



DIAGNÓSTICO DE ÁREA DEGRADADA POR VOÇOROCA: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO (RJ) A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE VANT E ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO SOLO

Gabriel Amorim Thaumaturgo da Silva¹
Willian de Souza Pereira Junior²
Marcelo Correa Motta Roriz³
Jorge da Paixão Marques Filho⁴
Antonio José Teixeira Guerra⁵

RESUMO

A erosão hídrica, agravada por desmatamento, manejo inadequado e altas taxas pluviométricas, leva à formação de voçorocas, prejudicando o solo, os recursos hídricos e a infraestrutura local. O presente estudo tem como objetivo diagnosticar uma área degradada por voçoroca, buscando compreender sua dinâmica e subsidiar estratégias futuras de recuperação ambiental. Três questões norteiam este estudo? (1) Quais as características do solo e sua influência no processo erosivo? (2) Quais fatores controlam a formação de voçorocas? (3) É possível reverter os danos e iniciar a recuperação da área? O estudo, realizado no município de Rio Claro (RJ), na bacia do rio Piraí, utilizou Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e análise das propriedades do solo. A metodologia envolveu levantamento bibliográfico, planejamento de voo com o *software DroneDeploy* e levantamento aerofotogramétrico com o VANT *DJI Phantom 4*, gerando ortomosaicos e Modelos Digitais de Terreno (MDT). Esses dados permitiram delimitar a voçoroca, medir suas dimensões e calcular o Índice Topográfico de Umidade (TWI), evidenciando áreas de maior saturação e escoamento preferencial. Amostras de solo foram analisadas para correlacionar propriedades físicas e químicas com a intensidade erosiva. Os resultados mostraram que a voçoroca está em expansão, com sinais de escoamento superficial e subsuperficial. A análise do TWI reforçou a relação entre relevo, umidade e erosão, apontando que áreas mais saturadas coincidem com os pontos de maior avanço da voçoroca. A pesquisa demonstrou a eficácia dos VANTs no monitoramento de feições erosivas, fornecendo dados precisos e detalhados, essenciais para a recuperação e manejo sustentável do solo. Conclui-se que o uso de VANTs e geotecnologias é fundamental para o monitoramento e gestão de áreas degradadas

¹ Mestrando em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, gabriel.thaumaturgo@gmail.com;

² Graduando em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, willianspjr@gmail.com;

³ Graduando em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, rorizmarcelo@gmail.com;

⁴ Doutorando em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ marquesfilho.jp@gmail.com;

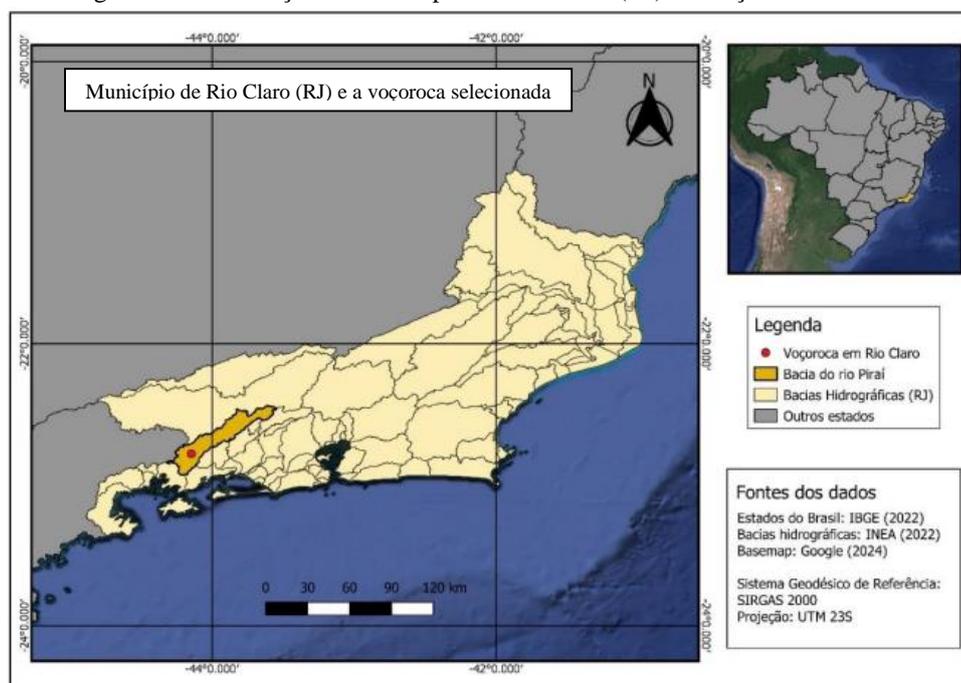
⁵ Prof. Titular do Departamento de Geografia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, antonioguerra@gmail.com.

