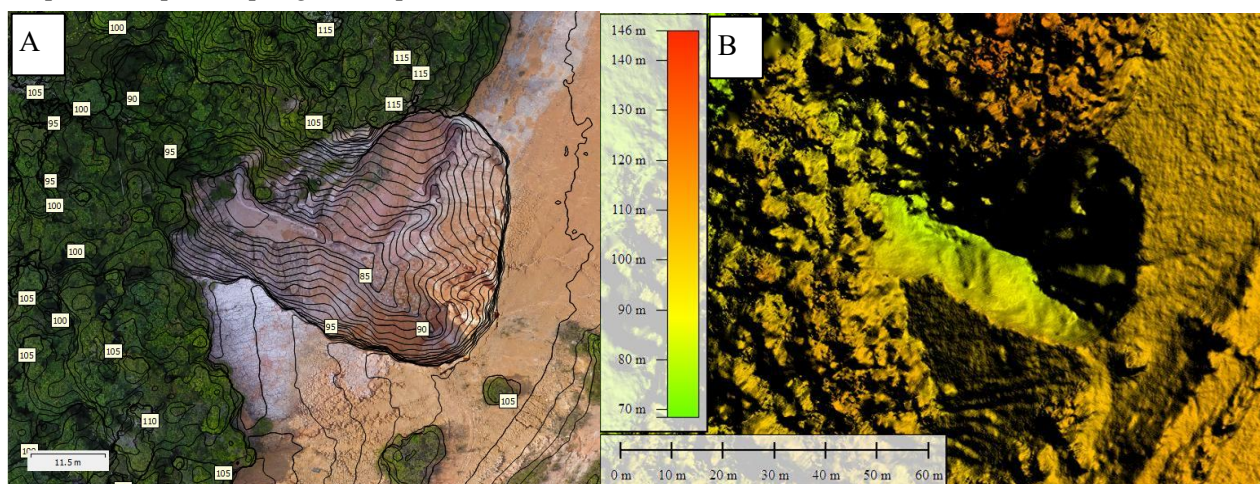


Figura 3. Delimitação da voçoroca 1 (A) e Modelo Digital do Terreno (MDT) (B) a partir das curvas de nível (A). Org.: Autores (2026).

A metodologia adotada incluiu a aplicação da aerofotogrametria digital baseada no princípio do *Structure from Motion* com *Multi View Stereo* (SfM-MVS), técnica que permite gerar modelos tridimensionais a partir da sobreposição de imagens captadas em diferentes ângulos. Esse método possibilita a construção de nuvens densas de pontos e superfícies com alta resolução, mesmo na ausência de pontos de controle em campo. Em estudos com VANT, essa abordagem tem demonstrado eficiência na modelagem do relevo e na análise morfométrica de feições erosivas, principalmente em áreas de difícil acesso (Bitencourt *et al.*, 2021).

Em seguida, foram realizados os cálculos dos parâmetros métricos, incluindo comprimento, largura média, profundidade média, área e volume, além do traçado dos perfis transversais e longitudinais das incisões em ambiente SIG. A partir das imagens geradas no software Agisoft Metashape, foi possível obter os valores de comprimento, largura média e profundidade média, permitindo calcular a área erodida (comprimento $\times$ largura), o volume erodido (área $\times$ profundidade) e a perda de solo em toneladas (volume $\times$ densidade do solo).

A repetição dos monitoramentos possibilitou calcular a área e o volume erodidos entre os períodos analisados, expressos em m^2 e m^3 , respectivamente. Também permitiu avaliar o crescimento ou a redução das feições entre os anos monitorados e estimar as taxas de expansão linear de cada incisão em termos de média anual (m/ano).

Além disso, foram avaliadas mudanças na morfologia das voçorocas quanto ao “Tipo”, conforme o modelo de Oliveira (1989) (Figura 4), à “Forma”, segundo Vieira (2008) (Figura 5), e ao tamanho, com base na classificação proposta por Vieira e Albuquerque (2004) (Tabela 2).

Tabela 2. Classificação das voçorocas por tamanho (m^3).

Ord.	Volume erodido	Tamanho
01	Até 999 m^3	Muito pequena
02	De 1.000 m^3 até 9.999 m^3	Pequena
03	Entre 10.000 e 19.999 m^3	Média
04	Entre 20.000 e 40.000 m^3	Grande
05	Mais de 40.000 m^3	Muito grande

Fonte: Vieira; Albuquerque (2004).

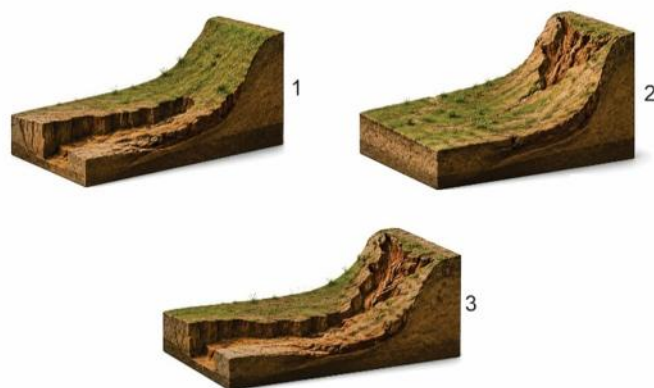


Figura 4. Tipos de voçorocas: Tipo 1 - voçoroca conectada; Tipo 2 - voçoroca desconectada; Tipo 3 - integração dos dois tipos de voçorocas. Fonte: Oliveira (1989).

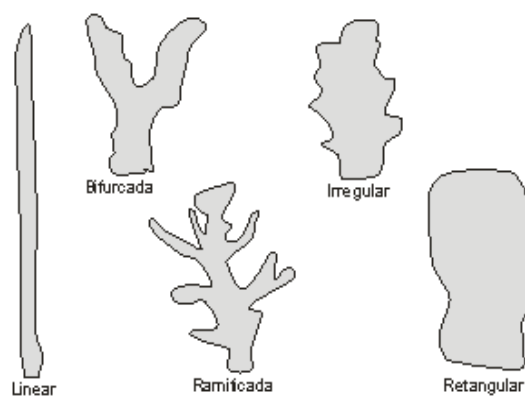


Figura 5. Formas de voçorocas (Vieira, 2008).

4. Resultados

A intensificação das dinâmicas hidrogeomorfológicas foi ampliada pelos processos de urbanização na área. Assim, os monitoramentos buscaram caracterizar a evolução das voçorocas quanto à morfometria e às feições de retrabalhamento, além de calcular a perda de solo das incisões estudadas, permitindo determinar o porte dessas feições erosivas.

4.1. Morfometria das incisões: taxas e direção de crescimento

Os monitoramentos realizados em 2017 e 2020 (Figura 6) permitiram analisar a forma e a expansão da voçoroca 01. A observação dos perfis transversais (AB, CD e EF) evidenciou o formato em U, característico desse tipo de feição erosiva (Figura 6).

Em termos morfológicos, a evolução do perfil AB entre 2017 e 2020 foi a que apresentou maior expansão lateral. Esse comportamento pode ser atribuído à ampla área de contribuição da incisão, correspondente à captação de águas pluviais, associada a uma superfície pedológica mais friável. Destaca-se que a análise do solo não constituiu objetivo deste artigo, sendo resultante de outra pesquisa desenvolvida na mesma área (FROTA FILHO, 2021). Nessa investigação, o solo foi classificado como de textura franco-arenosa, apresentando 71,03% de areia, 22,46% de silte e 6,51% de argila. Essas características texturais contribuíram para a maior erodibilidade do material.

No período entre 2017 e 2020, verificaram-se alterações na configuração interna da incisão por meio da análise de Modelos Digitais do Terreno e imagens aéreas. Observou-se a movimentação de pacotes sedimentares entre os monitoramentos, identificada pela disposição das curvas de nível em cada período analisado (Figura 7).

A análise integrada das figuras e dos dados métricos geoprocessados permitiu quantificar as alterações ocorridas entre os monitoramentos, identificando redução de 0,03 m na profundidade da voçoroca. Essa diminuição resultou do acúmulo de sedimentos alúvio-coluvionares no interior da incisão (Tabela 3). O perfil longitudinal apresentou expansão de 2,24 m nesse intervalo. Entre os perfis transversais analisados, o perfil AB registrou o maior aumento, com 2,23 m, enquanto o perfil CD apresentou crescimento de 0,20 m.

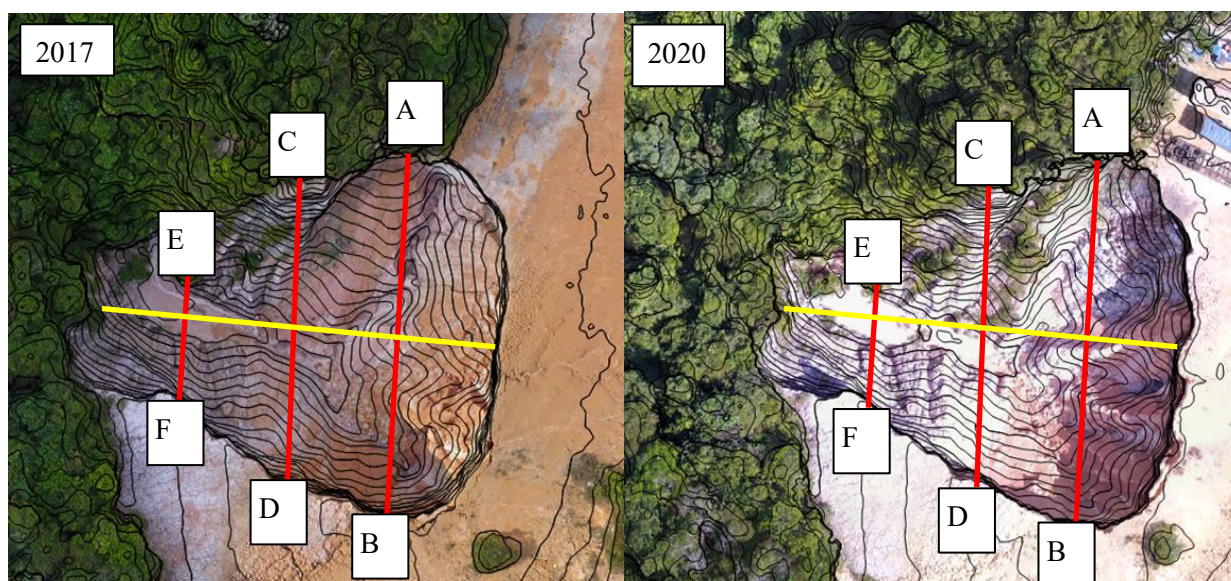


Figura 6. Voçoroca 01 nos monitoramentos de 2017 e 2020, com imagens ortorretificadas, curvas de nível com equidistância de 5 metros, escala de 1:1.000, traçados dos perfis transversais (AB, CD e EF, em vermelho) e do perfil longitudinal (em amarelo). Org.: Autores (2026).

