



Mercator - Revista de Geografia da UFC  
ISSN:  
ISSN: 1984-2201  
edantas@ufc.br  
Universidade Federal do Ceará  
Brasil

# CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DA EROSÃO DE VOZES NO SUL DO BRASIL COM O AUXÍLIO DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO

**Querim Rademann, Lucas Kerin Rademann**

CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DA EROSÃO DE VOZES NO SUL DO BRASIL COM O AUXÍLIO DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO

Mercator - Revista de Geografia da UFC, vol. 21, núm. 1, 2022

Universidade Federal do Ceará

Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=273674020031>

# CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DA EROSÃO DE VOZES NO SUL DO BRASIL COM O AUXÍLIO DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO

Lucas Kerin Rademann Querim Rademann  
lucasrademann@yahoo.com



Acceso abierto diamante

## Abstract

A capacidade de compreender os mecanismos erosivos de uma voçoroca é de grande importância para determinar sua dinâmica e as melhores formas de intervenção. Assim, com o auxílio de dados de alta resolução obtidos com VANT, este trabalho busca caracterizar e analisar os mecanismos erosivos que atuam em uma voçoroca no sul do Brasil. Para isso, foi realizado um levantamento utilizando um VANT multirrotor, com altura de voo de 150m, e área sobreposta de 67ha. Os dados obtidos foram processados utilizando o fluxo de trabalho SfM-CMVS (Structure from Motion - Clustering Multi-View Stereo), gerando um Modelo Digital do Terreno com resolução espacial de 12,6 cm/pixel. Entretanto, os movimentos de massa mostraram-se como o principal agente de avanço lateral e vertical da voçoroca, predominando nas porções superiores da voçoroca. No terço inferior da voçoroca houve predomínio de movimentos de massa e áreas de rebaixamento relacionadas ao contato de lentes de rocha arenosa com lentes mais argilosas. Os produtos gerados neste trabalho fornecem um banco de dados que tem o potencial de auxiliar nos trabalhos a serem desenvolvidos, servindo de base para o estudo da gênese das voçorocas, para a identificação das melhores medidas mitigadoras, ou como arcabouço inicial para o estudo da evolução dessa característica erosiva. Assim, faz-se necessário um estudo mais aprofundado dos reais impactos da silvicultura sobre os mecanismos erosivos.

**Keywords:** Erosão, Estrutura estéreo de movimento – multivisão (SfM–MVS), Mecanismos de Erosão, Movimentos de Massa.

## Resumo

A capacidade de compreender os mecanismos erosivas de uma voçoroca é de grande importância para determinar a sua dinâmica e as melhores formas de intervenção. Assim, com o auxílio de dados de alta resolução obtidos com VANT, este trabalho busca caracterizar e analisar os mecanismos erosivos que atuam em uma voçoroca no sul do Brasil. Para tanto, foi realizado um levantamento com um VANT multirrotor, com altura de 150 m e área total de 67 ha. Os dados obtidos foram analisado pelo algoritmo SfM-CMVS (Structure from Motion - Clustering Multi-View Stereo), gerando um Modelo Digital de Terreno com resolução espacial de 12,6 cm/pixel. No entanto, os movimentos de massa mostram-se como o principal agente de avanço lateral e vertical da rocha, predominando nos pórticos superiores. No terço inferior da voçoroca predominaram movimentos de massa e rebaixamentos relacionados ao contato de lentes de rocha arenosa com lentes mais argilosas. Os produtos gerados neste trabalho fornecem uma base de dados com potencial para auxiliar nos trabalhos futuros, servindo de base para o estudo da gênese da voçoroca, para a identificação das melhores medidas de mitigação, ou como um ponto de partida para o estudo de evolução desta feição erosiva. Logo, torna necessário um estudo mais aprofundo dos reais impacto da silvicultura nos mecanismo erosivos.

**Palavras-chave:** Erosão da ravina, Estrutura do Estéreo Motion–Multi-View (SfM–MVS), Mecanismos de erosão, Movimentos de Massa.

## Resumen

A capacidade de compreender os mecanismos erosivos de um barranco é de grande importância na determinação de sua dinâmica e das melhores formas de intervenção. Assim, com o auxílio de dados de alta resolução obtidos com VANTs, este trabalho busca caracterizar e analisar os mecanismos erosivos que atuam em um barranco no sul do Brasil. Para tanto, foi realizado um levantamento utilizando um VANT multirrotor, com altura de voo de 150m, e área de sobreposição de 67ha. Os dados obtidos foram processados utilizando o fluxo de trabalho SfM-CMVS (Structure from Motion - Clustering Multi-View

---

## Notas de autor

lucasrademann@yahoo.com

Stereo), gerando um Modelo Digital do Terreno com resolução espacial de 12,6 cm/pixel. Entretanto, os movimentos de massa mostraram-se o principal agente de avanço lateral e vertical do barranco, predominando nas porções superiores. No terço inferior do barranco predominaram movimentos de massa e áreas de descida relacionadas ao contato de lentes de rocha arenosa com lentes mais argilosas. Os produtos gerados neste trabalho fornecem um banco de dados que tem o potencial de auxiliar no trabalho a ser desenvolvido, servindo de base para o estudo da gênese de barrancos, para a identificação das melhores medidas mitigadoras, ou como um marco inicial para o estudo da evolução dessa característica erosiva. Em seguida, pede um estudo mais aprofundado dos reais impactos da silvicultura nos mecanismos erosivos

**Palabras clave:** Erosão de Cárcavas, Estrutura do movimento: Multiview Stereo (sfM-MVS), Mecanismos de Erosão, Movimentos em Massa.

## INTRODUÇÃO

Dentre as formas de erosão, a voçoroca é a que possui maior poder destrutivo, indicando um estágio avançado de degradação do solo e um desequilíbrio no sistema hídrico e geomorfológico (ALBUQUERQUE, 2007; MATHIAS, CUNHA E CARVALHO, 2010). As voçorocas são feições com desenvolvimento e dinâmica bastante complexos (VANMAERCKE et al., 2016). A identificação de seus mecanismos erosivos é fundamental para o entendimento dos processos que ocorrem na paisagem (OLIVEIRA, 2005; VANMAERCKE ET AL., 2021). Grandes feições erosivas, como as voçorocas, amplificam os impactos sobre o meio ambiente, perturbando até grandes áreas de terra como observado na Nova Zelândia (BETS ET AL., 2003; PARKNER et al., 2006), Brasil (BACELLAR et al., 2005) e Espanha (MARTINEZ CASANOVAS et al., 2009).

No sul do Brasil, especificamente no sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, há uma grande concentração de voçorocas associadas a rochas sedimentares muito friáveis e tem sido alvo de vários estudos relacionados a feições erosivas (ROBAINA et al., 2002; ROBAINA e TRENTIN, 2004; CABRAL, 2004; CABRAL et al., 2009). A erosão das voçorocas é um processo de degradação do solo com impactos mundialmente conhecidos com grandes danos ambientais, ecológicos e econômicos em diversos sistemas paisagísticos (POESEN et al., 2003; BARTLEY et al., 2014; ZAO et al., 2016). O gerenciamento eficaz da erosão de voçorocas requer informações topográficas de alta resolução que podem ser usadas para quantificar com precisão a distribuição espacial e a densidade dos sistemas de voçorocas,

Nos últimos anos, principalmente após 2010, os UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) e SfM-CMVS (Structure from Motion-Clustering Multi-View Stereo) têm sido frequentemente utilizados para estudos de erosão (D'OLEIRE-OLTMANN et al., 2012; STÖCKER et al., 2015; VERDONK, 2015; LIU et al., 2016; GUTIÉRREZ et al., 2018; HOSSEINALIZADEH et al., 2019), permitindo novas abordagens para análise de voçorocas, especialmente análises detalhadas dessas feições erosivas a baixo custo (WESTOBY e outros, 2012).

A obtenção de MDTs de alta resolução, que permitem a visualização 3D dos elementos mapeados através da utilização da tecnologia SfM-CMVS, tem possibilitado diversos estudos ao nível do detalhe em voçorocas com enfoque na análise de modelos bastante detalhados. Os aspectos mais estudados são o volume erodido em diferentes períodos de tempo (KAISER et al., 2014; PETER et al., 2014; GLENDELL et al., 2017; GAFUROV, 2017), taxa de recuo do headcut (GUTIÉRREZ et al., 2014; VANMAERCKE et al., 2016) e morfometria ou morfologia de feições erosivas (NOBAJAS et al., 2017; GUTIÉRREZ et al., 2018).

Devido à complexidade do processo de voçoroca, diversos mecanismos atuam na formação e desenvolvimento de uma voçoroca e estão intimamente relacionados à ação e condição de fatores erosivos (STARKEL, 2011; VANMAERCKE et al., 2016). Oliveira (2005) indica que os principais mecanismos que atuam no processo voçorocas são o transporte de partículas do solo por fluxos concentrados, erosão por cachoeiras, erosão da base da encosta, liquefação do solo, movimentos de massa e arrasto de partículas por fluxos concentrados em tubos.

O objetivo desta pesquisa é utilizar a tecnologia SfM-CMVS para analisar a distribuição e o desempenho de mecanismos erosivos na Voçoroca do Areal no município de Cacequi. A tecnologia SfM-CMVS permite a modelagem 3D da voçoroca, possibilitando a identificação de diferentes mecanismos que podem auxiliar futuramente na escolha de práticas de mitigação para o avanço da Área da Voçoroca, atendendo a cada mecanismo de forma individual e diferenciada. Desta forma, espera-se delimitar os mecanismos erosivos mais ativos em cada trecho da voçoroca, oferecendo um diagnóstico dos processos que atuam na expansão da voçoroca hoje.