INTRODUÇÃO

A erosão hídrica configura-se como um dos principais agentes de degradação ambiental, afetando negativamente a qualidade do solo, a disponibilidade de recursos hídricos e a estabilidade da infraestrutura urbana e rural. Quando intensificada por fatores antrópicos, como o desmatamento, o uso inadequado do solo e a ocupação desordenada do território, essa forma de erosão pode evoluir para feições severas, como as voçorocas. Essas estruturas podem se desenvolver através da concentração do escoamento superficial, que podem incidir e crescer progressivamente, bem como através do escoamento subsuperficial através de *pipings* (Loureiro e Guerra, 2023; Silva *et al.*, 2024).

O município de Rio Claro (RJ) (Figura 1), inserido no contexto do Médio Paraíba do Sul, no Estado do Rio de Janeiro, apresenta áreas suscetíveis a processos erosivos, tendo em vista o histórico de uso e ocupação no Médio Vale do Paraíba, relacionado aos ciclos econômicos da cana-de-açúcar, do café, e atualmente, da pecuária, que influenciaram na aceleração e sucessão de processos erosivos, degradação dos solos e voçorocamento (Carvalho *et al.*, 2010; Loureiro, 2019).

Figura 1 – Localização do município de Rio Claro (RJ) e a voçoroca selecionada



Fonte: Silva *et al.*, 2024

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo diagnosticar uma área degradada por voçoroca, buscando compreender sua dinâmica e subsidiar estratégias de



recuperação ambiental. Três questões norteiam a investigação: (1) Quais são as características do solo na área de estudo e como influenciam no processo erosivo? (2) Quais os fatores controladores que condicionam o processo de voçorocamento? (3) É possível reverter os danos e iniciar a recuperação da área degradada?

A compreensão dos processos de formação e evolução das voçorocas exige uma abordagem interdisciplinar, envolvendo conhecimentos da geomorfologia, pedologia, climatologia e geotecnologias aplicadas. Segundo a literatura, as principais condições que favorecem o surgimento dessas feições são: a elevada pluviosidade, a declividade acentuada do terreno, a ausência de cobertura vegetal protetora e as características físicas e químicas dos solos — especialmente em solos argilosos e mal estruturados, que dificultam a infiltração de água e promovem o escoamento superficial concentrado (Poesen *et al.*, 2003; Morgan, 2005; Loureiro, 2013; Guerra, 2021).

De acordo com Guerra e Jorge (2021), a compactação do solo, o baixo teor de matéria orgânica e o manejo inadequado dos solos são fatores determinantes na intensificação do processo erosivo. Além disso, processos subsuperficiais como o *piping* (erosão interna por percolação da água) e a saturação hídrica em encostas contribuem significativamente para o colapso estrutural das margens e a evolução acelerada das voçorocas.