Tabela 3. Síntese dos parâmetros analisados nos monitoramentos referente a voçoroca 01.

Voçoroca 01			
Parâmetros	2017	2020	Alterações
Perfil Transversal AB (m)	39,75	41,98	+2,23*
Perfil Transversal CD (m)	32,74	32,94	+0,20*
Perfil Transversal EF (m)	24,42	24,81	+0,39*
Média dos perfis (m)	32,30	33,24	+0,94*
Perfil longitudinal (m)	52,19	54,42	+2,24*
Profundidade (m)	21,92	21,89	-0,03**
Área (m²)	1 685,85	1 809,06	+123,21*
Volume (m³)	36 960,60	39 596,77	+2 636,16*

* Aumento e ** Diminuição entre os monitoramentos. Org.: Autores (2026).

O perfil longitudinal apresentou alterações entre os monitoramentos, com acúmulo de sedimentos a jusante da incisão em 2020. Essa interpretação é corroborada pelo perfil transversal EF, no qual se observa a disposição desses materiais sedimentares. Esse processo também explica a redução da profundidade da voçoroca, possivelmente relacionada à erosão da borda F e à consequente deposição de sedimentos no fundo da incisão.

No que se refere ao perfil transversal AB, verificou-se a maior taxa de crescimento em largura, com expansão de 2,23 m. Também foi observado aumento da profundidade nesse setor. No perfil CD, a largura manteve-se relativamente estável, apresentando incremento de apenas 0,20 m, acompanhado de discreto aumento da profundidade nesse trecho.

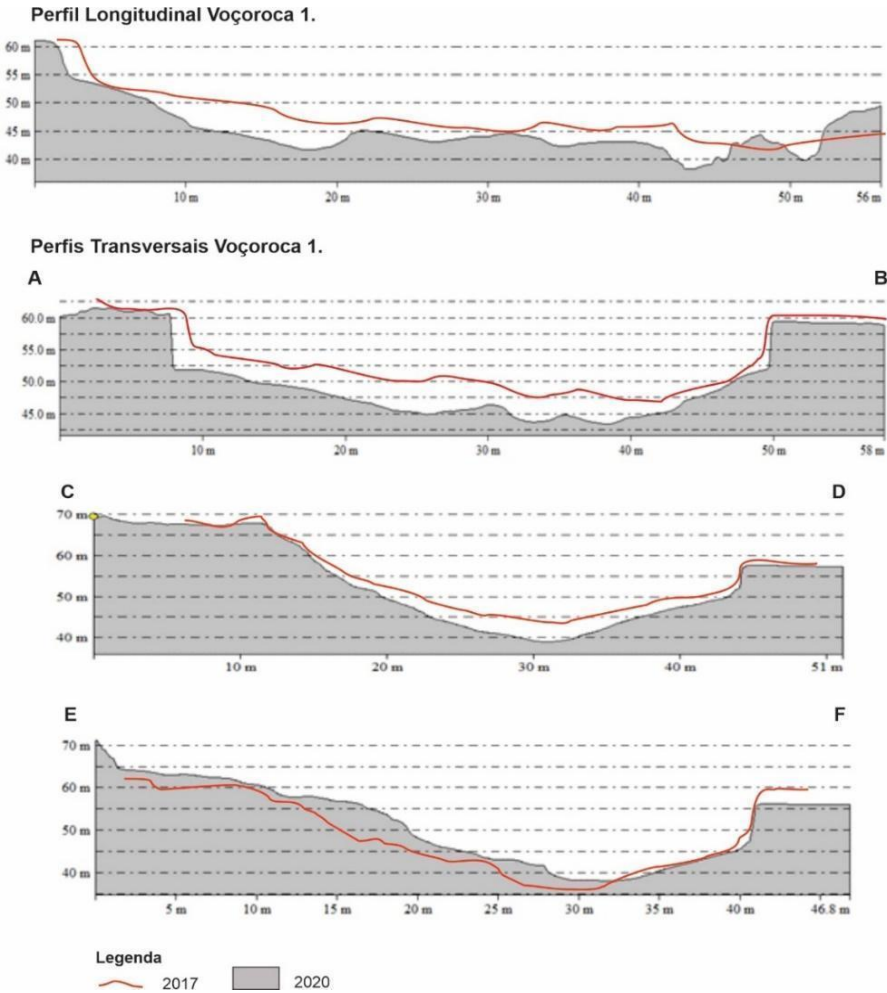


Figura 7. Perfis longitudinal e transversais (AB, CD e EF) da voçoroca 01, obtidos nos monitoramentos de 2017 e 2020. Fonte: Autores (2026).

A voçoroca 02 manteve-se classificada como conectada à rede hidrográfica, apresentando forma linear (Figura 8). Em relação ao volume erodido, foi estimada a remoção de 42.173,50 m³ de material, classificando a incisão como “muito grande”.

Na Tabela 4, observa-se a síntese dos dados obtidos nos monitoramentos, evidenciando o crescimento da voçoroca em largura e comprimento. Essas alterações também foram confirmadas pelos perfis transversais apresentados na Figura 9.

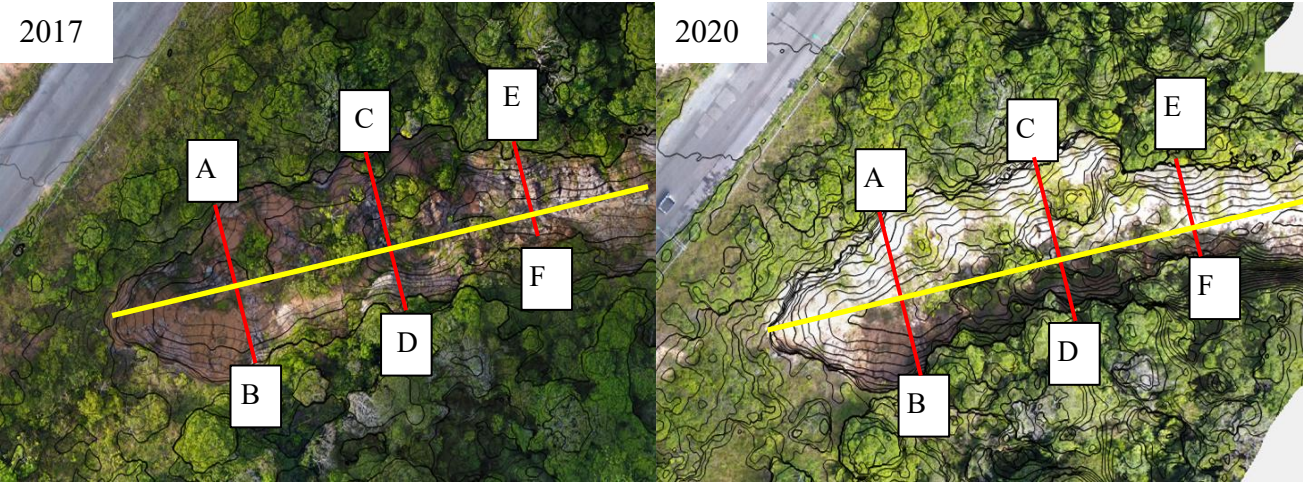


Figura 8. Voçoroca 02 nos monitoramentos de 2017 e 2020, com imagens ortorretificadas, curvas de nível com equidistância de 5 metros, escala de 1:1000, traçados dos perfis transversais (AB, CD e EF, em vermelho) e perfil longitudinal (em amarelo). Org.: Autores (2026).

Tabela 4. Síntese dos parâmetros analisados nos monitoramentos referentes à voçoroca 02.

Voçoroca 02			
Parâmetros	2017	2020	Alterações
Perfil Transversal AB (m)	23,38	22,49	+0,10*
Perfil Transversal CD (m)	21,73	21,92	+0,18*
Perfil Transversal EF (m)	21,62	24,24	+2,62*
Média dos perfis (m)	22,24	22,88	+0,64*
Perfil longitudinal (m)	84,04	84,59	+0,54*
Profundidade (m)	21,89	26,79	+4,90*
Área (m ²)	1 869,44	1 926,87	+57,44*
Volume (m ³)	40 921,95	51 622,89	+10 700,94

* Aumento e ** Diminuição entre os monitoramentos. Org.: Autores (2026).

Dentre os perfis analisados, observou-se maior evolução no perfil EF, com aumento de 2,62 m no período monitorado entre 2017 e 2020. Esse comportamento indica maior atividade erosiva nesse setor da incisão (Figura 9), onde a dinâmica erosiva favorece a formação de sulcos que contribuem para o desmoronamento das bordas, com possível ocorrência de queda em bloco das paredes da voçoroca. Esse processo pode explicar o aumento da largura nesse trecho (Figura 9, perfil EF).