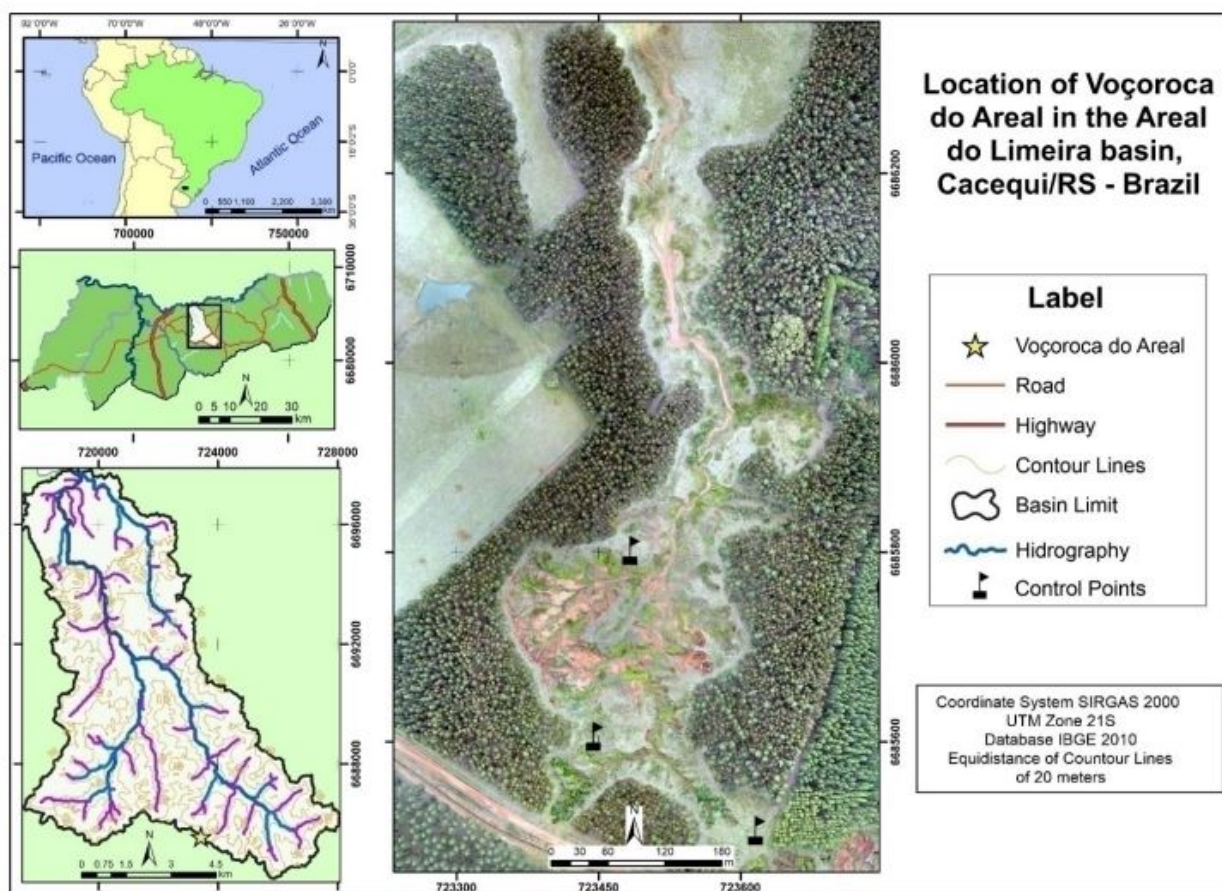
## METODOLOGIA E MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDO

O Areal Voçoroca está localizado no município de Cacequi (Figura 1) associado à unidade geomorfológica da Depressão Periférica Sul-rio-grandense (CARRARO, 1974), constituída por litologias arenosas da sequência sedimentar. Na Bacia do Paraná, esses solos arenosos ocorrem e têm coesão mínima; portanto, são mais suscetíveis ao processo erosivo. A voçoroca estudada está localizada próxima à foz da Bacia do Areal do Limeira e possui aproximadamente 920 metros de comprimento e 250 metros de largura, ocupando uma área de 6,53 ha.

A área da Barragem do Areal apresenta precipitação média anual em torno de 1.500 a 1.700 mm, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano (ROSSATO, 2011) e predominância de chuvas frontais bem distribuídas espacialmente com menor intensidade que as chuvas convectivas (MONTEIRO, 1963; ROSSA, 2011).

A vegetação circundante consiste predominantemente em plantações de eucalipto para produção de celulose. As áreas escolhidas para o plantio dessa espécie exótica foram aquelas com maior fragilidade ambiental, devido ao seu menor preço, como as áreas onde ocorrem voçorocas (MARCHIORI e ALVES, 2010; SUERTEGARAY e MORELLI, 2010).



#fig1en.jpg

Figura 1 - Localização da Voçoroca Areal

## MATERIAIS E MÉTODOS

O VANT multi-rotor, modelo Phantom 4, utilizado para levantamentos planiarquimétricos foi desenvolvido pela empresa DJI. Um sensor de câmera digital, modelo FC330 com resolução spectral RGB, foi acoplado ao UAV. Este tipo foi desenvolvido pela mesma empresa e possuía distância focal de 3,61 mm, resolução aproximada de 12 MP e receptor de código GPS de CA, com precisão aproximada de 5 m.

A pesquisa realizada em 10 de agosto de 2018 durou aproximadamente 14 minutos e abrangeu uma área total de 67 ha, a uma altitude de 150 m. As 306 imagens obtidas apresentaram uma sobreposição latitudinal e longitudinal de 85%. A altura de voo foi definida de acordo com a capacidade da bateria do

VANT e também mantendo uma altura segura para o equipamento devido às árvores de grande porte na área de mata cerca ao barranco. Para auxiliar o processo dos dados, foi possível controlar os pontos de controle sozinho, utilizando um GPS geodésico, modelo Ruide 90 com receptor L1/L2 com precisão centimétrica, utilizando o método estático relativo, descrito por Seben et al. (2010), onde foi utilizado um tempo de triagem de 30 minutos para cada ponto. A demarcação dos GCPs foi feita com o uso de tinta branca para traçar um alvo de cerca de 1. 5m para serem exibidos no software de processamento de imagem Agisoft Photoscan para posterior correção do modelo. O erro quadrático médio calculado para as GCPs foi de 72,72 cm, com erro planimétrico de 72,48 cm e erro de altimetria de 5,84 cm. A área de interesse foi percorrida em quase toda a sua extensão com más de 9 fotografias do mesmo ponto e com vistas diferentes.

Uma vez que as imagens foram obtidas usando o UAV, as operações fotogramétricas digitais foram realizadas no Agisoft Photoscan, especialmente as tecnologias Structure from Motion (SfM) e Clustering View for Multi-view Stereo (CMVS). Esse conjunto de tecnologia de baixo custo para reconstrução topográfica de alta resolução permite a criação de modelos 3D e nuvens de pontos a partir de uma série de fotos 2D sobrepostas tiradas de diferentes pontos de vista (FURUKAWA et al., 2010; SCHONBERGER; FRAHM, 2016; TURNER; LUCIER ; WATSON, 2012; WESTOBY et al., 2012).

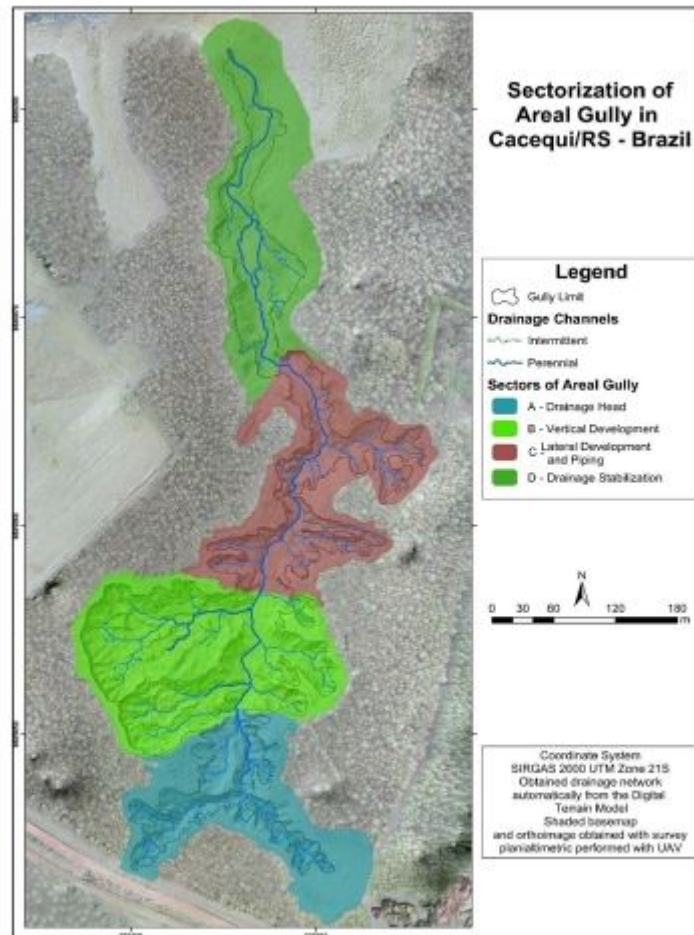
Com os dados obtidos no processo SfM-CMVS, a nuvem de pontos foi interpolada no mesmo software, criando uma rede triangular irregular (TIN), correspondente ao Modelo Digital de Superfície da área de estudo. O procedimento resultou em um DSM com resolução de 12,6 cm/pixel com média de 63,3 pontos per meter quadrado.

Para gerar um Modelo Digital de Terreno (DTM), foi usado a ferramenta Classify Ground Points do software Agisoft Photoscan, classificando os pontos da nuvem de pontos que correspondem à superfície real. Neste ferramenta, os parâmetros do ângulo máximo do terreno foram fixados em 30, a variação máxima de elevação em 0,2 m em um determinado espaço do terreno e o tamanho máximo da célula onde não há pontos de superfície de 60 metros.

Para facilitar o entendimento dos mecanismos erosivos do Areal voçoroca, o mesmo foi dividido em quatro setores distintos, de acordo com características morfométricas e processos ativos utilizando o software ArcGIS 10.7. O limite dos diferentes setores foi estabelecido para integrar dentro dos setores as principais áreas de avanço da Barragem do Areal, apresentadas por Rademann e Trentin (2020), sem dividir a mesma área de avanço em mais de um setor.