Para o monitoramento contínuo das feições erosivas, as geotecnologias, como os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), são essenciais. Elas permitem a geração de ortomosaicos e modelos digitais de elevação com alta precisão, facilitando a análise do terreno, a identificação de áreas críticas e o acompanhamento da erosão. Além disso, a análise laboratorial das propriedades do solo ajuda a entender sua vulnerabilidade e a planejar ações de recuperação mais eficazes (Krein Rademann, Trentin, 2020; Loureiro *et al.*, 2022).

Nesse sentido, o presente trabalho tem objetivo realizar o diagnóstico de uma área degradada por voçoroca no município de Rio Claro (RJ), utilizando Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Análise das propriedades físicas e químicas do solo, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de manejo e conservação do solo e da água, bem como para a mitigação dos impactos ambientais gerados por esse tipo de degradação.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, a metodologia foi estruturada em três etapas principais, sendo: 1) Levantamento bibliográfico e reconhecimento prévio da área de estudo; 2) Aquisição e processamento das imagens oriundas do aerolevanteamento com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT); e 3) Caracterização físico-química das amostradas coletadas e analisadas em laboratório.

As etapas foram desenvolvidas de forma integrada, com o objetivo de diagnosticar os fatores condicionantes e controladores do processo de voçorocamento na área degradada no município de Rio Claro (RJ).

Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico com foco nas temáticas de erosão hídrica e seus processos, a degradação do solo e o uso de geotecnologias no monitoramento de feições erosivas. Essa etapa possibilitou a fundamentação teórica necessária para o planejamento das atividades de campo e interpretação dos dados. Simultaneamente, foi realizado o reconhecimento da área de estudo, com a definição dos pontos de interesse para coleta de amostras e delimitação preliminar da feição erosiva.

Para o mapeamento da feição erosiva, foi utilizado o *VANT DJI Phantom 4*, onde o planejamento do voo foi realizado por meio do *softwares DroneDeploy*, seguindo os parâmetros técnicos definidos pela Circular Técnica da EMBRAPA (2018) para voos semiautônomos com aeronaves remotamente pilotadas de Classe 3.

Tabela 1 – Parâmetros do voo realizado com VANT DJI Phantom 4

Tempo de voo	3:03 minutos
Altura de voo	100 metros
Área coberta	1 ha
Quantidade de imagens geradas	46 imagens
Sobreposição frontal das imagens	80%
Sobreposição lateral das imagens	75%

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

As imagens obtidas foram processadas no próprio *DroneDeploy*, com a geração de produtos como o ortomosaico de alta resolução e o Modelo Digital de Terreno (MDT). Esses produtos foram posteriormente manipulados no *software QGIS 3.28*, possibilitando a extração de perfis topográficos longitudinais e transversais da voçoroca, bem como a medição de largura,



profundidade e extensão da feição. Com base no MDT, foi calculado o Índice Topográfico de Umidade (*Topographic Wetness Index – TWI*), conforme proposto por Beven e Kirkby (1979), visando identificar áreas com maior propensão à saturação hídrica e ao escoamento superficial concentrado.

Simultaneamente ao levantamento aerofotogramétrico, foram coletadas amostras de solo em diferentes setores da voçoroca para a realização da análise das propriedades físicas e químicas, levando em consideração a análise granulométrica, matéria orgânica, densidade do solo e das partículas, porosidade e pH.

Os resultados laboratoriais foram correlacionados com os dados morfométricos e geoespaciais da voçoroca, visando compreender as relações entre as propriedades do solo, o relevo e a dinâmica erosiva da área.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