A dinâmica observada também contribuiu para o aprofundamento da incisão, que atingiu 4,90 m, resultando em aumento do volume erodido, de 40.921,95 m³ em 2017 para 51.622,89 m³ em 2020 (Tabela 4). Esse comportamento relaciona-se à remoção do material anteriormente depositado no interior da voçoroca, conforme evidenciado pela evolução dos perfis longitudinal e transversais.

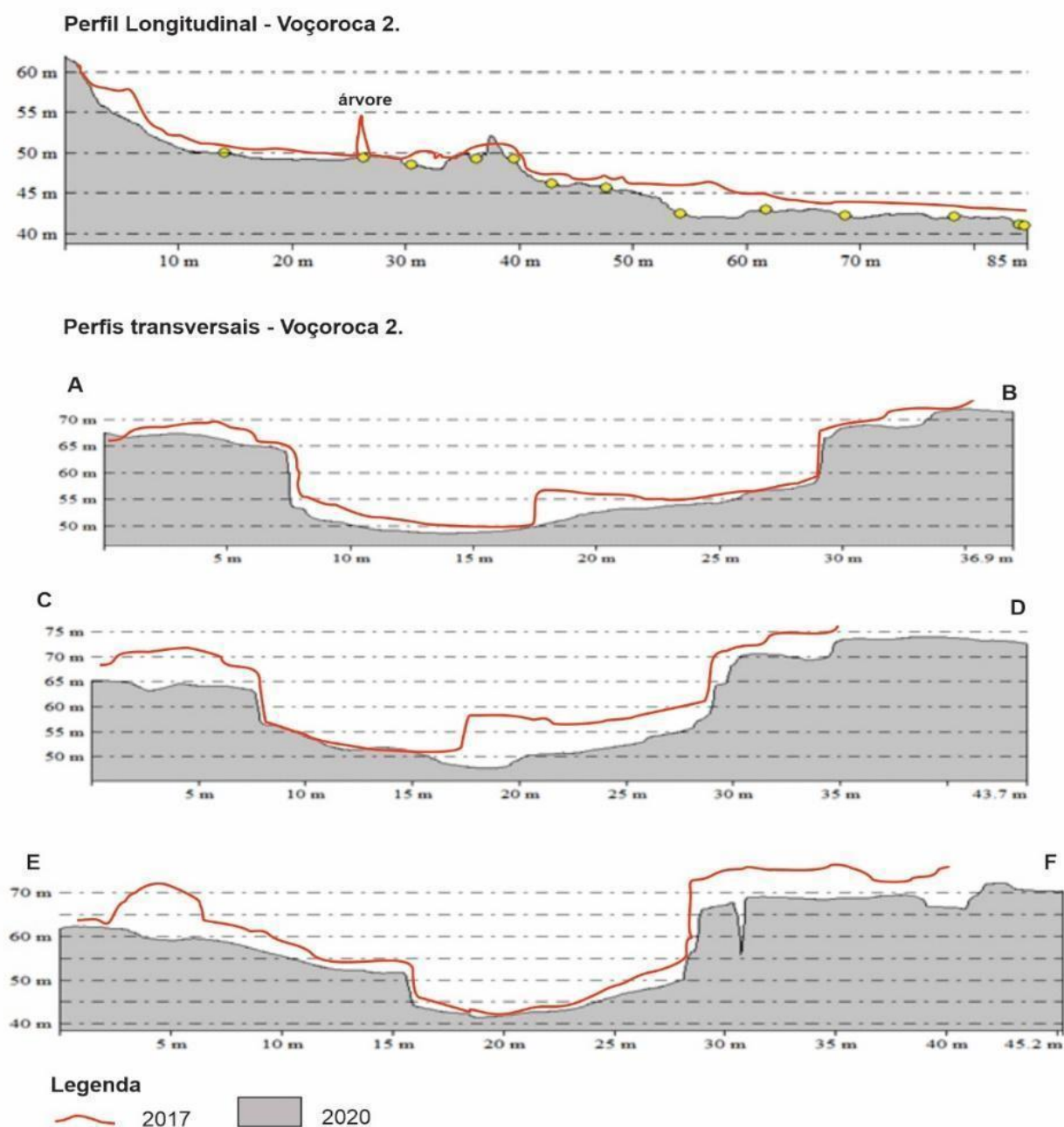


Figura 9. Perfis longitudinal e transversais (AB, CD e EF) da voçoroca 02 nos anos de 2017 e 2020. Fonte: Autores (2026).

Observa-se crescimento reduzido nos perfis transversais AB e CD, com aumentos de 0,10 m e 0,18 m, respectivamente, quando comparados ao perfil EF, que apresentou expansão de 2,62 m (Tabela 4). Esse comportamento indica diminuição da área de contribuição em decorrência do crescimento longitudinal em direção ao interflúvio, reduzindo os fluxos responsáveis pelo transporte de sedimentos. Consequentemente, ocorre diminuição da capacidade de transporte associada à redução da declividade e, por consequência, da energia cinética e do potencial de arrasto.

À medida que a incisão avança em direção ao interflúvio, há redução da área de contribuição. Isso implica diminuição proporcional dos fluxos concentrados, refletindo diretamente na energia cinética e no potencial erosivo, o que reduz a velocidade de expansão linear da voçoroca, caracterizada pelo crescimento remontante. Dessa forma, como a cabeceira dessa feição erosiva progride em direção ao interflúvio, ocorre menor acúmulo de água direcionado para a incisão, favorecendo sua estabilização.

Essa relativa estabilidade possibilitou o crescimento de espécies vegetais no interior da voçoroca (Figura 6), comportamento também observado na dinâmica de crescimento registrada nos perfis transversais AB e CD

(Figura 9). A comparação entre os perfis longitudinais dos dois anos (Figura 9) evidencia redução do volume de material depositado no interior da incisão. O modelo digital de elevação referente ao ano de 2020 apresenta, próximo à cabeceira, um fundo mais irregular em relação ao monitoramento anterior, aspecto corroborado pelos perfis transversais mais aprofundados.

Quanto às voçorocas 3 e 4, inicialmente essa encosta apresentava um sistema composto por quatro voçorocas (Figura 10), que passaram por processos de evolução e captura, resultando na eliminação de uma das feições devido à união entre as voçorocas 4 e 5.



Figura 10. Evolução de voçorocas no bairro Distrito Industrial II, na bacia Colônia Antônio Aleixo. Fonte: Autores, 2013 e ©Google Earth, 2005. Org: Autores (2026).

Além dessas feições, destaca-se a voçoroca 6, que não integrou este monitoramento por ter passado por mudanças morfológicas associadas à perda de características típicas de voçorocas, como fundo plano e paredes verticais, dando lugar à formação de terraços em seu interior.

Diante desse contexto, as voçorocas 03 e 04, objeto deste estudo, apresentam as mesmas características morfológicas, sendo classificadas como “integradas”, “retangulares” e “muito grandes” (Figura 11).

A voçoroca 03 apresentou crescimento em comprimento e largura, enquanto a voçoroca 04 registrou redução de área e volume (Tabela 5). Essa diminuição ocorreu em decorrência do desmoronamento de uma porção da parede da incisão, provocando a perda parcial de características morfológicas típicas de voçorocas, como as paredes verticais. Consequentemente, houve redução do comprimento, refletindo diretamente na área e no volume erodidos. Essa dinâmica relaciona-se ao fato de as incisões dessa encosta apresentarem a mesma fonte de erosão, representada pelas águas pluviais concentradas por canaletas, favorecendo sua integração ao longo do tempo.

Em relação à voçoroca 03, observou-se evolução dos perfis transversais AB e CD, com expansões de 2,62 m e 3,74 m, respectivamente. No perfil EF, verificou-se maior evolução lateral, com aumento de 10,9 m no período monitorado entre 2017 e 2020, acompanhado pelo nivelamento dos setores a jusante, conforme sugerem as imagens da Figura 8. Esse comportamento indica maior atividade erosiva nesse setor da incisão (Figuras 12 e 13), associada à erosão das paredes verticais.

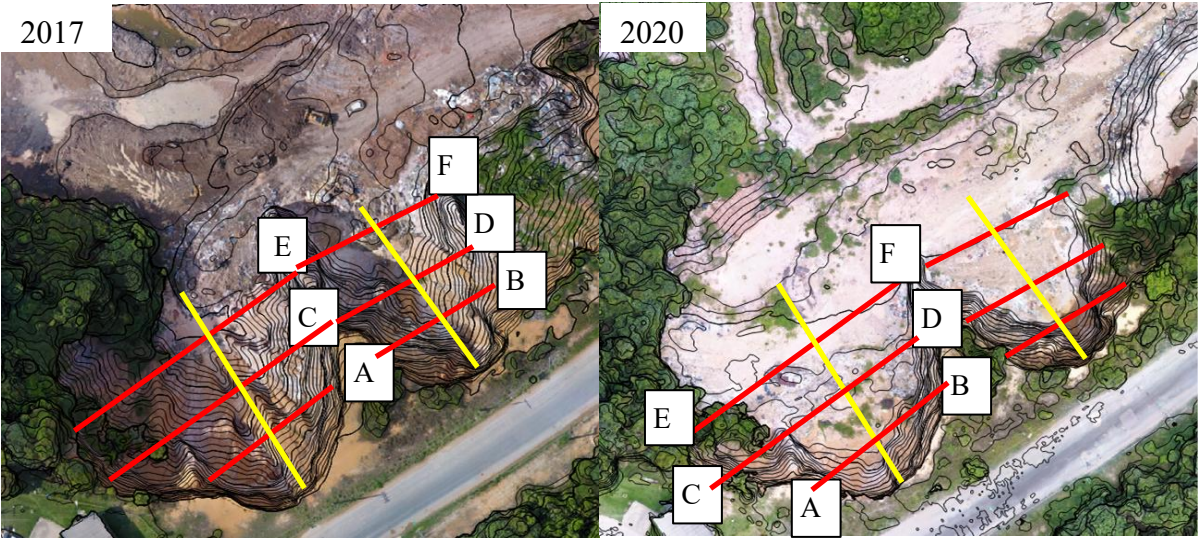


Figura 11. Voçorocas 03 e 04 nos monitoramentos de 2017 e 2020, com imagens ortorretificadas, curvas de nível com equidistância de 5 metros, escala de 1:1000, traçados dos perfis transversais (AB, CD e EF, em vermelho) e perfil longitudinal (em amarelo). Org.: Autores (2026).