## RESULTADOS

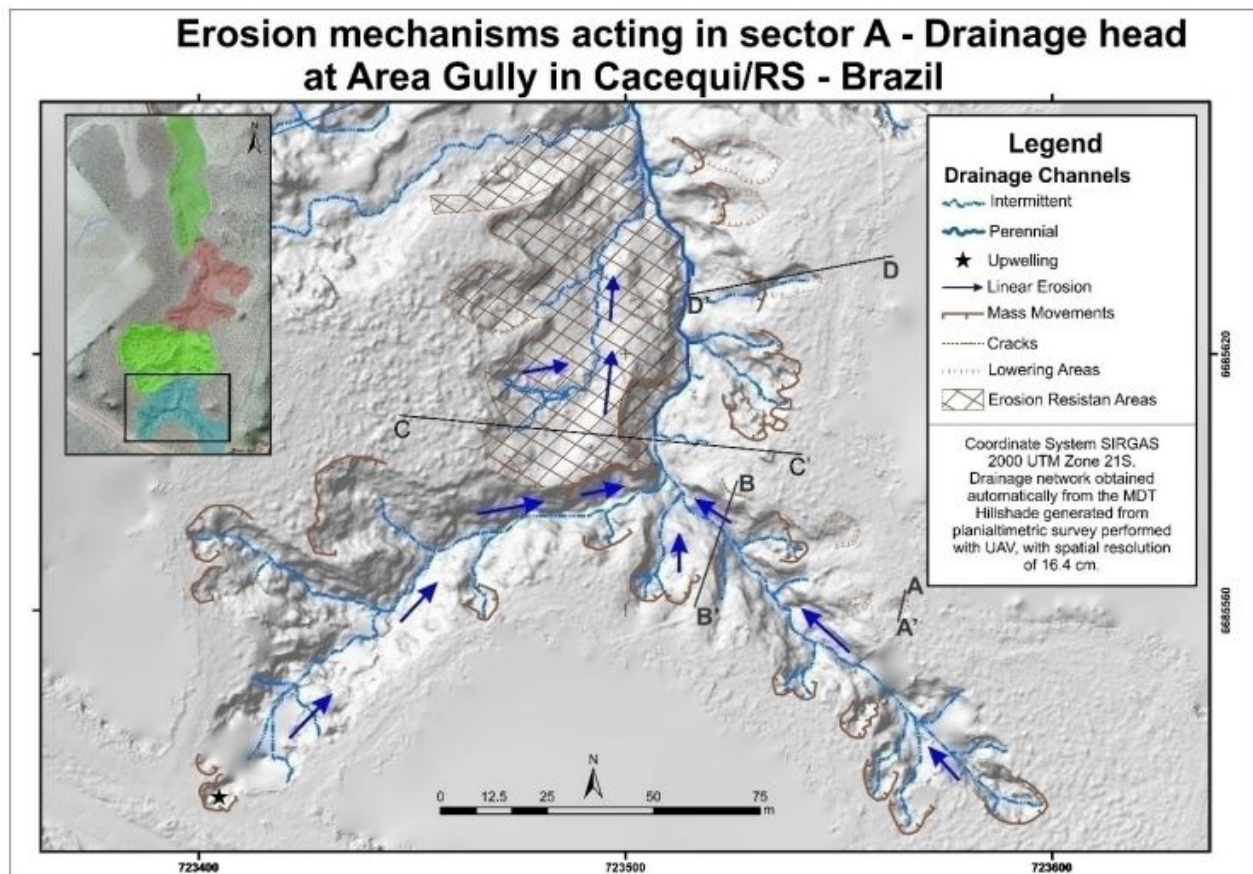
Devido à grande extensão da Voçoroca Areal e ao estudo detalhado realizado, foram definidos quatro diferentes setores da Voçoroca considerando os diferentes mecanismos da Voçoroca (Figura 2). Os setores foram definidos como: A - Cabeça de drenagem; B - Desenvolvimento Vertical; C - Desenvolvimento Lateral e Tubulação; e D - Estabilização da drenagem.



#fig2en.jpg

Figura 2 - Setores da Voçoroca Areal no Sul do Brasil.

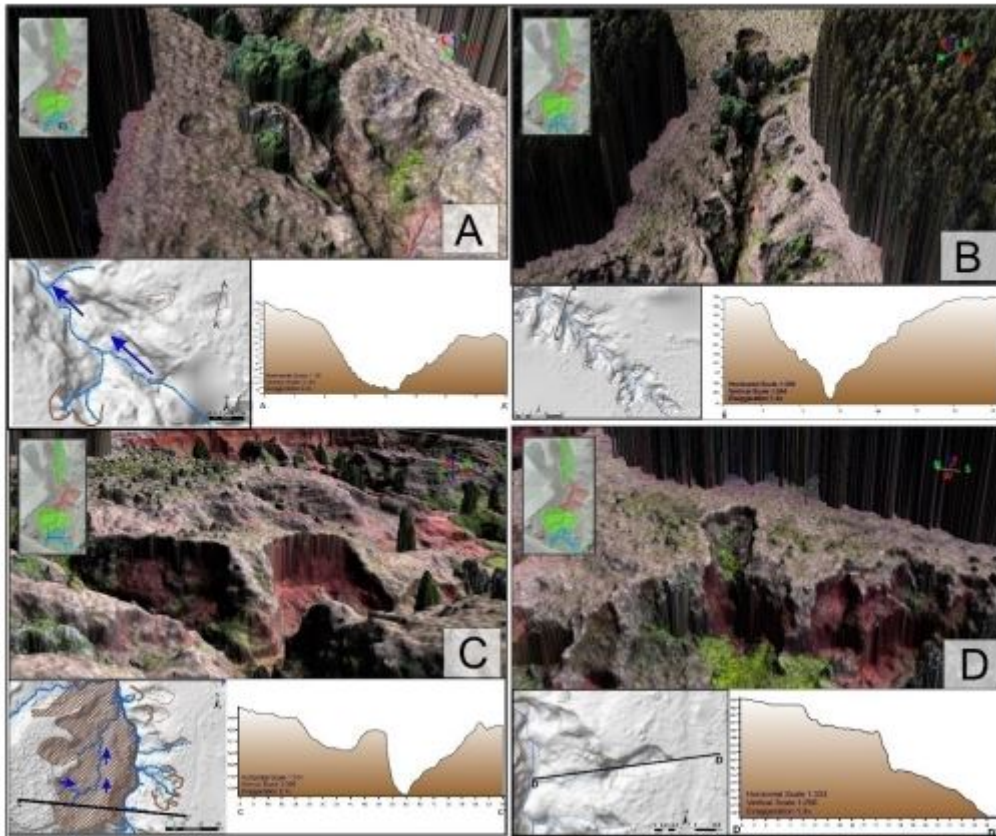
O setor de drenagem das cabeceiras (Setor A) está localizado na porção de montante da voçoroca, com predominância de movimentos de massa nas áreas de avanço e erosão linear no canal da base da voçoroca. Destaca-se também uma área de resistência à erosão na margem oeste da voçoroca (Figura 3).



#fig3en.jpg

Figura 3 - Mapa dos mecanismos erosivos em operação no setor A da Voçoroca do Areal.

Este setor possui 23 vestígios de movimentos de massa, 7 fissuras e 9 áreas de rebaixamento. O setor apresenta duas ramificações principais, predominância de movimentos de massa como forma de avanço lateral, e na ramificação da margem direita da voçoroca, bem como a ocorrência de áreas de rebaixamento.



#fig4en.jpg

Figura 4 - Representação esquemática dos mecanismos atuantes no setor A (A - Área de Rebaixamento; B - Erosão Linear; C - Porção Resistente à Erosão; D - Rebaixamento seguido de movimento de massa).

A interseção das duas ramificações do setor inclui uma área resistente à erosão na margem esquerda. Essa área apresenta declives mais suaves, área de rebaixamento e área de movimentação de massa próxima ao canal principal da voçoroca. Ainda, na ramificação da margem leste do setor, o rebaixamento com formato semicircular e desconectado da rede de drenagem de ravinas pode ser observado na Figura 4A, representado pelo perfil AA'.

A retirada de material do subsolo, denominado piping, tem ocasionado a formação de depressões, que podem evoluir para pequenas dolinas e até estar associadas a movimentos de massa (BERNATEK-JAKIEL; POESEN, 2018). A Voçoroca do Areal tem um degrau com pouco mais de um metro de profundidade e indica a existência de processos erosivos em subsuperfície. A feição representada pelo perfil AA' indica um avanço da voçoroca com ação erosiva subterrânea associada à ocorrência de movimentos de massa.

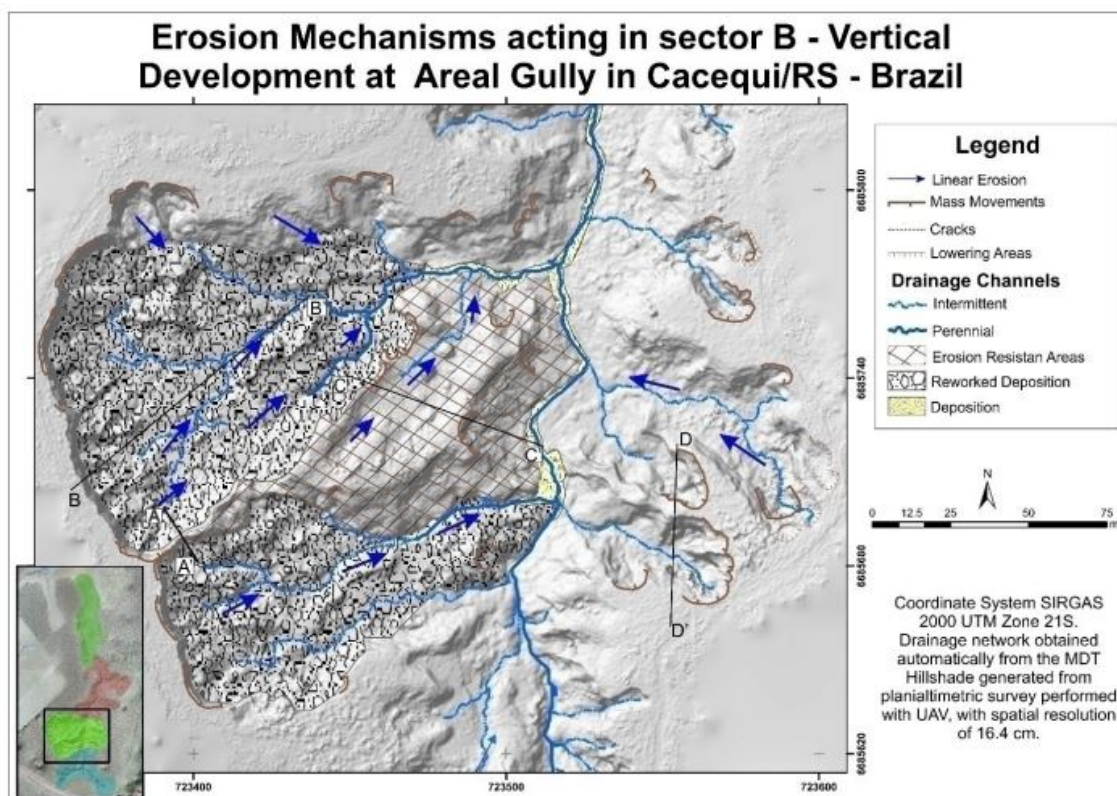
A erosão linear ocorre de forma intermitente neste setor, concentrando o fluxo nas áreas mais baixas e carregando o material erodido a jusante, representado na seção transversal da Figura 4B. A erosão linear neste setor ocorre com a formação de vales em forma de V, com paredes abruptas com mais de 10 metros de altura, seguindo orientação preferencial, o que sugere controle estrutural nestas áreas. As paredes verticais desta porção da ravina também facilitam os movimentos de massa, evidenciados pela ocorrência de fissuras no topo da ravina.

A área resistente à erosão (Figura 4C) apresenta continuidade de relevo e vegetação em relação ao entorno de menor declividade. Essa feição é mais resistente à erosão e possui algumas áreas mais baixas no centro, formando porções côncavas convergentes, conforme observado no perfil topográfico CC'. Essas porções favorecem o escoamento superficial e a concentração do fluxo, aumentando tanto a erosão quanto a incisão na encosta. Próximo ao canal principal da voçoroca, movimentos de massa com grande intensidade ainda formam paredes verticais de mais de 10 metros de altura, com base no nível do lençol freático da voçoroca. Também no setor A, principalmente na margem direita do canal principal, são

comuns áreas de rebaixamento seguidas de movimentação de massa, conforme esquematizado na Figura 4D.

Próximo à cabeceira da voçoroca, ocorrem rebaixamentos semicirculares, com profundidades de 1 a 3 metros. Esses rebaixamentos podem estar associados à alteração textural do solo, com aumento de argilas no horizonte B. Mais abaixo, um novo degrau se forma com a presença de camadas argilosas na rocha sedimentar e está na base dos movimentos de massa. Em geral, o processo erosivo no setor A é bastante ativo, apresentando uma grande variedade de mecanismos, tanto superficiais como subsuperficiais.