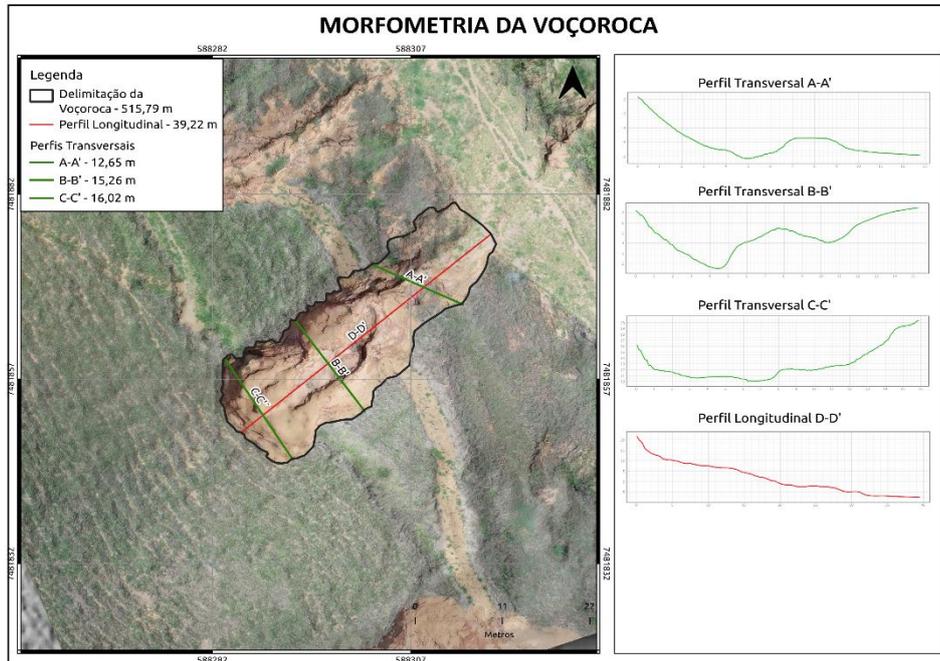
A partir das métricas extraídas (figura 2), é possível observar que a feição erosiva possui uma área de 515,79 m², com 39,22 metros de comprimento da cabeceira até a jusante, e largura variando entre 12,65 metros e 16,02 metros.

Além disso, é possível observar a ausência de cobertura vegetal no interior, deixando o solo mais exposto para os efeitos da erosão por *splash*, onde evidencia que a voçoroca encontra-se ativa. Na mesma figura 2, é possível observar também a influência da pecuária na aceleração dos processos erosivos na voçoroca, tendo em vista a presença de terracetes em volta da mesma, que influenciam no escoamento superficial, como apontado por Guerra (2016), Alves, Hartwig e Espinzoa (2024).

Por outro lado, no interior da feição erosiva, é possível identificar a presença de *piping* no interior da voçoroca, próximo à cabeceira da feição erosiva. De acordo com Guerra (2021), os *pipings* são responsáveis pelo escoamento subsuperficial e ampliação das voçorocas, pois acarretam no solapamento das estruturas.

Observa-se também a influência das estradas vicinais, que por sua vez, são compactadas pelo pisoteio do gado e acabam influenciando diretamente no escoamento superficial para o interior da voçoroca, ocasionando assim, no recuo da sua cabeceira e, conseqüentemente, o seu alargamento (Guerra, 2021; Bacellar, 2023).

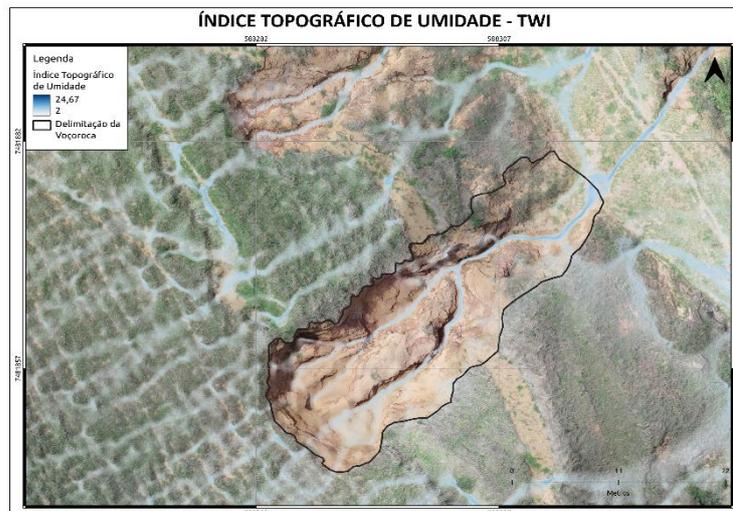
Figura 2 – Morfometria da voçoroca e seus aspectos