Tabela 5. Síntese dos parâmetros analisados nos monitoramentos referentes às voçorocas 03 e 04.

Parâmetros	Voçoroca 03			Voçoroca 04		
	2017	2020	Alterações	2017	2020	Alterações
Perfil Transversal AB (m)	54,13	56,75	+2,62*	31,57	33,60	+2,03*
Perfil Transversal CD (m)	53,01	56,75	+3,74*	33,59	34,50	+0,91*
Perfil Transversal EF (m)	44,92	55,81	+10,90*	30,53	0,00***	-30,53**
Média dos perfis (m)	50,69	56,44	+5,75*	31,90	22,70	-9,20**
Perfil longitudinal (m)	61,61	61,72	+0,11*	47,63	33,40	-14,23**
Profundidade (m)	34,69	26,62	-8,07**	32,80	25,77	-7,03**
Área (m²)	3 122,67	3 483,38	360,71*	1 519,32	758,20	-761,12**
Volume (m³)	108 322,39	92 713,75	-15 608,65**	49 833,64	19 536,60	-30 297,04**

* Aumento e **Diminuição entre os monitoramentos. ***Perda da parede da voçoroca. Org.: Autores (2026).

A mesma dinâmica de maior atividade erosiva foi observada nos perfis AB e CD em relação à profundidade, resultando no aplainamento da incisão, conforme sugerem os conceitos clássicos associados à morfologia de voçorocas de fundo plano. Em decorrência desse processo, houve deposição de material no interior da incisão, contribuindo para a diminuição da profundidade e refletindo na redução do volume erodido entre os monitoramentos. A comparação entre os perfis dos anos analisados indica acréscimo superior a 5 m de material depositado (Figura 12).

Do ponto de vista longitudinal, verificou-se crescimento praticamente nulo no período, correspondente a 0,11 m. Assim como observado na voçoroca 02, essa feição apresenta menor área de contribuição, uma vez que se encontra próxima ao interflúvio e sua principal fonte de fluxo concentrado corresponde às águas servidas provenientes de montante, ao longo da via de acesso.

Os perfis transversais evidenciam crescimento lateral e aprofundamento da incisão. Entretanto, o perfil longitudinal apresenta, em determinados setores, acúmulo de material sedimentar (Figura 10), implicando redução do volume erodido entre 2017 e 2020, de 108.322,39 m³ para 92.713,75 m³. Dessa forma, estima-se retenção de 15.608,65 m³ de material no interior da incisão (Tabela 5).

Destaca-se que a área de contribuição permaneceu praticamente inalterada, considerando que o crescimento longitudinal da voçoroca avançou apenas 0,11 m em direção ao interflúvio. A proximidade entre a cabeceira da voçoroca e o interflúvio indica baixa área de contribuição para geração de fluxos direcionados ao interior da

incisão, sugerindo relativa estabilidade dessa feição nesse setor. Em contraste com a cabeceira, o crescimento lateral mostrou-se mais expressivo nos perfis transversais AB, CD e EF, com expansões de 2,62 m, 3,74 m e 10,9 m, respectivamente, conforme Tabela 5 e Figura 12.

A análise integrada da evolução dos perfis transversais e longitudinal evidencia movimentação de sedimentos no interior da voçoroca, comprovada pela redução da profundidade nos setores AB, CD e EF, sendo este último afetado em menor intensidade. Na porção média do eixo central do perfil longitudinal ocorre acúmulo sedimentar, formando depósito com aproximadamente 5 metros de espessura (Figura 12, perfil longitudinal).

No que se refere à área da incisão, observou-se aumento de 3.122,67 m² para 3.483,38 m², correspondendo a acréscimo de 360,71 m². Parte do material erodido das paredes permaneceu parcialmente depositado no interior da voçoroca, provocando diminuição da profundidade e, conseqüentemente, redução do volume erodido na porção média do eixo central (Figura 12, perfil longitudinal; Tabela 5).

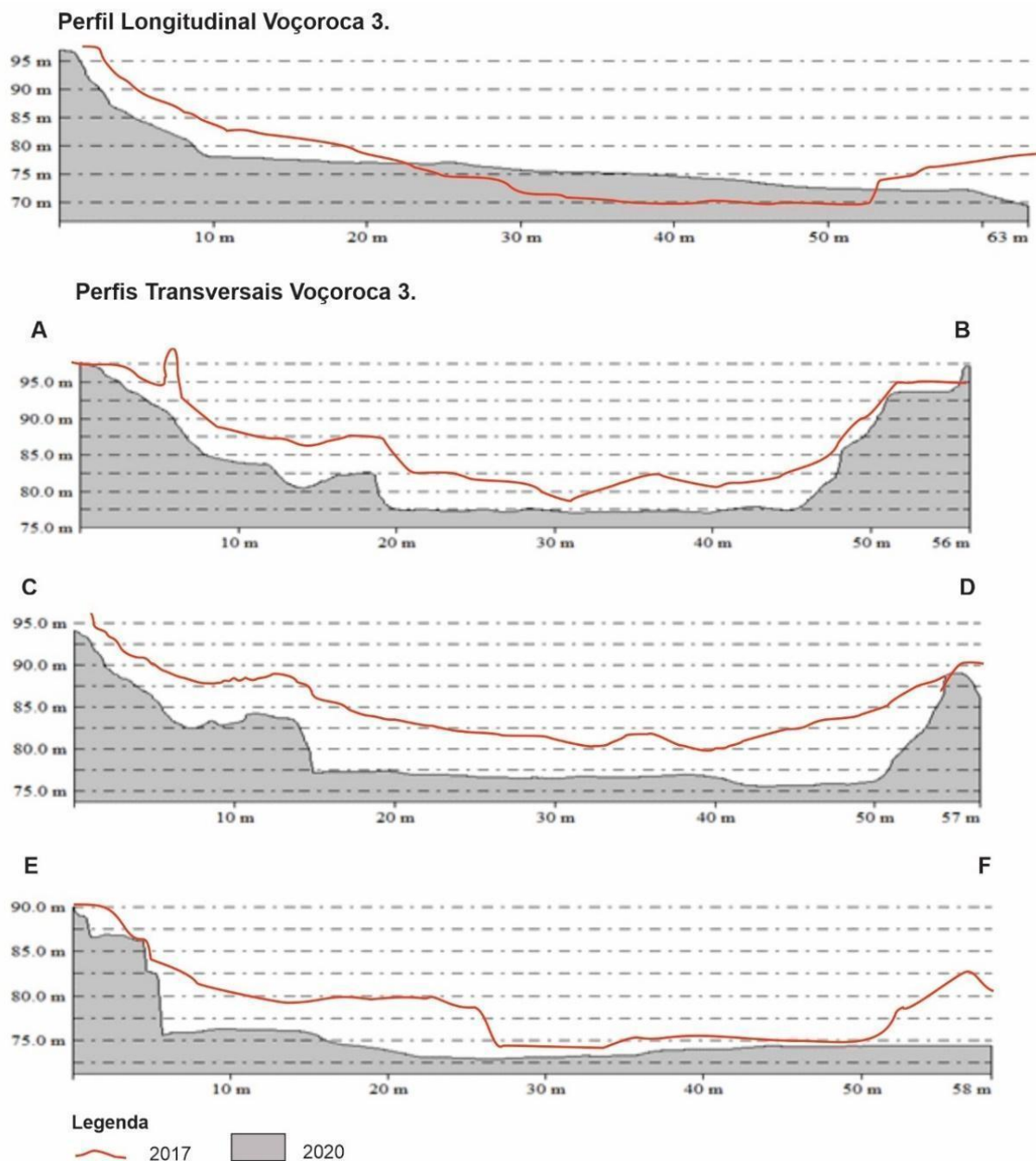


Figura 12. Perfis longitudinal e transversais (AB, CD e EF) da voçoroca 03, obtidos nos monitoramentos de 2017 e 2020. Fonte: Autores (2026).

A voçoroca 04 (Figura 13) apresentou redução de área e volume em decorrência da perda das paredes da incisão em sua seção final (Figura 11, perfil transversal EF), conforme apresentado na Tabela 5. Essa alteração resultou na diminuição do comprimento da feição, de 47,63 m para 33,40 m, impactando diretamente os valores de área, que passaram de 1.519,32 m² para 758,20 m², e de volume, reduzido de 49.833,64 m³ para 19.536,6 m³.

Por outro lado, os perfis transversais AB e CD registraram aumento de largura de 2,03 m e 0,91 m, respectivamente. A dinâmica interna da feição erosiva mostrou-se intensa, com remoção significativa dos depósitos alúvio-coluvionares presentes em seu interior (Figuras 11 e 13), resultando em aumento da profundidade. O material presente nos perfis AB e CD foi transportado para jusante (Figura 11, perfil longitudinal).