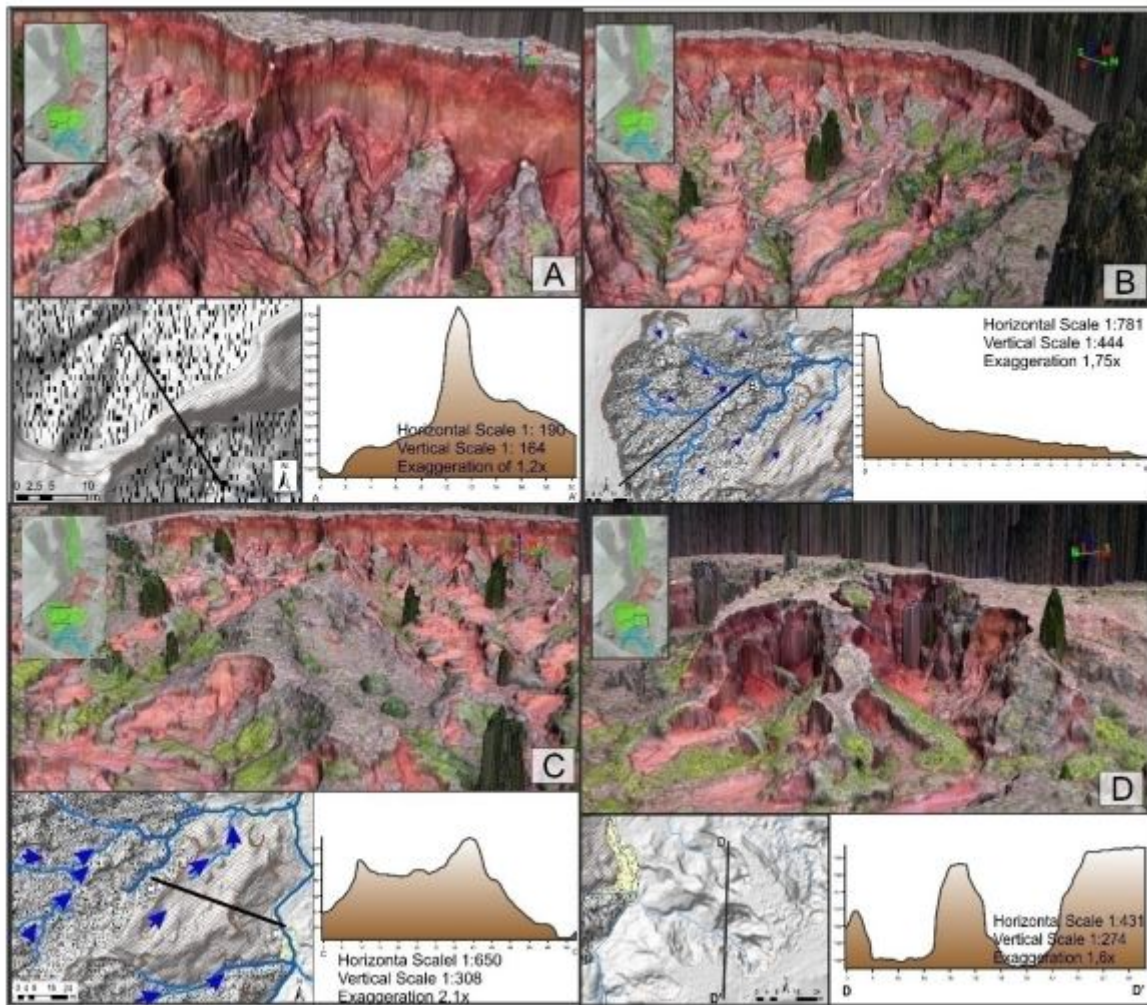
O Setor B da Barragem do Areal apresenta 31 feições de movimentos de massa, 3 trincas e 4 áreas de rebaixamento. É a parte da voçoroca que apresenta o maior volume erodido, com grandes ocorrências de movimentos de massa de grande intensidade. Devido ao grande material erodido e depositado na base, o setor possui uma grande área de jazidas retrabalhadas. Possui também áreas de deposição de material e uma área mais resistente à erosão no centro do setor (Figura 5).



#fig5en.jpg

Figura 5 - Mapa dos mecanismos erosivos em operação no setor B da Voçoroca do Areal.

Apesar da predominância de mecanismos erosivos com desenvolvimento vertical neste setor, verifica-se a ocorrência de linhas resistentes à erosão, representadas no esquema da Figura 6A. Formadas entre duas grandes áreas de avanço vertical, têm mais de 9 metros de altura e cerca de 2 metros de largura. Essas feições conectam o embasamento central do setor, mais resistente à borda da voçoroca, evidenciando a existência de material menos erodível em alguns trechos da voçoroca.



#fig6pt.jpg

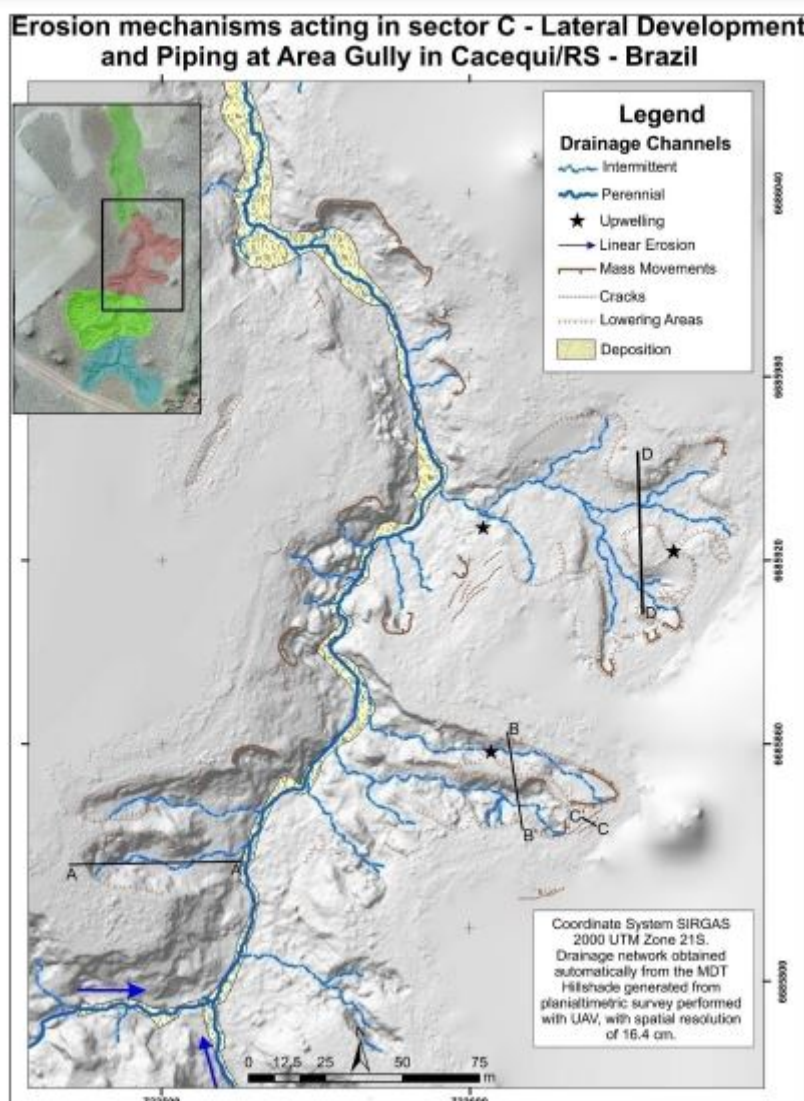
Figura 6 - Representação esquemática dos mecanismos atuantes no setor B (A - Linha resistente à erosão; B - Área de desenvolvimento vertical; C - Área resistente à erosão; D - Área de ocorrência de intensos movimentos de massa).

A principal característica deste setor é o desenvolvimento vertical da voçoroca, com profundidade de aproximadamente 25 metros, apresentando paredes abruptas e muito inclinadas, conforme mostra a Figura 6B. Essas paredes abruptas representam um grande avanço erosivo, onde a borda da voçoroca é marcada por uma sequência de semicírculos demonstrando a ocorrência de movimentos de massa, resultando em um grande volume de material erodido. Como resultado, na base da encosta, é possível observar uma grande quantidade de sedimentos de movimentos de massa passados, formando uma área de deposição.

Uma porção mais resistente à erosão ocorre no centro da voçoroca (Figura 6C). Este trecho forma uma feição rebatida em relação ao entorno devido à erosão diferencial, onde ocorrem processos menos intensos, que é a erosão predominantemente linear na parte central da feição, onde ocorre um pequeno rebaixamento, formando um talude convergente. A margem direita do setor apresenta movimentos de massa de grande magnitude onde a voçoroca é mais ativa, formando pequenas ramificações com declives superiores a 12 metros, com paredes abruptas e pequenos canais de drenagem intermitentes na base, conforme Figura 6D.

Assim, o setor B da voçoroca apresenta grandes amplitudes altimétricas, com os mecanismos erosivos atuando de forma acentuada resultando em um grande volume de material erodido. Parte desse material está depositado na base da voçoroca formando áreas de material inconsolidado que é retrabalhado pela erosão linear, circundado por pequenos pináculos de porções de rocha mais resistentes. É um setor onde a ravina avança, com um desenvolvimento vertical característico, formando paredes abruptas.