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

A partir dos perfis transversais, é possível identificar que a incisão principal está associada aos desníveis acentuados e sem cobertura vegetal, resultantes do caminho preferencial do escoamento principal, como pode ser relacionado nas figuras 2 e 3.

Figura 3 – Índice Topográfico de Umidade - TWI



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

Na figura 3, foi aplicado o Índice Topográfico de Umidade, onde segundo Grabs *et al.*, (2019), os valores elevados de TWI indicam maior probabilidade de saturação do solo e ocorrência de escoamento superficial, enquanto valores mais baixos estão associados a áreas menos suscetíveis à retenção hídrica.

Com a aplicação do TWI, percebe-se que as zonas com maior umidade e saturadas, estão relacionadas ao caminho preferencial do escoamento superficial, que se iniciam desde a montante da cabeceira da voçoroca e adentram a feição, contribuindo assim para aceleração dos processos erosivos e recuo da cabeceira, aumentando suas dimensões.

É possível observar que o escoamento superficial ocorre de forma difusa, indicando a presença de distintos fatores controladores do processo erosivo, pois há mudanças morfológicas no interior da feição erosiva.

No que tange a análise das propriedades físicas e químicas (Tabela 2), as amostras A1 e A2, coletadas nas laterais da voçoroca, são compostas majoritariamente por areia (83,3% e 90,6%), com baixos teores de argila (6,0% e 3,0%). Essa composição confere baixa coesão entre partículas, reduzida capacidade de retenção hídrica e alta vulnerabilidade ao escoamento superficial, contribuindo para o avanço do processo de voçorocamento (Alves *et al.*, 2024).

Tabela 2 – Propriedades físicas e químicas do solo da feição erosiva analisada

Atributo	A1	A2	A3
Local de Coleta	Lateral Esquerda	Lateral Direita	Área Externa
Areia Fina (%)	39,4	25,2	11,9
Areia Grossa (%)	43,9	65,4	31,0
Silte (%)	10,7	6,4	17,5
Argila (%)	6,0	3,0	39,7
Classe Textural	Areia Franca	Areia	Franco Argiloso
Matéria Orgânica (%)	3,63	3,73	5,20
Densidade do Solo (g/cm ³)	1,49	1,33	1,13
Densidade das Partículas (g/cm ³)	2,50	2,21	2,66
Porosidade (%)	40,48	47,15	57,62
pH	4,5	4,4	3,7

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025

Já a amostra A3, coletada fora da área diretamente afetada pela feição erosiva, possui maior teor de argila (39,7%) e silte (17,5%), além de maior teor de matéria orgânica (5,20%). Esses fatores conferem melhor estrutura ao solo, maior capacidade de retenção de água, e maior resistência ao desagregamento, o que torna essa porção do terreno menos suscetível à intensificação da erosão (Alves *et al.*, 2024).



Em relação à densidade do solo e à porosidade, A3 apresenta a menor densidade do solo ($1,13 \text{ g/cm}^3$) e maior porosidade (57,62%), refletindo um solo mais estruturado e menos compactado, com maior infiltração de água. Por outro lado, A1 e A2 apresentam densidades mais elevadas, indicando compactação e menor infiltração, favorecendo o escoamento superficial (Thomas *et al.*, 2024)

Quanto ao pH, as três amostras de solos são classificadas como fortemente ácidas, com valores abaixo de 5,0. A A3 apresenta o menor pH (3,7), o que pode indicar um estágio mais avançado de degradação química, provavelmente causado por lixiviação (Zhou, 2024).