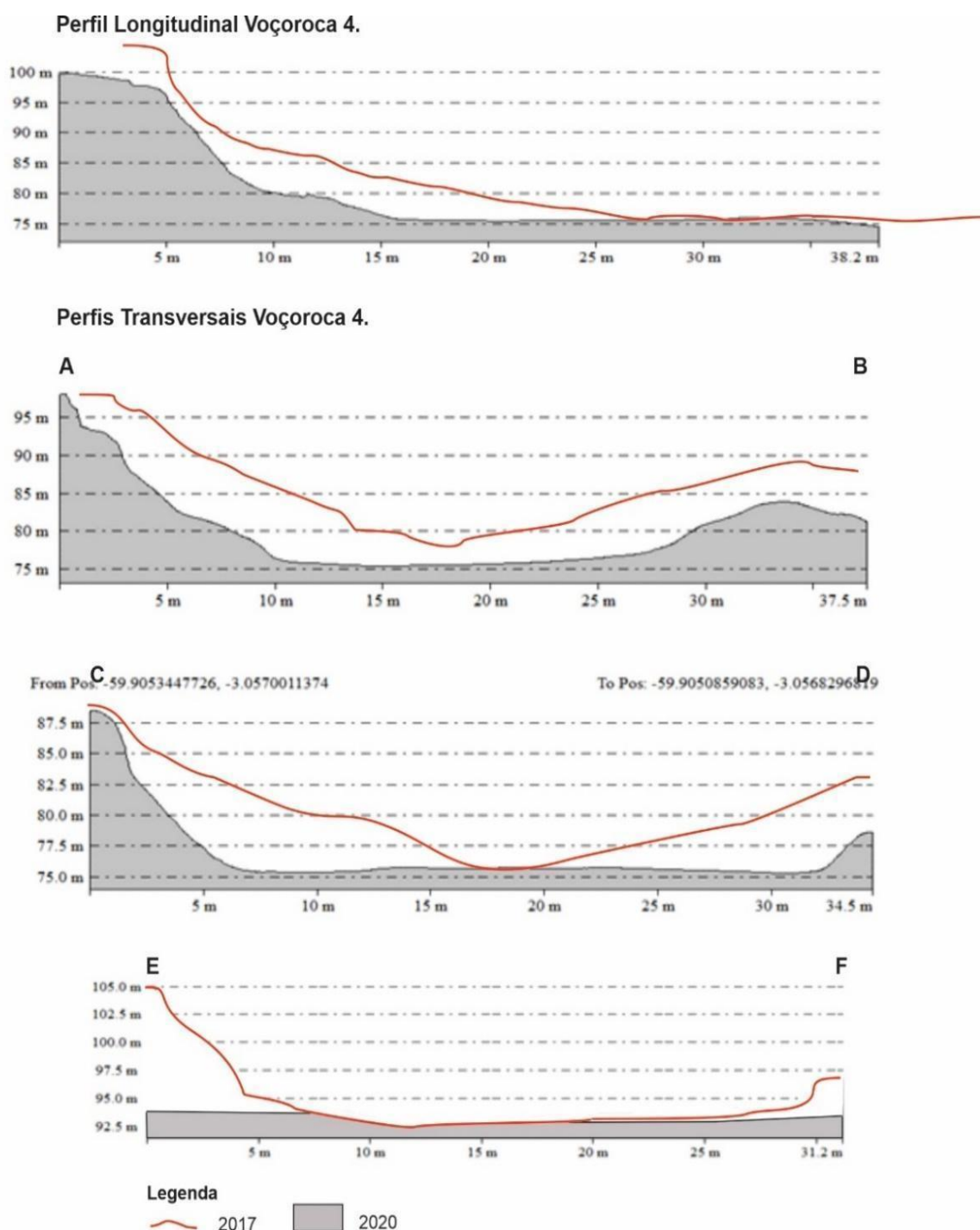


Figura 13. Perfis longitudinal e transversais (AB, CD e EF) da voçoroca 04, obtidos nos monitoramentos de 2017 e 2020. Fonte: Autores (2026).

Com base nos dados obtidos a partir das imagens geoprocessadas por VANT, foi possível calcular as taxas de crescimento em termos de área e volume das quatro incisões monitoradas nesta pesquisa. Considerando os dias com ocorrência de precipitação, a voçoroca 03 apresentou a maior taxa de crescimento superficial, atingindo 0,79 m²/dia (Tabela 6). Esse resultado indica elevada erodibilidade dos solos na área de estudo, evidenciada pelo aumento da largura nos perfis transversais, ainda que, conforme observado nos perfis anteriormente discutidos, parte dos sedimentos tenha sido depositada no interior da incisão.

Tabela 6. Taxa de crescimento das incisões estudadas (m²/dia).

Voc.	Área (m ²) 2017 (A)	Área (m ²) 2020 (B)	Diferença B – A = C (m ²)	Precipit. 2017 a 2020 (mm)	Tx. de Cresc. m ² /dia Total (850 dias) *	Tx. de Cresc. m ² /dia Total (453 dias) **
1	1685,85	1809,06	123,21	5839,1	0,14	0,27
2	1869,44	1926,87	57,44	5839,1	0,06	0,12
3	3122,67	3483,38	360,71	5839,1	0,42	0,79
4	1519,32	758,20	-761,12	5839,1	***	***

*Total de dias entre 10/09/2017 e 07/01/2020; **Total de dias que choveu entre 10/09/2017 e 07/01/2020;

***Essa incisão apresentou redução em sua área, portanto, a taxa de crescimento não pode ser calculada. Org.: Autores (2026).

No entanto, devido à ocorrência de crescimento “negativo” em termos volumétricos, relacionado à deposição de sedimentos no leito da incisão, não foi possível aferir as taxas volumétricas das voçorocas 03 e 04. De forma semelhante, a voçoroca 04 também não teve sua taxa de crescimento em área estimada, uma vez que a perda das paredes da incisão em sua seção final comprometeu a acurácia da análise.

Dessa forma, a voçoroca 02 destacou-se por apresentar a maior taxa de crescimento volumétrico, atingindo 23,62 m³/dia (Tabela 7). Esse resultado reflete avanço significativo em largura e, principalmente, em profundidade ao longo do período analisado, considerando que o sedimento removido foi transportado para fora da voçoroca.

Tabela 7. Taxa de crescimento das incisões estudadas (m³/dia).

Voc.	Vol. (m ³) 2017 (A)	Vol. (m ³) 2020 (B)	Diferença B – A = C (m ³)	Precipit. 2017 a 2020 (mm)	Tx. de Cresc. m ³ /dia Total (850 dias) *	Tx. de Cresc. m ³ /dia Total (453 dias) **
1	36960,60	39596,77	2636,16	5839,1	3,10	5,81
2	40921,95	51622,89	10700,94	5839,1	12,58	23,62
3	108322,39	92713,75	-15608,65	5839,1	***	***
4	49833,64	19536,60	-30297,04	5839,1	***	***

*Total de dias entre 10/09/2017 a 07/01/2020; **Total de dias que choveu entre 10/09/2017 e 07/01/2020;

**Essas incisões apresentaram redução em seus respectivos volumes, portanto, a taxa de crescimento não pode ser calculada. Org.: Autores (2026).

5. Discussão

5.1. Evolução morfométrica das voçorocas

Como discutido anteriormente, feições erosivas secundárias, como filetes verticais e subverticais, sulcos e outras estruturas, ocorrem nas bordas das voçorocas e contribuem para o aumento de suas dimensões.

Nas quatro incisões monitoradas, foram identificadas feições erosivas secundárias ou de retrabalhamento, indicando a atividade contínua dos processos erosivos no interior das voçorocas e contribuindo para sua evolução (Oliveira, 1999; Vieira et al., 2011; Guerra et al., 2017; Frota Filho et al., 2020). Essas feições estão associadas a mecanismos específicos, cuja morfologia característica evidencia a dinâmica erosiva atuante. Além de indicarem que as voçorocas permanecem ativas, essas estruturas favorecem sua expansão. Entre as principais feições observadas destacam-se alcovas de regressão, marmitas, costelas, pedestais (*demoiselles*) e escamamentos.

Nas bordas e na cabeceira da voçoroca 01, foram observadas fendas de tração, evidenciando a instabilidade do terreno e o recuo lateral das paredes por desmoronamento (Figura 14). Essas feições demonstram que a voçoroca permanece ativa e indicam a ocorrência de movimentos generalizados que contribuem para sua evolução. O mesmo padrão de crescimento foi identificado nas demais incisões monitoradas, seguindo dinâmica semelhante à descrita em estudos anteriores (Augustin; Aranha, 2006; Silva et al., 2017; Rocha et al., 2018; Pinto; Araújo, 2020; Xavier et al., 2023).

Com base nos dados apresentados, observa-se que o crescimento longitudinal foi menor quando comparado ao crescimento dos perfis transversais. Esse comportamento decorre da diminuição da área de contribuição, correspondente à zona de captação das águas pluviais, que interfere diretamente no volume de fluxos direcionados à cabeceira. Em outras palavras, o crescimento longitudinal depende principalmente dos fluxos superficiais, enquanto o crescimento transversal relaciona-se mais diretamente à erosão pontual, representada por alcovas de regressão, caneluras e marmitas torrenciais que continuam a se desenvolver no interior das incisões, conforme descrito por Oliveira (1999), Frota Filho et al. (2020) e Vieira e Frota Filho (2023).

Dessa forma, a redução da área de captação direta das águas pluviais, provocada pela progressão da incisão erosiva, interfere na velocidade de expansão em direção à montante. Esse comportamento relaciona-se ao processo de retroalimentação positiva entre geração de fluxos e erosão. Tal dinâmica ocorre principalmente em voçorocas do tipo desconectada e integrada, conforme a tipologia proposta por Oliveira (1989).



Figura 14. Sulcos na borda da voçoroca 01, Bairro Distrito Industrial 2. Fonte e Organização: autores (2026).

Dessa forma, as incisões 4 e 5 (Figura 10), desenvolvidas na mesma encosta e que já alcançaram o topo, classificadas como voçorocas integradas, apresentaram alargamento progressivo e união decorrente do colapso da parede que as separava, resultando na formação de uma única voçoroca (Figura 15), atualmente denominada incisão 4. Essa dinâmica tende a ocorrer também entre as incisões 3 e 4, considerando que ambas apresentaram aumento de largura e cabeceiras mais arredondadas, aproximando-se da forma retangular.