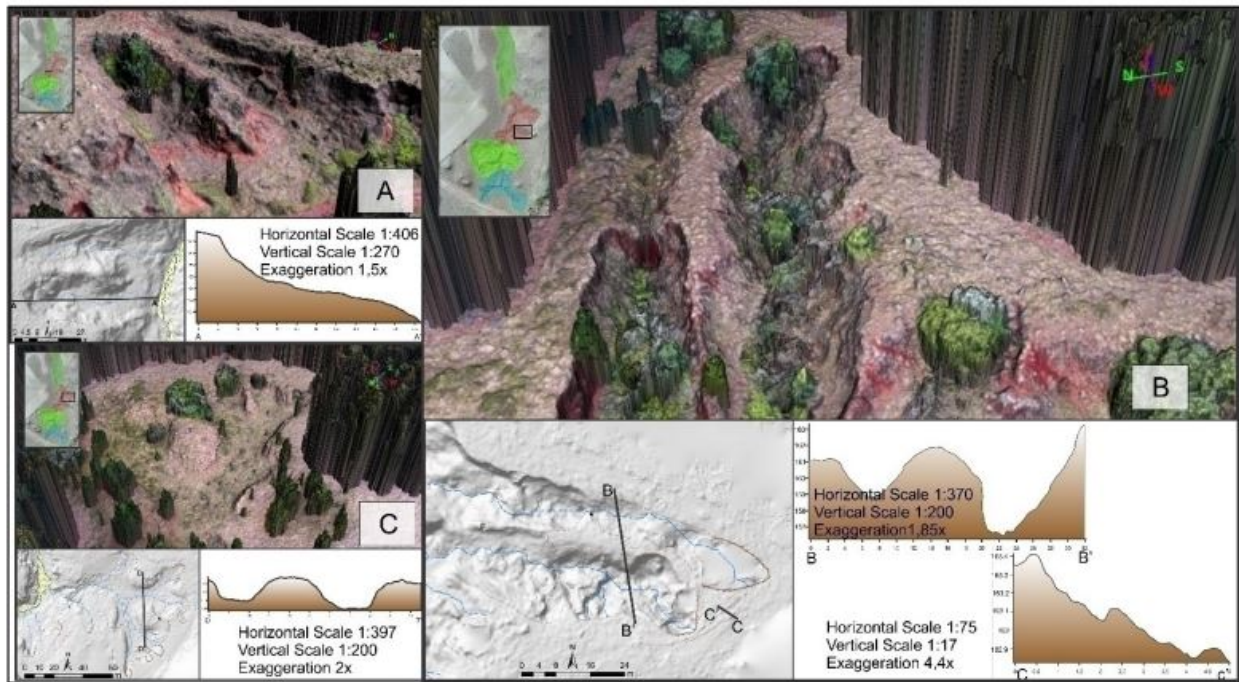
O setor C da voçoroca, localizado no terço inferior da voçoroca (Figura 7), apresenta diversas ramificações e áreas de avanço lateral, com 19 áreas de movimentos de massa, 22 trinças e 18 áreas de rebaixamento. O grande número de áreas de rebaixamento em relação aos demais setores é um indicativo de maior atuação do mecanismo de tubulação responsável pela remoção de material do subsolo e, conseqüentemente, formando áreas de rebaixamento.



#fig7pt.jpg

Figura 7 - Mapa dos mecanismos erosivos em operação no setor C da Voçoroca do Areal.

Um dos mecanismos erosivos mais comuns neste setor de voçorocas são os rebaixamentos (Figura 8A), onde uma grande área com borda semicircular solapa, formando uma área convergente, de perfil suavizado, sem a ocorrência de paredes verticais, e o estabelecimento de canais intermitentes no centro.



#fig8pt.jpg

Figura 8 - Representação esquemática dos mecanismos atuantes no setor C (A - Área de rebaixamento; B - Ramos paralelos associados ao rebaixamento e áreas de formação de trincas; C - Área de rebaixamento).

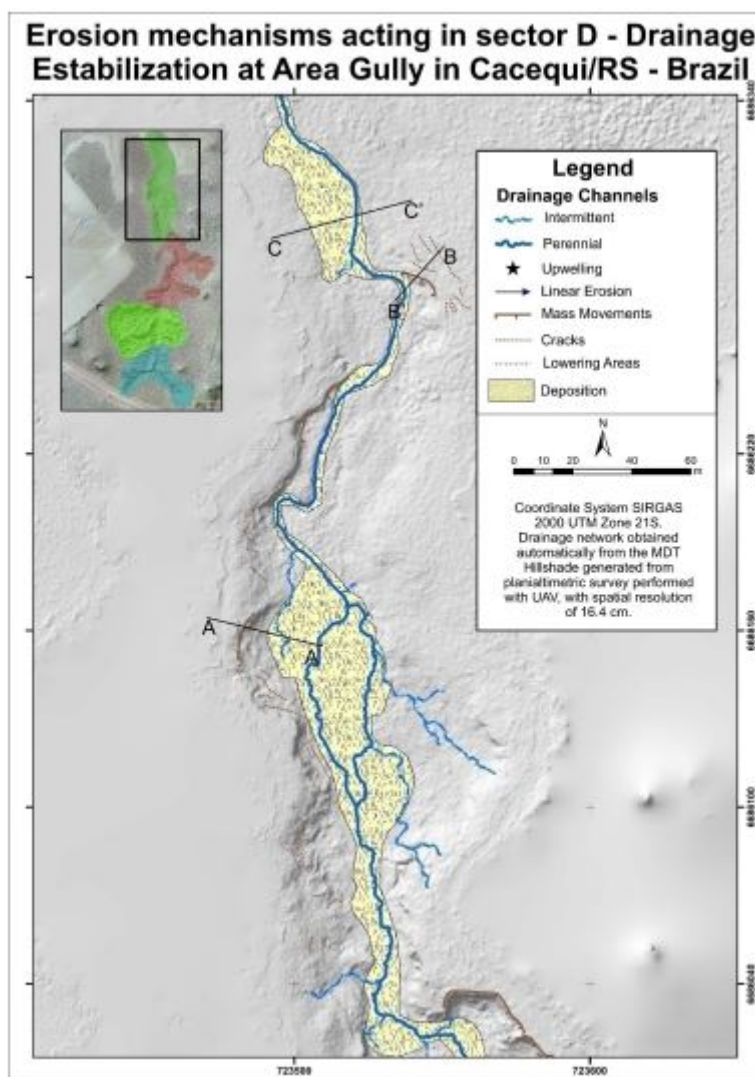
A ocorrência desses rebaixamentos pode estar associada à existência de lentes de rocha mais argilosas na base, favorecendo a erosão subterrânea nesses pontos. Esses pontos de rebaixamento formam uma feição convergente que favorece o escoamento superficial da água, concentrando a umidade e tornando mais comum a vegetação nessas áreas, conforme pode ser observado na Figura 8A.

A margem direita do setor contém duas ramificações paralelas e de formato linear (Figura 8B), que se encontram entre 3 e 7 metros de profundidade. Os dois ramos são divididos por uma pequena faixa de terreno com menos de 10 metros de largura (Perfil BB', Figura 8B), onde ocorrem processos de erosão hídrica e pequenos movimentos de massa, contribuindo para o recuo desta porção de terreno e uma possível junção das ramificações.

A atividade de movimentos de massa nesta área é observada na formação de fissuras a montante da feição, representada no perfil topográfico CC' da Figura 8B. Nesta porção do setor de voçorocas, a ocorrência de ressurgência evidencia a ação da erosão subterrânea.

Mais a jusante na voçoroca, ramificações de características distintas são um maior alargamento da feição e menor profundidade, atingindo cerca de 3 metros de profundidade, conforme mostra o perfil topográfico DD' da Figura 8C. A base da voçoroca neste trecho apresenta fundo plano, possivelmente devido à presença de mais lâminas de litologia argilosa próximas à superfície. A área da cabeceira também apresenta um pequeno avanço da ramificação através de pequenos movimentos de massa.

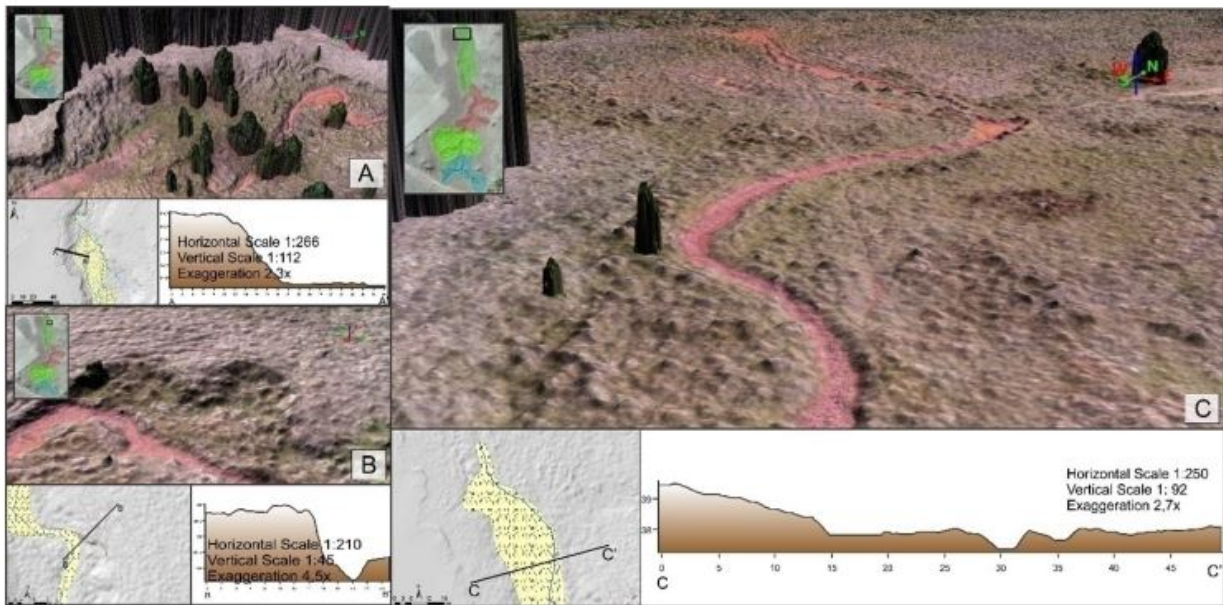
O setor D está localizado na porção mais a jusante da voçoroca (Figura 9), caracterizado pela estabilização da voçoroca, contendo apenas cinco sinais de movimentos de massa, e um de rebaixamento, mas com maior ocorrência de fissuras, totalizando 33. Neste setor, o canal principal já está bem estabelecido, com áreas de deposição próximas ao canal e o principal mecanismo é a deposição; no entanto, as paredes laterais ainda exibem mecanismos de erosão.



#fig9en.jpg

Figura 9 - Mapa dos mecanismos erosivos em operação no setor D da Voçoroca do Areal.

Embora o setor seja caracterizado pela estabilização da voçoroca e esteja localizado na porção mais baixa, ainda é possível observar o mecanismo de movimentação de massa atuando no desenvolvimento da voçoroca. Estes movimentos de massa ocorrem junto à parede da voçoroca, junto ao canal principal, com cerca de cinco metros de altura (Figura 10A), tendo na sua base uma grande quantidade de material depositado resultante da erosão a montante. São movimentos de massa mais suaves, pela proximidade com o nível de base, mas que contribuem para o avanço da voçoroca. Frequentemente, esses movimentos de massa estão associados ao desmoronamento da base da encosta.



#fig10pt.jpg

Figura 10 - Representação esquemática dos mecanismos erosivos atuantes no setor D (A - Movimentos de massa; B - Pequenos movimentos de massa e fissuras associadas; C - Área plana).

Mais a jusante no setor, ocorrem pequenos movimentos de massa, com aproximadamente dois metros de altura, como mostra o perfil BB' da Figura 10B. A par destes movimentos de massa, surgem também no relevo várias fissuras e pequenas saliências, de algumas dezenas de centímetros.

Este setor, assim como a parte mais baixa da Voçoroca do Areal, é onde predominam os processos de gradação, com deposição de material e achatamento do relevo, conforme pode ser observado na Figura 10C. Na porção final da voçoroca estabelece-se um canal de drenagem perene, circundado por áreas de deposição de material e áreas planas, sem a presença de paredes escarpadas, caracterizando-se como um canal de primeira ordem e sendo assim o final da área de vociferantes. , o setor D da voçoroca apresenta movimentos de massa mais suaves, menos expressão e menos material erodido, principalmente por sua proximidade com o nível de base. Predomina no setor a deposição de material fino devido à erosão a montante e estabilização do canal de drenagem, conectando-se com a rede fluvial da bacia do rio Areal do Limeira.