Esses dados reforçam que as laterais da voçoroca (A1 e A2) concentram as características mais críticas, com maior suscetibilidade à erosão e menor capacidade de regeneração natural. Já a amostra A3 representa uma condição mais favorável para estratégias de recuperação, especialmente com o uso de práticas conservacionistas, adição de matéria orgânica e revegetação com espécies nativas (Wen, 2020).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O diagnóstico da área degradada por voçoroca em Rio Claro (RJ), com o uso de geotecnologias e análises físico-químicas do solo, mostrou-se eficaz para entender a dinâmica erosiva e propor estratégias de manejo ambiental. O uso de VANTs gerou ortomosaicos e Modelos Digitais de Terreno (MDT) de alta resolução, permitindo delimitar com precisão a voçoroca, identificar áreas críticas e calcular índices como o TWI. Esses dados permitiram analisar a morfometria da voçoroca e a relação entre relevo, umidade do solo e escoamento.

As análises de solo indicaram que as laterais da voçoroca são mais vulneráveis à erosão devido à alta porcentagem de areia, baixa matéria orgânica, compactação e baixa porosidade. Em contraste, as áreas externas têm características mais estáveis, com maior teor de argila e melhor capacidade de retenção de água, favorecendo a implementação de espécies para revegetar a área.

Conclui-se que fatores naturais e antrópicos contribuem para a expansão da voçoroca, sendo necessário adotar práticas conservacionistas, como controle do escoamento e



recomposição da vegetação. O uso contínuo de geotecnologias é essencial para monitoramento e tomada de decisões na gestão ambiental. Este estudo contribui para a literatura ao propor uma abordagem integrada para diagnóstico de feições erosivas, servindo de referência para outras pesquisas sobre degradação do solo.

Palavras-chave: MONITORAMENTO, DIAGNÓSTICO, VANT, VOÇOROCA, RIO CLARO (RJ)

REFERÊNCIAS

ALVES, J. P. I.; HARTWIG, M. E.; ESPINOZA, J. A. A. **Processos erosivos e dinâmica de duas voçorocas desenvolvidas em solo residual em uma encosta íngreme (Estado do Espírito Santo, Brasil)**. Revista Brasileira de Geomorfologia, [S. l.], v. 25, n. 1, 2024. DOI: 10.20502/rbgeomorfologia.v25i1.2489. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2489>. Acesso em: 30 jan. 2025.

ALVES, F., PINTO, L., DA SILVA, C., DE SOUZA, R., DA SILVA, T., DE LEMOS, G., COSTA, A., & PEREIRA, M. **Physical and chemical indicators of soil quality in gully environments, State of Rio de Janeiro (Southeast Brazil)**. Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 2024.

BACELLAR, L. de A. P. **Interações recíprocas entre relevo, água e voçorocas: estudo de caso da região do Complexo Bação – Minas Gerais**. Revista Brasileira de Geomorfologia, [S. l.], v. 24, n. 00, 2023. DOI: 10.20502/rbgeomorfologia.v24i00.2364. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2364>. Acesso em: 20 de julho de 2025.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. **A physically-based variable contributing area model of basin hydrology**. Hydrological Sciences Bulletin, v. 24, p. 43-69, 1979.

CARVALHO, E. M.; PINTO, S. A.; SEPE, P. M.; ROSSETTI, L. A. F. G. **Utilização do geoprocessamento para avaliação de riscos de erosão do solo em uma bacia hidrográfica: Estudo de caso da bacia do rio Passa Cinco/SP**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 3. 2010, Recife. Anais [...]. Recife: SBC, 2010. p. 1-82.

EMBRAPA ACRE. **Planos de Voo Semiautônomos para Fotogrametria com Aeronaves Remotamente Pilotadas de Classe 3**. Rio Branco: EMBRAPA ACRE, 2018. 56 p.