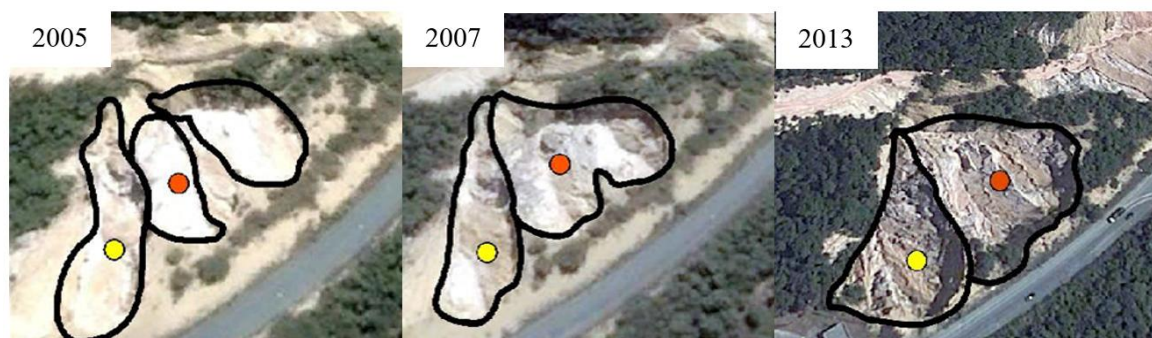


Figura 15. Evolução de voçorocas no bairro Distrito Industrial II, na bacia Colônia Antônio Aleixo. O ponto amarelo indica a voçoroca 3 e o ponto laranja a voçoroca 4. Fonte: © Google Earth, anos de 2005, 2007 e 2013. Org: Autores (2026).

O entendimento da morfometria permite analisar os impactos causados pelas incisões tanto em termos ambientais quanto urbanísticos. No primeiro caso, destacam-se a perda de área e o volume de sedimentos transportados em direção aos canais de drenagem, favorecendo o assoreamento. Soma-se a isso a morte de espécies vegetais decorrente das alterações ecológicas provocadas pelo acúmulo de sedimentos. No segundo caso, o avanço contínuo das incisões em direção às vias de acesso provoca danos ao calçamento e destruição do sistema de drenagem pluvial, entre outros impactos.

De forma geral, as voçorocas analisadas apresentam características semelhantes, principalmente em relação à forma e à posição na encosta, sobretudo quando associadas ao fator antrópico como elemento desencadeador do crescimento. Em grande parte, esse processo relaciona-se ao sistema de drenagem artificial, composto por canaletas e galerias pluviais, que fornecem fluxos concentrados de água capazes de intensificar os processos erosivos e controlar sua direção e expansão.

In general, the analyzed gullies exhibit similar characteristics, particularly regarding morphology and hillslope position, especially when associated with anthropogenic forcing as the triggering factor for their development. To a large extent, this process is related to artificial drainage systems composed of channels and stormwater galleries, which supply concentrated water flows capable of intensifying erosional processes and controlling both their direction and expansion.

Essas voçorocas apresentam, a montante de suas cabeceiras, vias pavimentadas que acumulam água da chuva. Essa água é captada por sistemas de drenagem e direcionada para as voçorocas, favorecendo sua evolução. Nesse contexto, Tucci e Collischonn (2000) e Rossato e Botelho (2002) descrevem que o aumento do coeficiente de pavimentação intensifica a ocorrência de erosão urbana em aproximadamente 60% a 80%. Consequentemente, à medida que aumenta o percentual de ruas pavimentadas, diminuem as áreas de infiltração e elevam-se os fluxos superficiais, potencializando os processos erosivos. Quando esses fluxos encontram áreas de solo exposto, o potencial erosivo torna-se ainda maior. Esse cenário favorece o desenvolvimento de feições erosivas como voçorocas, além de acelerar seu crescimento e ampliar suas dimensões, principalmente em condições de precipitação elevada e concentrada, associadas ao direcionamento das águas pluviais por canaletas.

A dinâmica erosiva intensificada pelas canaletas, responsáveis pela concentração das águas pluviais, pode originar ou ampliar voçorocas, especialmente em áreas de solo exposto. Na bacia Colônia Antônio Aleixo, as voçorocas monitoradas seguem a direção das canaletas, refletindo um processo identificado em outros estudos desenvolvidos em áreas urbanas e rodoviárias (Tucci; Collischonn, 2000; Rossato; Botelho, 2002; Jungerius et al., 2002; Valentin; Posen, 2005; Ferreira et al., 2011; Dirane, 2016; 2018; Frota Filho, 2016; 2021; Silva, 2017; Silva, 2020; Silva; Vieira, 2021; Vieira et al., 2022; Guerra et al., 2023; Kuhn et al., 2023). O aumento do escoamento concentrado associado aos sistemas de drenagem favorece o desenvolvimento dessas feições erosivas.

5.2. Taxas de perda de solo e impactos na rede de drenagem

No que se refere às quatro incisões monitoradas, sendo duas conectadas e duas integradas, o volume de sedimentos oriundos das voçorocas e transportados pela erosão foi direcionado para a rede de drenagem fluvial, que se encontra fortemente assoreada. As voçorocas dos tipos conectada e integrada à rede de drenagem impactam

diretamente os canais fluviais, conforme verificado em outros setores da bacia Colônia Antônio Aleixo (Barbosa, 2013; Frota Filho, 2016; 2021).

Com a finalidade de quantificar o volume de sedimentos carregados pelas quatro incisões monitoradas, utilizaram-se as áreas erodidas multiplicadas pela maior profundidade aferida, obtendo-se o volume máximo erodido para cada incisão até o monitoramento de 2020. Para complementar esse cálculo, empregou-se a densidade média do solo sobre o qual as feições se desenvolveram, possibilitando calcular o volume erodido em toneladas para cada incisão (Tabela 8). Conceitualmente, a densidade do solo engloba as fases sólida, líquida e gasosa, conforme descrito por Lepsch (2011).

Tabela 8. Dados de área, volume e toneladas erodidas pelas voçorocas. Org: Autores (2026)

Voc.	Área máxima erodida (m²)	Maior profund. aferida (m)	Volume máximo erodido (m³)	Densidade do solo (g/cm³)	Tonelada (t)
1	1 809,06	21,92	39 654,59	1,41	55 912,97
2	1 926,87	26,79	51 620,84	1,41	72 785,38
3	3 483,38	34,69	120 838,45	1,19	143 797,75
4	1 519,32	32,80	49 833,69	1,19	59 302,09
Total	8 738,63	-	261 947,57	-	331 798,19

Em termos proporcionais, as voçorocas 01 e 02 contribuíram com maior tonelage em razão da maior densidade do solo do material carregado, correspondente a 1,41 g/cm³. Nas voçorocas 03 e 04, observou-se densidade inferior, de 1,19 g/cm³, embora essas duas incisões tenham contribuído com maior volume absoluto de sedimentos. Dessa forma, as feições analisadas forneceram aproximadamente 261.947,57 m³ ou 331.798,19 t de sedimentos para a rede de drenagem (Figura 16), que se encontra completamente assoreada em decorrência do aporte sedimentar proveniente das incisões.

Os impactos tornam-se mais expressivos em voçorocas dos tipos conectada e integrada, pois essas feições apresentam ligação direta com a rede de drenagem. Consequentemente, o aporte de sedimentos ocorre de forma direta, sem possibilidade significativa de retenção ou deposição em média encosta ou na base das vertentes. Em termos gerais, Barbosa (2013) indica que as voçorocas contribuem com sedimentos para o interior da bacia Colônia Antônio Aleixo, sendo que grande parte desse material permanece no interior da bacia, sobretudo os sedimentos mais grosseiros, como areia, enquanto os sedimentos finos, representados por silte e argila, são transportados diretamente para o rio Amazonas.

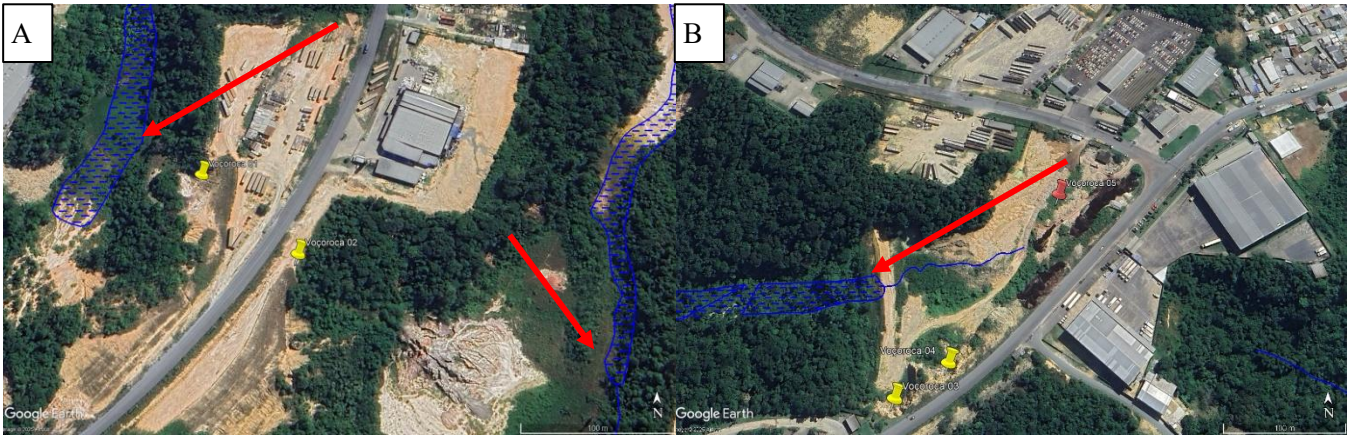


Figura 16. A: Voçorocas 01 e 02. B: Voçorocas 03, 04 e 05. Vista parcial da rede de drenagem assoreada (setas vermelhas) pelos sedimentos oriundos das voçorocas, no bairro Distrito Industrial II. Fonte: Imagens Google Earth, ano de 2024, escala 1:10.000. Org.: Autores (2026).