## DISCUSSÃO

O mapeamento de voçorocas de alta resolução e precisão refinada, como os modelos obtidos por meio de levantamentos de VANT e o uso de técnicas SfM para modelagem topográfica, permitem a identificação e espacialização das características dos processos erosivos. Permitindo então o detalhamento dos diferentes tipos de avanços e mecanismos associados à voçoroca, desta forma podem ser definidos os principais tipos de evolução. Os mecanismos erosivos predominantes na voçoroca estão relacionados aos movimentos de massa, que são os principais agentes controladores do avanço lateral e vertical da voçoroca, principalmente nas porções superiores da voçoroca. Nas porções do terço inferior, predominaram movimentos e rebaixamentos de massa relacionados ao contato de lentes de rocha arenosa com lentes mais argilosas.

Uma análise mais aprofundada dos mecanismos erosivos da voçoroca em seus diferentes setores permite entender o andamento dos processos erosivos e é muito beneficiada pelo uso de levantamentos topográficos de alta resolução, conforme descrito neste trabalho, com medições físicas (profundidades, larguras, volumes). Existem várias aplicações e estudos que indicam o potencial do uso de levantamentos topográficos de alta resolução para analisar mecanismos de erosão (PEOESSEN, et al, 2003; SMITH et al., 2015; KOCI et al, 2019).

A voçoroca areal possui uma dinâmica complexa, com uma variedade de mecanismos de erosão ativos e com diferentes intensidades em diferentes setores. O mapeamento e a compreensão desses mecanismos só foram possíveis com a obtenção de dados de altíssima resolução, que permitiram diferenciar pequenas mudanças na dinâmica da voçoroca.

A utilização do VANT e do algoritmo SfM-CMVS permitiu a identificação, mapeamento e compreensão dos mecanismos erosivos na área de estudo. Essas ferramentas de análise têm grande potencial para serem utilizadas no mapeamento da erosão, por ser uma técnica de baixo custo para fácil aquisição de dados que abre possibilidades para análises extremamente detalhadas dos fenômenos. Visando especificamente o SfM, vários são os benefícios apontados, como ortofotomosaicos de alta resolução que podem ser utilizados para avaliar a cobertura do solo, medições físicas, avaliação de mecanismos de erosão sendo muito valioso para elementos de manejo, além de custos menores quando comparados a obtenção desses produtos por meio de outros sensores (OUÉDRAOGO et al, 2014; BARTLEY et al 2016; GLENDELL et al 2017).

Apesar do seu potencial, estas ferramentas ainda apresentam algumas limitações e desafios. Destacando as limitações, podemos citar a complexa estrutura e padrão da vegetação presente nos mapeamentos, o que afeta negativamente a precisão do modelo. As aplicações metodológicas são fundamentais para a precisão do modelo, pois embora as etapas sejam relativamente simples, existem muitas incertezas quanto à metodologia ideal a ser aplicada em cada mapeamento, em cada tipo de paisagem ou aplicação. O volume de dados, imagens capturadas, é alto, o que requer um espaço de armazenamento significativo e, principalmente, muito processamento computacional para gerar os produtos (JAMES & ROBSON, 2012; SMITH et al, 2015; ELTNER et al, 2016; CLAPUYT et al, 2016; al. al, 2016; al, 2016; MARZOLFF & POESEN, 2009).

A vegetação arbustiva é comum no Voçoroca Areal, e alguns pontos, principalmente nas cabeceiras que possuem maior concentração de umidade, contém árvores de grande porte que causam interferência no modelo gerado com o algoritmo SfM-CMVS, necessitando de correções. O problema da vegetação, conforme descrito por Marzolf & Poesen (2009), pode ser mitigado com a utilização de um método híbrido de extração automática e interativa de feições por meio de filtros, removendo os pixels da vegetação, e em áreas onde há intensa nuvem de vegetação pontual, é necessária uma correção manual que requer cuidado para não retirar muitos pontos e alterar a forma do terreno no MDT resultante.

Vários estudos foram desenvolvidos para corrigir ou ajustar esses erros e limitações no uso do UAV e do algoritmo SfM-CMVS. A principal solução encontrada pelos pesquisadores é realizar mais de um voo em que a câmera acoplada ao UAV tenha diferentes ângulos zenitais. Ou, ainda, tirar fotos no solo com equipamentos fotográficos em áreas de difícil cobertura de voo e alimentar o software com essas informações (D'OLEIRE-OLTMANN et al., 2012; STÖCKER et al., 2015; STUMPF et al., 2015; FRANKL et al., 2015). Ainda são necessários mais estudos sobre a aplicação desses métodos no estudo das voçorocas.

Além disso, muitas vezes ocorrem sombras próximas às paredes da ravina, dependendo da posição do sol, problema de difícil solução e que causa ruídos no modelo. Uma forma de amenizar esse erro é fazer voos ao meio-dia, quando a incidência de luz solar está mais próxima do zênite.

O Setor A é marcado por atividade erosiva, tanto superficial quanto subsuperficial, com a formação de duas grandes ramificações de avanço a montante da encosta. Conforme observado por (KIRKBY; BRACKEN, 2009) a porção superior da voçoroca com maior erosão linear auxilia na expansão da voçoroca, pois o material não se deposita nessas áreas, favorecendo o avanço por erosão em poças, erosão lateral e movimentos de massa. O desenvolvimento da voçoroca é evidente no topo da encosta e o alargamento das ramificações por movimentos de massa.

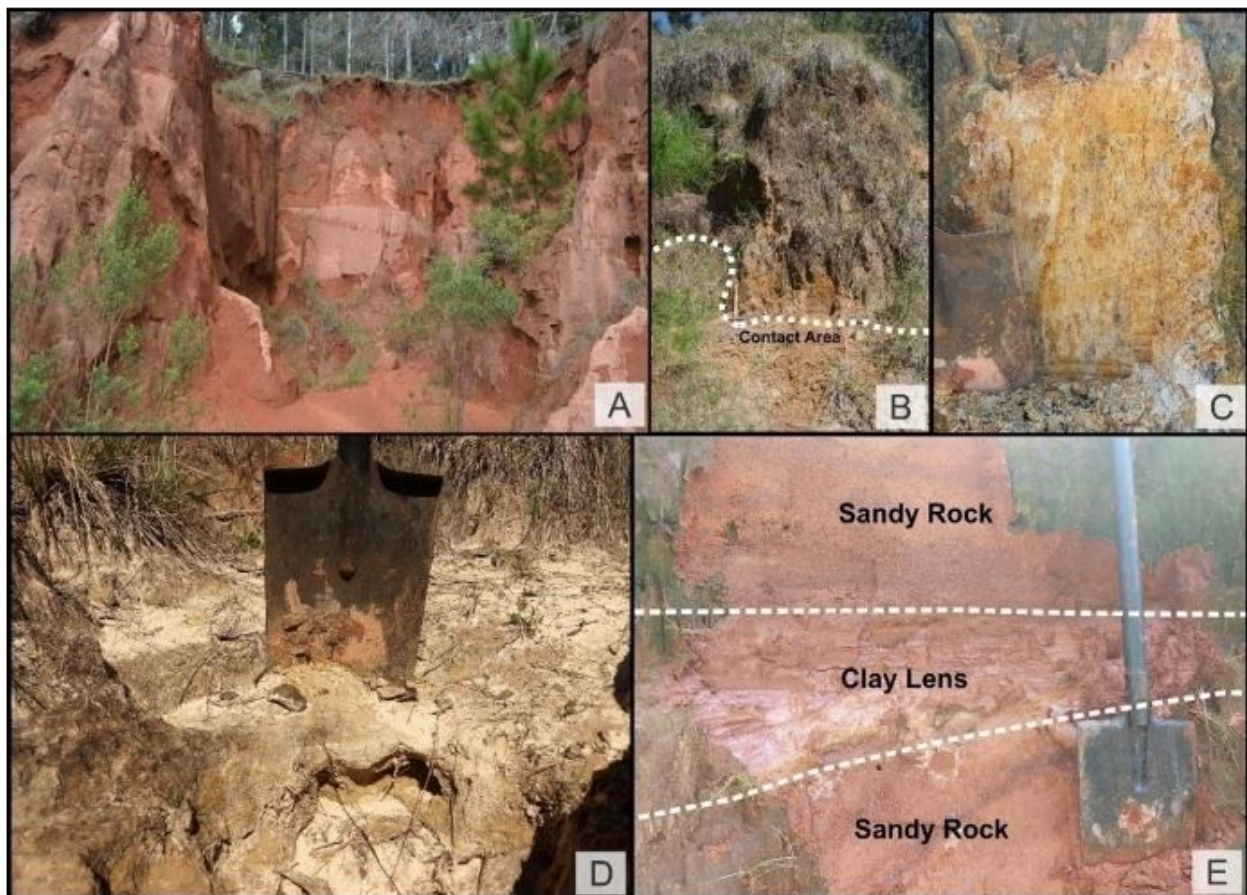
O setor B apresenta grande avanço erosivo, onde os movimentos de massa são bastante ativos, marcando uma área de avanço tanto lateral quanto vertical. Essa predominância de movimentos de massa também foi observada na Nova Zelândia (BETTS et al., 2003; PARKNER et al., 2006) e na Espanha (MARTÍNEZ-CASASNOVAS et al., 2009; WIJDENES et al., 1999), onde esses processos são responsáveis por até 90% da produção de sedimentos de uma voçoroca (BETTS et al., 2003). Como pode ser visto na Figura 11A, a

ocorrência constante de movimentos de massa dificulta o estabelecimento da vegetação na base e nas paredes da voçoroca. As atividades dos mecanismos de erosão também são evidenciadas pela grande quantidade de material inconsolidado na base. Esse mecanismo está intimamente relacionado às condições do solo, clima e características da encosta onde a voçoroca está localizada (ABER et al., 2019; ZEGEYE et al., 2020).

O setor C contém mais feições associadas ao mecanismo de erosão subsuperficial, e as áreas de avanço de voçorocas não apresentam um desenvolvimento vertical tão intenso, formando vales em forma de U. Há indícios de uma lâmina mais argilosa no substrato litológico relativamente próximo à superfície. Nessas áreas, forma-se um contato entre litologias com diferentes texturas, as mais arenosas no topo e logo abaixo uma lâmina argilosa, conforme mostra a Figura 11 B.

Nas áreas de contato da litologia mais arenosa com as lentes argilosas, a perda da cor avermelhada da rocha na porção mais arenosa (Figura 11, D) resulta da lixiviação de material mineral nas áreas de emergência por um longo período de tempo. Na porção mais argilosa, a feição mosqueada identificável (Figura 11, C) deve-se à grande disponibilidade hídrica nesta porção.