GRABS, T; SEIBERT, J.; BISHOP, K.; LAUDON, H. Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. **Journal of Hydrology**, v. 373, p. 15-23, 2009.

GUERRA, A. J. T. **Erosão dos solos e movimentos de massa: abordagens geográficas**. Curitiba, CRV, 2016

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia – Uma Atualização de Bases e Conceitos**. 15º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2021, p. 149-209.

KREIN RADEMANN, L.; TRENTIN, R. **Novas geotecnologias aplicadas ao estudo geomorfológico: exemplo de morfometria da Voçoroca do Areal, Cacequi-RS**. GeoTextos, [S. l.], v. 16, n. 1, 2020. DOI: 10.9771/geo.v16i1.35474. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/geotextos/article/view/35474>. Acesso em: 20 de julho de 2025

LOUREIRO, H. A. S. **Diagnóstico de Erosão por Voçorocas: Experimentos com Geotecnologias e Solos na Bacia do Alto Rio Pirai – Rio Claro – RJ**. Tese de Doutorado (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

LOUREIRO, H. A. S. **Monitoramento e diagnóstico de áreas degradadas na bacia hidrográfica do rio São Pedro (RJ): estudos experimentais em voçoroca e utilização de geotêxteis de fibra de bananeira**. Dissertação



(Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

LOUREIRO, H. A. S.; GUERRA, A. T. J.; BEZERRA, J. F. R.; PEREIRA, L. S.; GARRITANO, F. N. 19. **Monitoramento da Erosão Hídrica no Brasil: dos métodos manuais aos digitais.** In: JUNIOR, O. A. C.; GOMES, M. C. V.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. (Orgs.). *Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira*. UNB, 2022, p. 530-563.

LOUREIRO, H. A. S.; GUERRA, A. J. T. **Erosão em Áreas Tropicais.** 1º ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2023. 270 p.

KREIN RADEMANN, L.; TRENTIN, R. **Novas geotecnologias aplicadas ao estudo geomorfológico: exemplo de morfometria da Voçoroca do Areal, Cacequi-RS.** *GeoTextos, [S. l.]*, v. 16, n. 1, 2020. DOI: 10.9771/geo.v16i1.35474. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/geotextos/article/view/35474>. Acesso em: 20 de julho de 2025.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation.** 3.ed. England: Blackwell Publishing, 2005.

POESEN, J.; NACHTERGAELEA, J.; VERSTRAETENA, G.; VALENTIN, C. **Gully erosion and environmental change: importance and research needs.** *Catena*, v.50, p.91– 133, 2003.

SILVA, G. A. T. *et al.* **Caracterização de voçoroca a partir da utilização de veículo aéreo não tripulado (vant): estudo de caso no município de Rio Claro (RJ).** *Anais do XX SBGFA - Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada & IV ELAAGFA - Encontro Luso-Afro-Americano de Geografia Física e Ambiente...* Campina Grande: Realize Editora, 2024. Disponível em: <<https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/118340>>. Acesso em: 22 de julho de 2025.

THOMAS, A., SEATON, F., DHIEDT, E., COSBY, B., FEENEY, C., LEBRON, I., MASKELL, L., WOOD, C., REINSCH, S., EMMETT, B., & ROBINSON, D. **Predição da porosidade da camada superficial do solo em habitats em larga escala usando variáveis ambientais.** *The Science of the total environment*, 171158. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171158>, 2024.

WEN, H., NI, S., WANG, J., & CAI, C. **Alterações na qualidade do solo induzidas por diferentes restaurações de vegetação em áreas de erosão de ravinas em colapso no sul da China.** *Pesquisa Internacional de Conservação do Solo e da Água*, 9, 195-206. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2020.09.006>, 2020.

ZHOU, J. **A relação entre pH do solo e componentes geoquímicos.** *Ciências Ambientais da Terra*. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11711-1>, 2024.