Outra condição associada ao assoreamento da bacia Colônia Antônio Aleixo relaciona-se diretamente à baixa vazão do canal principal. Abdon (2004), Camargo (2012) e Mugade e Sapkale (2015) confirmam essa relação entre

vazão e assoreamento, indicando que esse processo ocorre quando a taxa de deposição de sedimentos supera a capacidade de vazão e transporte do canal.

Entretanto, os sedimentos finos, representados por argila e silte, são transportados pelos canais e posteriormente carregados para fora da bacia. Esse comportamento é corroborado pelas taxas de sedimentos em suspensão observadas no terço inferior do canal principal da bacia, variando entre 2 e 2,4 mg/L (Barbosa, 2013). A deposição de sedimentos e o consequente assoreamento podem provocar alterações na morfologia dos canais e nas relações entre os fluxos superficiais e subsuperficiais, favorecendo o crescimento da superfície erosiva (Golosov, 2002; Thakur, 2019).

6. Conclusões

A aplicação de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) tem se mostrado uma alternativa eficiente frente às limitações encontradas durante o diagnóstico e o monitoramento de feições erosivas em campo. Em situações de acesso restrito ou de risco físico, esse tipo de sensoriamento remoto constitui uma solução viável e segura. Destaca-se ainda pela capacidade de gerar dados com elevada precisão espacial, contribuindo para a delimitação de perímetros, medição de áreas e volumes e elaboração de perfis longitudinais e transversais.

No presente estudo, os VANTs foram utilizados no monitoramento da evolução de voçorocas e de feições associadas, como alcovas e ravinas. A metodologia adotada baseou-se em levantamentos aerofotogramétricos e posterior análise por geoprocessamento, permitindo obter resultados mais precisos em comparação com métodos tradicionais, como o estaqueamento e as poligonais planimétricas. Esse procedimento possibilitou acompanhar a dinâmica das incisões, distinguir diferentes fases de desenvolvimento e identificar elementos associados, embora a verificação em campo permaneça necessária para validações complementares.

A partir das imagens obtidas, foram gerados Modelos Digitais de Elevação (MDE), utilizados para calcular o volume de solo erodido ao longo do processo evolutivo das voçorocas analisadas. A confiabilidade dos dados foi assegurada pela comparação com perfis topográficos coletados em campo, apresentando variações inferiores a 10%. Ao relacionar os volumes à densidade média do solo, foi possível estimar a massa de sedimentos deslocados. Nas quatro voçorocas monitoradas, o volume erodido estimado foi de 261.947,57 m³, correspondendo a aproximadamente 331.798,19 toneladas de material transportado. Esses valores evidenciam o potencial de carga sedimentar mobilizada e reforçam a importância dessa análise para compreender os impactos da erosão sobre a rede de drenagem urbana.

No interior das voçorocas foram identificadas feições secundárias, como alcovas de regressão, que contribuem para o avanço das incisões. A comparação entre os perfis topográficos, especialmente nas voçorocas 1 e 2, revelou a formação de ravinas nas bordas da incisão principal. Esse comportamento indica áreas ativas de erosão e sugere tendências de crescimento lateral. A partir dessas análises, foi possível estimar taxas de evolução métrica e identificar a orientação preferencial do avanço erosivo. Os perfis longitudinais e transversais também evidenciaram a influência de fatores como o escoamento superficial das águas pluviais e a ação antrópica relacionada ao uso do solo. Nesse contexto, a direção de crescimento das feições mostrou-se condicionada principalmente pelas intervenções humanas.

O monitoramento sistemático das voçorocas, realizado de forma contínua e periódica, permite identificar zonas de maior vulnerabilidade e mapear a direção de crescimento das feições erosivas. Essas informações possuem elevada relevância em áreas próximas a vias, residências e estruturas urbanas, onde o risco geotécnico é mais elevado. Nesses casos, o uso de VANTs apresenta potencial estratégico tanto para o diagnóstico quanto para subsidiar ações de controle, contenção e recuperação de áreas degradadas.

A análise realizada demonstra que os processos erosivos em áreas urbanas estão diretamente associados à ocupação desordenada e ao planejamento territorial inadequado. Os resultados obtidos reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas à gestão de riscos geotécnicos e ao uso de tecnologias de sensoriamento remoto, como os VANTs, no monitoramento contínuo dessas áreas.

Contribuições dos Autores: Concepção, A.B.F.F., A.F.S.G.V. e A.J.T.G.; metodologia, A.B.F.F., A.F.S.G.V. e A.J.T.G.; validação, A.B.F.F. e A.F.S.G.V.; análise formal, A.B.F.F. e A.F.S.G.V.; investigação, A.B.F.F., A.F.S.G.V. e A.J.T.G.; recursos, A.B.F.F., A.F.S.G.V. e A.J.T.G.; curadoria dos dados, A.B.F.F.; redação da versão original, A.B.F.F. e A.J.T.G.; redação – revisão e edição, A.B.F.F. e A.F.S.G.V.; supervisão, A.F.S.G.V. e A.J.T.G.; administração do projeto, A.B.F.F., A.F.S.G.V. e A.J.T.G.; aquisição de financiamento, A.F.S.G.V. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Agradecimentos: À CAPES e à FAPEAM pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho. A pesquisa de doutorado do primeiro autor, que fundamentou este estudo, contou com financiamento por meio de bolsas concedidas pela CAPES e pelo CNPq. O segundo e o terceiro autores também agradecem ao CNPq pela concessão de bolsas de produtividade em pesquisa.

Declaração sobre o uso de Inteligência Artificial: os autores utilizaram a ferramenta de inteligência artificial ChatGPT (OpenAI) como apoio na revisão gramatical do manuscrito em língua portuguesa, na tradução de trechos do texto para o idioma inglês e na melhoria visual da figura 4. O uso da ferramenta restringiu-se ao aprimoramento linguístico e à adequação textual, não tendo sido empregada na elaboração, interpretação, análise dos dados ou formulação das conclusões do estudo. Os autores revisaram e validaram integralmente todo o conteúdo gerado, assumindo total responsabilidade pelo texto final apresentado.

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

Referências

1. AUGUSTIN, C.H.R.R.; ARANHA, P.R.A. Piping em área de voçorocamento, noroeste de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. Ano 7, nº 1, p. 09-18, 2006. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v7i1.56>
2. BARBOSA, A.J. Voçorocas e a produção de sedimentos na bacia da Colônia Antônio Aleixo em Manaus (AM). 2013, 81 f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.
3. BITENCOURT, C.; FERNANDES, C. A.; RODRIGUES, E. C.; TEIXEIRA, M. A. Aplicações da técnica SfM-MVS em mapeamentos geomorfológicos com uso de VANT: estudo de caso em área urbana no Rio Grande do Sul. *Geociências (São Paulo)*, v. 40, n. 1, p. 195–210, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gcg/a/CrnhLgNhQCTzSvZTtcxdxbg>. Acesso em: 12 maio 2025.
4. BORRELLI, P., BALLABIO, C., YANG, J.E., ROBINSON, D.A. & PANAGOS, P. GloSEM: High-resolution global estimates of present and future soil displacement in croplands by water erosion, figshare, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.5844758.v1> (2022).
5. CROZIER, M. J.; Hardenbicker, U.; GOMEZ, B. *Physical Landscapes* In: GOMEZ, B.; JONES, J.P. *Research Methods in Geography*. Oxford: Blackwell Publishing., 2010, 459 p.
6. D'ÁVILA JUNIOR, J.C.M.; VIEIRA, A.F.S.G. Padrões pluviométricos da cidade de Manaus-AM: 1986 a 2015. In: *Boletim Paulista de Geografia*. n.102, dez. 2019. p.1-31
7. DIRANE, A.C.M. Mapeamento das áreas de risco a voçorocamento e caracterização geoambiental da rodovia AM-010 Manaus/Itacoatiara – AM. 2016. 106f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal do Amazonas. Manaus. 2016.
8. FERREIRA, V.M.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; OLIVEIRA, A.H.; SILVA, M.A.; AVANZI, J. C. Influência antrópica e atributos de solo: inter-relações em ambientes de voçorocas na mesorregião Campos das Vertentes, MG. *Geografia, Rio Claro*, v. 36, p. 209-219, 2011
9. FRANZINELLI, E. e PIUCCI, J. (1988). Evidências de neotectonismo na Bacia Amazônica. In: VII Congresso Latino-Americano de Geologia. Anais [...]. Belém. p. 80-90.
10. FROTA FILHO, A.B. Análise da vulnerabilidade erosiva da bacia hidrográfica colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFAM, Manaus. 2016.
11. FROTA FILHO, A.B. Alterações antropogênicas na geomorfologia e suas influências na aceleração dos processos erosivos, bacia hidrográfica colônia Antônio Aleixo, Manaus-Am. 2021. 258f. Tese (Doutorado em Planejamento e Gestão Ambiental) - Instituto de Geociências – IGEO, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.
12. FROTA FILHO, A.B.; ABREU, N.R.P.; VIEIRA, A.F.S.G. Processo de voçorocamento e feições secundárias: um estudo de caso em Manaus-AM. *Revista Caminhos de Geografia*, v. 21, p. 313-323, 2020. Disponível em: doi.org/10.14393/RCG217441778. <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/41778>. Acesso em: 14/01/2024
13. GOLOSOV, V. Soil erosion and small river aggradation in Russia. In: ISCO Conference. 12., 2002.Beijing. *Proceedings [...]*. Beijing: 2002. p. 154-159.
14. GUERRA, A.J.T. e GUERRA, A. J. T. *Novo Dicionário Geológico -Geomorfológico*. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. 652p.
15. GUERRA, ANTÔNIO JOSÉ TEIXEIRA; FULLEN, MICHAEL AUGUSTINE ; JORGE, MARIA DO CARMO OLIVEIRA ; Bezerra, José Fernando Rodrigues ; SHOKR, MOHAMED . Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. *Pedosphere*, v. 27, p. 27-41, 2017.
16. GUERRA, A. J. T.; BEZERRA, J. F. R. ; JORGE, M. C. O. Recuperação de voçorocas e de áreas degradadas, no Brasil e no mundo – estudo de caso da voçoroca do Sacavém – São Luís – MA