Assim, o setor C apresenta maior atividade de erosão subsuperficial com a ocorrência do mecanismo de rebaixamento e evidenciado pela ressurgência. O desenvolvimento lateral da voçoroca é maior que o vertical, tanto pela localização do terço inferior da encosta, mais próximo do nível da base, diminuindo o poder erosivo, quanto pela existência de lentes argilosas mais impermeáveis que dificultam a expansão vertical.



#fig11pt.jpg

Figura 11 - A - Ocorrência de movimentação de massa no setor B da Voçoroca do Areal; B - Área de contato da porção mais arenosa da rocha com a porção mais argilosa; C - Aspecto mosqueado de lâmina de rocha argilosa alterada; D - Porção arenosa da encosta com perda de cor; E - Alternância de lentes rochosas com diferentes características na Barragem do Areal.

Por muito tempo, e em diversos estudos, o conceito de voçoroca esteve vinculado à ação da erosão hidráulica, sendo a erosão superficial o principal agente erosivo dessas feições (BERGONSE; REIS, 2011). No entanto, estudos recentes sugerem que os mecanismos de erosão em voçorocas são mais complexos, tendo como principal agente os movimentos de massa (MARTINEZ-CASANOVA et al., 2003; BERGONSE; REIS, 2011; BETTS; TRUSTRUM; ROSE, 2003; DE AP BACELLAR; NETTO; LACERDA, 2005; MARDEN et al., 2018).

Os trabalhos realizados na Barragem do Areal mostram que o principal mecanismo erosivo atualmente é o movimento de massa associado à erosão subsuperficial e à formação de tubulações. Esses mecanismos atuam na voçoroca tanto no alongamento da feição quanto no recuo do headcut a montante no talude, gerando um grande volume de material erodido, através de enormes e únicas feições semelhantes ao conceito de geomorfologia badass descrito por Phillips (2015). e usado por Marden et al. (2018) para descrever grandes ratazanas na Nova Zelândia.

A maior ocorrência de movimentos de massa e áreas de subsidência em Voçoroca ainda não são bem compreendidas. Em diferentes porções da voçoroca, lentes de rocha mais argilosa no meio da litologia arenosa (Figura 11E) formam descontinuidades e são capazes de desencadear diferentes mecanismos de erosão. Conforme observado por Wijdenes et al. (1999) em voçorocas no sudoeste da Espanha, aqueles com solos contendo um horizonte textural B eram mais propensos à ocorrência de movimentos de massa e alcovas de regressão, como também encontrado no Areal Voçoroca. Assim, há evidências de grande interferência de fatores litopedológicos nos mecanismos erosivos da área de estudo, necessitando de estudos adicionais para maiores esclarecimentos.

## CONCLUSÃO

Vários estudos foram desenvolvidos para corrigir ou ajustar esses erros e limitações no uso do UAV e do algoritmo SfM-CMVS. A principal solução encontrada pelos pesquisadores é a realização de mais de um voo proporcionando à câmera acoplada ao VANT diferentes ângulos zenitais. As fotos também podem ser tiradas no solo com equipamentos fotográficos em áreas de difícil cobertura de voo e essas informações também alimentam o software (D'OLEIRE-OLTMANN et al., 2012; STÖCKER et al., 2015; STUMPF et al., 2015 ; FRANKL et al., 2015). Mais estudos sobre a aplicação desses métodos no estudo de voçorocas ainda são necessários.

No entanto, as ferramentas forneceram dados de qualidade suficientes para estudar os mecanismos erosivos da voçoroca Areal que possibilitaram a setorização da voçoroca. O mapeamento e identificação dos mecanismos erosivos fornecem dados para futuros estudos de gênese e mitigação do processo de voçorocamento que ocorre no local.

É importante destacar a existência de uma floresta plantada de eucalipto no entorno da Barragem do Areal. Essa cobertura vegetal tem impactos na dinâmica da voçoroca, diminuindo o escoamento superficial e aumentando a infiltração de água no solo. Entretanto, é necessário um estudo mais aprofundado dos reais impactos da silvicultura sobre os mecanismos erosivos.

O trabalho realizado evidencia que a ação dos mecanismos erosivos em uma voçoroca é complexa. Os diferentes setores possuem diversos fatores que influenciam os mecanismos que atuam sobre a erosão, bem como sua intensidade. O mapeamento dos mecanismos erosivos na Voçoroca Areal fez uso de novas tecnologias para mapeamento da erosão, abrindo oportunidades para diversos estudos e abordagens sobre o tema com uma nova perspectiva metodológica, ainda pouco explorada.

Os produtos gerados neste trabalho fornecem uma base de dados que tem potencial para auxiliar em trabalhos a desenvolver, servindo de base para o estudo da gênese da voçoroca, para a identificação das melhores medidas de mitigação, ou como enquadramento inicial para estudar a evolução desta feição erosiva.

Considerando que cada mecanismo erosivo possui uma forma específica para sua contenção, a delimitação desses mecanismos em nível extremamente detalhado pode facilitar um plano de manejo para a

Voçoroca Areal considerando essas peculiaridades da voçoroca. Com um manejo adequado, grande parte dos problemas econômicos e ambientais causados por uma voçoroca desse porte poderiam ser mitigados.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) que tornaram esta pesquisa possível

## Supplementary materials

Universidade Federal do Ceará. (docm)

## REFERÊNCIAS

- Aber, J.S., Marzloff, I., Ries, J.B., & Aber, SEW (2019). Monitoramento de Erosão de Voz. Imagem e Imagem Aérea de Pequeno Formato dos Emirados Árabes Unidos (pp. 259-271). Elsevier.
- AlbuquerqueFNB, de. (2006). Agentes, processos e feições erosivas em voçoroca conectada à rede de drenagem do Rio Coreau, Ceará. *Revista da Casa de Geografia de Sobral*, 8(1), 11–20.
- Cevada, ., Bainbridge, ZT, Lewis, SE, Kroon, FJ, Wilkinson, SN, Brodie, J.E. & Silburn, D.M. (2014). Relacionando impacto de sedimentos em recifes de coral com fontes, processos e gestão de bacias hidrográficas: uma revisão. *Ciência do Ambiente Total*, 468–469, 1138–1153.
- Oliveira, .; Oliveira, A.; Ribeiro, A.; Oliveira, A.; Ribeiro, D.; Oliveira, A.N.; Padeiro, B.A. (2016). Comparação de ferramentas para monitoramento e avaliação de mudança de canal; Relatório para o programa nacional de ciência ambiental; Reef and Rainforest Research Center Limited: Cairns, Austrália.
- Bergonse, RV, & Reis, EJ (2011). Restrições teóricas à pesquisa de erosão de voçorocas: Tempo para uma reavaliação de conceitos e suposições?: RESTRIÇÕES TEÓRICAS À PESQUISA DE EROSÃO DE GULLY. *Processos da Superfície da Terra e Formas de Retransmissão*, 36(11), 1554–1557.
- Bernatek-Jakiel, A., & Poesen, J. (2018). Erosão subterrânea por tubulação de solo: Sentido e necessidades de pesquisa. *Revisões da Ciência da Terra*, 185, 1107–1128.
- Betts, HD, Trustrum, NA, & Rose, RCD (2003). Mudanças geomórficas em um complexo sistema de vozes medidas a partir de modelos digitais de elevação e implicações para o gerenciamento. *Processos da Superfície da Terra e Formas de Terra*, 28(10), 1043–1058.
- Cabral, ILL (2004) Depressões interfluviais e voçorocas articuladas à rede de drenagem: o exemplo das bacias dos rios Ibicuzinho, Areal do Paredão, Cacequi, Santa Maria e Ibicuí. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Cabral, ILL; Oliveira, J.; Cabral, T. L. (2009). Indicadores morfodinâmicos que sugerem movimentos neotectônicos nos rios Ibicuí/Jacuí - depressão periférica - RS. XII Congresso da Associação Brasileira de Estudos Quaternários.
- Carraro, CC (1974). Mapa Geomorfológico do Estado do Rio Grande do Sul. FAPERGS – UFRGS/ Instituto de Geociências. 1: 1.000.000.
- Oliveira, F.; Oliveira, V.; Van Oost, K. (2016). Reprodutibilidade de reconstruções de topografia terrestre baseadas em uav baseadas em algoritmos de estrutura de movimento. *Geomorfologia*, 260, 4–15.
- A.P. Bacellar, L., Netto, ALC, & Lacerda, WA (2005). Fatores controladores de voçorocas na Bacia Hidrográfica Maracujá, sudeste do Brasil. *Processos de Superfície Terrestre e Formas de Relé*, 30(11), 1369–1385.
- D'Oleire-Oltmanns, S., Marzloff, I., Peter, K., & Ries, J. (2012). Não Tripulado Veículo Aéreo (VANT) para Monitoramento de Erosão do Solo no Marrocos. *Sensoriamento Remoto*, 4(11), 3390–3416.
- Dong, Y., Xiong, D., Su, Z., Duan, X., Lu, X., Zhang, S., & Yuan, Y. (2019). As influências da falta de massa em erosão e nos processos hidráulicas de cortes de barrancos com base em um experimento de erosão in situ no vale seco e quente da China. *ATENA*, 176, 14–25.
- Drummond, FN (2006). Caracterização hidrossedimentológica e processos evolutivos de voçoroca na área de rochas gnáissicas do alto Rio das Velhas (MG). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 10.
- Oliveira, A.; Oliveira, A.; Oliveira, C.; Oliveira, G.; Oliveira, F.; Abellán, A. (2016). Reconstrução de superfície baseada em imagens em geomorfometria—Méritos, limites e desenvolvimentos. *Terra Surf. Dyn.*, 4, 359–389.