17. JUNGIERUS, P.D.; MATUNDURA, J.; VAN DE ANCKER, J.A.M. Road construction and gully erosion in West Pokot, Kenya. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(11), 1237–1247. 2002. doi:10.1002/esp.423
18. KRENZ, J.; GREENWOOD, P.; HECKRATH, G.; KUHN, B.; KUHN, N. Assessing Badland Sediment Sources using UAVs. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 2018. p. 8126.
19. KRENZ, J.; GREENWOOD, P.; KUHN, N. J. Soil Degradation Mapping in Drylands Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Data. *Soil Systems*, 3(2), 33. 2019. doi:10.3390/soilsystems3020033
20. KRENZ, J.; KUHN, N.J. Assessing Badland Sediment Sources Using Unmanned Aerial Vehicles. *Badlands Dynamics in a Context of Global Change*, 2018. 255–276. doi:10.1016/b978-0-12-813054-4.00008-3
21. KUHN, C.E.S.; REIS, F.A.G.V.; ZARFL, C.; GRATHWOHL, P. Ravines and gullies, a review about impact valuation. *Natural Hazards*, 117(1), 597–624. 2023.
22. LEAL, P.C. Caracterização e interpretações genéticas de alguns solos da região de Manaus-AM. 1996. 109f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Ciência dos Solos. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, 1996.
23. LEPSCH, I. F. 19 lições de pedologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2011, p. 793.
24. LOUREIRO, H. A. S.; GUERRA, A. J. T.; ANDRADE, A. G. Contribuição ao estudo de voçorocas a partir do uso experimental de laser scanner terrestre e VANT. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, n. 4, 871–892, 2020
25. LOUREIRO, H.A.S. Diagnóstico de erosão por voçorocas: experimentos com geotecnologias e solos na bacia do Alto rio Pirai - Rio Claro-RJ. 2019. 224 f. Tese (Doutorado em Geografia – Planejamento e Gestão Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
26. OLIVEIRA, M.A.T. Erosion Disconformities and Gully Morphology: A Threedimensional Approach. In: *Catena: na interdisciplinary journal of Soil Science Hydrology – Geomorphology*. Vol. 16. W. Germany: Catena Verlag. 1989. p. 413–423
27. 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. (Org). *Erosão e Conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. 1. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p 57-99.
28. OLIVEIRA, M.A.T.; LEMOS, R.; PINTO, L.R. Pode uma voçoroca resultar da evolução de voçorocas conectadas e desconectadas?. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S. l.], v. 24, n. 00, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i00.2372. Disponível em: <https://www.rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2372>. Acesso em: 15 jan. 2024.
29. PINTO, B.L.; ARAÚJO, H.M. Configuração geomorfológica contemporânea de uma voçoroca sobre a litoestrutura sedimentar da sub-bacia de tucano central–BA. *Acta Geográfica*, v. 14, n. 35, p. 1-26, 2020.
30. ROCHA, W.S.; PASQUALETTO, A.; SANTOS, G.M.; MENDES, T.A.; SANTOS, H.I. Erosão Urbana: Microbacia do Córrego Olho D'água, Município de Goiânia, Goiás. *Revista Baru-Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos*, 4(1), 64-76. 2018.
31. ROSSATO, M. S.; BOTELHO, R. G. M. Erosão urbana no brasil. *Revista Da Pós-Graduação em Geografia*, Rio de Janeiro, v. 5, p. 33-52, 2002.
32. ROSS, J.L.S. Fundamentos da Geografia da Natureza. In: ROSS, J.L.S. (org.). *Geografia do Brasil*. São Paulo: EDUSP, 2000. p.13-65
33. SANTANA, G.F. Análise dos padrões térmicos da cidade de Manaus-AM no período de 1986 a 2015. 2018. 47f. Relatório de Pesquisa. Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2018.
34. SANTANA, G.F. Monitoramento de voçorocas utilizando veículo aéreo não tripulado (VANT) em áreas de difícil acesso em Manaus-AM. 2019. 31f. Relatório de Pesquisa. Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2018.
35. SILVA, D.G.; CÔRREA, A.C.B.; AMORIM, R.F. Caracterização morfológica e dinâmica ambiental das marmitas (weathering pit) no distrito de Fazenda Nova, Pernambuco – Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S.l.], v.18, n.2, 2017. DOI: 10.20502/rbg.v18i2.1062. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1062>. Acesso em: 7 nov. 2023.
36. SILVA, G.M. Geomorfologia aplicada à caracterização da vulnerabilidade à erosão em Rio Preto da Eva (AM). 2021. 113f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal do Amazonas. Manaus. 2021.
37. SILVA, G.M.; VIEIRA, A.F.S.G. Mapeamento de voçorocas na cidade de Rio Preto da Eva (AM). *Geosaberes: Revista de Estudos Geoducionais*, v. 11, 2020. p. 517-531.
38. SILVA, G.M.; VIEIRA, A.F.S.G.; ALVES, A.S. Análise da ocupação da terra em área de risco: um estudo de caso no Bairro Nova Cidade, Manaus-AM. *Caderno de Geografia*. v.33, n.7, 2023. p.93-109

39. SILVA, I.N. Geomorfologia e planejamento ambiental: identificação e monitoramento de voçorocas no sítio urbano de Iranduba/AM. 2020. 166f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal do Amazonas. Manaus. 2020.
40. SILVA, I.N.; VIEIRA, A.F.S.G. Mapeamento de voçoroca no sítio urbano de Iranduba – AM. In: VIEIRA, A.F.S.G.; MOLINARI, D.C. (Orgs.). Geografia Física da Amazônia - Volume 2. São Paulo/Manaus: Alexa Cultural/EDUA, 2021. p.71-88
41. SOUSA, K.C.D Avaliação geométrica de imagens adquiridas por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para o mapeamento de feições erosivas em Manaus-AM. Relatório de Iniciação Científica – Universidade Federal do Amazonas, 2018.
42. SPELL, R.L.; JOHNSON, B.G. Anthropogenic alluvial sediments in North Carolina Piedmont gullies indicate swift geomorphic response to 18th century land-use practices. *Physical Geography*, 1–17. 2019. doi:10.1080/02723646.2019.1574145
43. THAKUR, V. K. Sediment management of Nathpa dam from heavy silt in river Satluj (India) preparing a one column paper with word for windows. In: TOURNIER, J. P.; BENNETT, T.; BIBEAU, J. Sustainable and safe dams around the world. CRC Press, 2019. p. 1327-1337.
44. VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, v. 63, n. 2-3, p. 132-153, 2005.
45. VIEIRA, A.F.G. Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impacto urbano ambientais. 2008. 310f. Tese (Doutorado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2008.
46. VIEIRA, A.F.G. Erosão por voçorocas em áreas urbanas: o caso de Manaus (AM). 1998. 181f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1998.
47. VIEIRA, A.F.G.; ALBUQUERQUE, A.R.C. Cadastramento de voçorocas e análise de risco erosivo em estradas: BR-174 (Trecho Manaus – Presidente Figueiredo). In: V Simpósio Nacional de Geomorfologia e I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia (SINAGEO/ESG), 5., 2004, Santa Maria. Anais... Santa Maria: UGB/UFSM, 2004. p. 50-65
48. VIEIRA, A.F.G.; MOLINARI, D.C.; DIRANE, A.C.M.; DONALD, A.R. Condicionantes morfométricos para o surgimento de caneluras e escamamentos em voçorocas. *Revista Geonorte*, v. 01, p. 79-92, 2011.
49. VIEIRA, A.F.S.G.; LIMA, C.M.R.; SILVA, G.M. Caracterização das voçorocas da área urbana de Rio Preto da Eva (AM), Norte do Brasil. *Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, v. 22, n. 4, 2022. p. 9-107
50. VIEIRA, A.F.S.G.; FROTA FILHO, A.B. Avaliação das técnicas de monitoramento de voçorocas: o exemplo da Região Metropolitana de Manaus-AM, na região amazônica. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, v.24, n. Especial, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i00.2302> Acesso em 15/01/2024
51. WELDEYOHANIS, Y.H.; ANESEYEE, A.B.; SODANGO, T.H. Evaluation of current solid waste disposal site based on socio-economic and geospatial data: a case study of Wolkite town, Ethiopia. *GeoJournal*, 87(2), 585-601. 2022.
52. XAVIER, R.A.; BORGES NETO, I.O.; SOUZA, J.J.L.L.; CARDOSO, P.V.; SOUZA, J.O.P.; SOUZA, B.I. Processos de voçorocamento no Planalto da Borborema, semiárido da Paraíba. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S. l.], v. 24, n. 00, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i00.2359. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2359>. Acesso em: 07/11/2023.
53. XU, Q.; KOU, P.; WANG, C.; YUNUS, A.P.; XU, J.; PENG, S.; HE, C. Evaluation of gully head retreat and fill rates based on high-resolution satellite images in the loess region of China. *Environmental Earth Sciences*, 78(15). 2019. doi:10.1007/s12665-019-8483-x
54. ZOLEZZI, G.; BEZZI, M. Urban gully erosion and the SDGs: a case study from the Koboko rural town of Uganda. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 2017. p. 11687.



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.