- Frankl, A., Stal, C., Abraha, A., Nyssen, J., Rieke-Zapp, D., De Wulf, A., & Poesen, J. (2015). Registro detallado da morfologia da ravina em 3D por meio de modelagem baseada em imagem. *CATENA*, 127, 92–101.
- Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S.M., & Szeliski, R. (2010). Rumo ao estéreo multivisualização em escala de Internet. 2010 Conferência da IEEE Computer Society sobre Visão Computacional e Reconhecimento de Padrões, 1434–1441.
- Gafurov, A.M. (2017). Utilização de veículo aéreo não tripulado para avaliação da erosão de uma voz. *Registros Acadêmicos da Universidade de Kazan, Série Ciências Naturais*, v. 159, pp. 654-667.
- Glendell, M., McShane, G., Farrow, L., James, M.R., Quinton, J., Anderson, K., Evans, M., Benaud, P., Rawlins, B., Morgan, D., Jones, L., Kirkham, M., DeBell, L., Quine, T.A., Lark, M., Rickson, J., & Brazier, R.E. (2017). Testando a utilidade da reconstrução da fotogrametria estrutural a partir do movimento usando pequenos veículos aéreos não tripulados e fotografia de solo para estimar a extensão da erosão apenas em terras altas: Veículos aéreos não tripulados e fotografia terrestre para estimar a erosão. *Processos da Superfície da Terra e Formas de Relé*, 42(12), 1860–1871.
- Gómez Gutiérrez, Á., Schnabel, S., Lavado Contador, F., De Sanjosé, J.J., Atkinson, ADJ, Pulido Fernández, M., & Sánchez Fernández, M. (2018). Estuando a influência da pressão do gado na erosão das ravinas em pastagens do sudoeste da Espanha por meio do fluxo de trabalho UAV+SfM. *Boletim da Associação de Geógrafos Espanhóis*, 78, 66–88.
- Gómez-Gutierrez, Á., Schnabel, S., Berenguer-Sempere, F., Lavado-Contador, F., & Rubio-Delgado, J. (2014). Utilização de métodos de foto-reconstrução 3D para estimar a erosão da barragem. *CATENA*, 120, 91–101.
- Hosseinalizadeh, M., Kariminejad, N., Chen, W., Pourghasemi, HR, Alinejad, M., Mohammadian Behbahani, A., & Tiefenbacher, JP (2019). Modelagem espacial de cortes de voçorocas usando dados de UAV e quatro conjuntos de classificadores de melhor primeira decisão (BFTree, Bag-BFTree, RS-BFTree e RF-BFTree). *Geomorfologia*, 329, 184-193.
- Jack Koci, J.; Jarihani, B.; Leon, JX; Sidle, RC; Wilkinson, SN; Bartley, R. (2017). Avaliação de UAV e estrutura baseada no solo a partir de movimento com fotogrametria estéreo multi-visão em uma bacia hidrográfica de savana. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 6, 328.
- James, MR; Robson, S. (2012). Reconstrução direta de superfícies 3D e topografia com uma câmera: Precisão e aplicação de geociências. *J. Geophys. Res. Terra Surf.*, 117, F03017.
- Kaiser, A., Neugirg, F., Rock, G., Müller, C., Haas, F., Ries, J., & Schmidt, J. (2014). Reconstrução de Superfície em Pequena Escala e Cálculo de Volume da Erosão do Solo na Morfologia Complexa de Ravinas Marroquinas Usando Estrutura de Movimento. *Sensoriamento Remoto*, 6(8), 7050–7080.
- Kirkby, MJ e Bracken, LJ (2009). Processos de voçorocas e dinâmica de voçorocas. *Processos de superfície terrestre e formas de relevo*, 34(14), 1841–1851.
- Koci, J., Sidle, RC, Jarihani, B., & Cashman, MJ (2019). Vinculando a conectividade hidrológica à erosão das ravinas em pastagens de savana tributárias da Grande Barreira de Corais usando fotogrametria de estrutura a partir do movimento. *Degradação e Desenvolvimento do Solo*.
- Liu, K., Ding, H., Tang, G., Na, J., Huang, X., Xue, Z., Yang, X., & Li, F. (2016). Detecção de Áreas Afetadas por Barrancos em Escala de Captação Usando Veículo Aéreo Não Tripulado (UAV) no Planalto Loess Chinês. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(12), 238.
- Marchiori, JNC, & Alves, FDS (2014). Campos de areia e silvicultura no oeste do Rio Grande do Sul: abordagem fitogeográfica. *Balduínia*, 0(23), 01–20.
- Marden, M., Fuller, IC, Herzig, A., & Betts, HD (2018). Voçorocas Badass: Complexos de voçorocas de movimento de massa fluvial na região da costa leste da Nova Zelândia e potencial para remediação. *Geomorfologia*, 307, 12–23.

- Martínez-Casasnovas, JA, Ramos, MC, & García-Hernández, D. (2009). Efeitos das mudanças de uso da terra na cobertura vegetal e erosão da parede lateral em uma ravina na região de Penedès (nordeste da Espanha). *Processos de superfície terrestre e formas de relevo*, 34(14), 1927–1937.
- Marzloff, I., & Poesen, J. (2009). O potencial do monitoramento 3D de voçorocas com GIS usando fotografia aérea de alta resolução e um sistema de fotogrametria digital. *Geomorfologia*, 111(1–2), 48–60.
- Mathias, DT, Cunha, CML, & de Carvalho, PF (2010). Avaliação de técnicas de monitoramento de processos erosivos acelerados na periferia urbana - São Paulo. VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física. por exemplo. 13.
- Nobajas, A., Waller, RI, Robinson, ZP e Sangonzalo, R. (2017). Muito de uma coisa boa? O papel das imagens detalhadas de UAV na caracterização das características de drenagem de terreno baldio em larga escala no sudeste da Espanha. *Jornal Internacional de Sensoriamento Remoto*, 38 (8–10), 2844–2860.
- Oliveira, MAT (2005) Processos Erosivos e Preservação de Áreas em Risco de Erosão por Voçorocas. Em AT Guerra, *Erosão e Conservação do Solo: Conceitos, Tópicos e Aplicações* (pp. 57-101). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- Ouédraogo, MM; Grau, A.; Debouche, C.; Lisein, J. (214). A avaliação da fotogrametria baseada em sistemas aéreos não tripulados e varredura a laser terrestre para gerar dems de bacias hidrográficas agrícolas. *Geomorfologia*, 339–355.
- Parkner, T., Page, MJ, Marutani, T., & Trustrum, NA (2006). Fatores de desenvolvimento e controle de voçorocas e complexos de voçorocas, Costa Leste, Nova Zelândia. *Processos da superfície terrestre e formas de relevo*, 31(2), 187–199.
- Peter, KD, d'Oleire-Oltmanns, S., Ries, JB, Marzloff, I., & Ait Hssaine, A. (2014). Erosão do solo em bacias hidrográficas afetadas por medidas de nivelamento do solo na Bacia de Souss, Marrocos, analisada por simulação de chuva e dados de sensoriamento remoto UAV. *CATENA*, 113, 24–40.
- Phillips, JD (2015). *Geomorfologia Badass: BADASS GEOMORPHOLOGY*. Processos da superfície terrestre e formas de relevo, 40(1), 22–33.
- Pinto, BL (2018). Dinâmica geomorfológica de voçorocas no município de Tucano - Bahia [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Sergipe.
- Poesen, J.; Nachtergaele, J.; Verstraeten, G.; Valentin, C. (2003). Erosão de voçorocas e mudança ambiental: Importância e necessidades de pesquisa. *CATENA*, 50, 91–133.
- Rademann, LK, & Trentin, R. (2020). Novas geotecnologias aplicadas ao estudo geomorfológico: Exemplo de morfometria da Voçoroca do Areal, Cacequi-RS. *GeoTextos*, 16(1).
- Robaina, LES; Neto, SF; Paula, PM; Pereira, VP (2002). Processo Erosivo Acelerado no RS: Voçorocamento no município de Cacequi. *Revista Geografia. Rio Claro*, v. 27(2), p. 109-120.
- Robaina, LES; Trentin, R. (2004). Degradação do solo: problema ambiental no Sudoeste Gaúcho. *Interface, Porto Nacional, TO*. v.1, n.1, p. 29-41.
- Rossato, MS (2011). Os climas do Rio Grande do Sul: Variabilidade, tendências e tipologia. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Schonberger, JL, & Frahm, J.-M. (2016). Estrutura do Movimento Revisitada. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 4104–4113.
- Smith, MW, Carrivick, JL e Quincey, DJ (2015). Estrutura de fotogrametria de movimento em geografia física. *Progresso em Geografia Física*, 40, 1–29.
- Silva, MD (2012). Os cultivos florestais dos pampas, no sul do Rio Grande do Sul: desafios, perdas e perspectivas frente ao avanço de novas fronteiras agrícolas. *FLORESTA*, v. 42, não. 1, pág. 215 – 226, Curitiba.

- Starkel, L. (2011). Paradoxos no desenvolvimento de voçorocas. Análise do relevo.
- Stumpf, Para., Malet, J.-P., Allemand, P., Pierrot-Deseilligny, M., & Skupinski, G. (2015). Fotogrametria multivista baseada no solo para o monitoramento da deformação e erosão de deslizamentos de terra. *Geomorfologia*, 231, 130-145.
- Suertegaray, DMA; Morelli, LA (2010). Conflitos florestais em áreas em processo de arenização: Sudoeste do Rio Grande do Sul. Em MOREIRA, I; TRAGINO, I., Desertificação, desenvolvimento sustentável e agricultura familiar: lavouras no Brasil, em Portugal e na África (p. 193-200). João Pessoa: Editora da Universidade da Paraíba.
- Stöcker, C., Eltner, A., & Karrasch, P. (2015). Medindo voçorocas por aplicação sinérgica de UAV e fotogrametria de curto alcance - um estudo de caso da Andaluzia, Espanha. *CATENA*, 132, 1-11.
- Turner, D., Lucier, A., & Watson, C. (2012). Uma técnica automatizada para gerar mosaicos georretificados a partir de imagens de veículos aéreos não tripulados (UAV) de resolução ultra-alta, com base na estrutura de nuvens de pontos de movimento (SfM). *Sensoriamento Remoto*, 4(5), 1392-1410.
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Van Mele, B., Demuzere, M., Bruynseels, A., Golosov, V., Bezerra, JFR, Bolysov, S., Dvinš, A., Frankl, A., Fuseina, Y., Guerra, AJT, Haregeweyn, N., Ionita, I., Makanzu Imwangana, F., Moeyersons, J., Moshe, I., Nazari Samani, A., Niacsu, L., ... Yermolaev, O (2016). Com que rapidez os cortes na cabeça do barranco recuam? *Earth-Science Reviews*, 154, 336-355.
- Vanmaercke, M., Panagos, P., Vanwallegghem, T., Hayas, A., Foerster, S., Borrelli, P., Rossi, M., Torri, D., Casali, J., Borselli, L., Vigiak, O., Maerker, M., Haregeweyn, N., De Geeter, S., Zgłobicki, W., Biielders, C., Cerdà, A., Conoscenti, C., de Figueiredo, T., ... Poesen, J. (2021). Medindo, modelando e gerenciando a erosão de voçorocas em larga escala: um estado da arte. *Earth-Science Reviews*, 218, 103637.
- Verdonk, SC (2015). Estimativas de volume de voçorocas usando UAV Photometry. Tese de Mestrado, Universidade de Utrecht, p. 80
- Westoby, MJ, Brasington, J., Glasser, NF, Hambrey, MJ e Reynolds, JM (2012). Fotogrametria 'Estrutura do Movimento': Uma ferramenta eficaz e de baixo custo para aplicações em geociências. *Geomorfologia*, 179, 300-314.
- Wijdenes, DJO, Poesen, J., Vandekerckhove, L., Nachtergaele, J. e De Baerdemaeker, J. (1999), Morfologia da cabeça do barranco e implicações para o desenvolvimento do barranco em campos abandonados em um ambiente semiárido, Sierra de Gata, sudeste da Espanha. *Terra Surf. processo Landforms*, 24: 585-603.
- Zegeye, ANÚNCIO, Langendoen, EJ, Steenhuis, TS, Mekuria, W., & Tilahun, SA (2020). Estabilidade de banco e modelo de erosão do pé como uma ferramenta de decisão para a estabilização do banco de voçorocas nas terras altas sub-úmidas da Etiópia. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 20(2), 301-311.