

Artigo de Pesquisa

## Monitoramento de voçorocas na barragem Serro Azul, Mata Sul do estado de Pernambuco

### *Monitoring of gullies in the Serro Azul dam, Mata Sul in the state of Pernambuco*

Henrique Elias Pessoa Gutierrez<sup>1</sup>, Osvaldo Girão<sup>2</sup>, Carla Suelânia da Silva<sup>3</sup>, Antonio José Teixeira Guerra<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Departamento de Geociências (Laboratório de Planejamento e Gestão Ambiental - LAPLAG), João Pessoa, Brasil. hepg86@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0220-3410>

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Departamento de Ciências Geográficas, Recife, Brasil. osgirao@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5797-4450>

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Recife, Brasil. csuelania.geografia@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5920-867X>

<sup>4</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Geografia (Laboratório de Geomorfologia Experimental e Erosão dos Solos - LAGESOLOS), Rio de Janeiro, Brasil. antoniotguerra@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2562-316X>

Recebido: 23/08/2021; Aceito: 28/04/2023; Publicado: 11/05/2023

**Resumo:** As obras de engenharia podem contribuir para a deflagração de processos erosivos, a exemplo das ravinas e voçorocas, principalmente se as recomendações para as construções e as medidas de controle ambiental não forem implementadas. O presente artigo apresenta e discute os dados obtidos com o monitoramento de duas voçorocas nas margens da barragem Serro Azul, construída no leito do rio Una, na Mata Sul do estado de Pernambuco. Caracteriza-se por ser uma pesquisa qualitativa-descritiva desenvolvida por meio da revisão da literatura, levantamento e a pesquisa documental, trabalhos de campo, análise laboratorial e a sistematização dos dados obtidos com o mapeamento dos processos e a discussão à luz da literatura científica. A área estudada apresenta condições favoráveis para a ocorrência de processos erosivos diante das características naturais, a exemplo do relevo colinoso, tendo, com a barragem, intensificado tais processos diante das alterações resultantes do seu período de construção, bem como da sua atual operação. Os resultados obtidos permitem apresentar a realidade de uma barragem recém-construída, e que necessita de monitoramento ambiental, para que garanta maior vida útil, com menos gastos financeiros para o desassoreamento e a recuperação de áreas degradadas.

**Palavras-chave:** Voçorocas; Monitoramento; Barragem; Áreas degradadas.

**Abstract:** Engineering works may contribute to trigger erosion processes, such as rills and gullies, mainly if the recommendations to the constructions of environmental control are not well implemented. This article addresses and discusses data obtained through monitoring of two gullies, within Serro Azul Dam borders, built in river Una, on Mata Sul of Pernambuco State. This is a qualitative-descriptive research work, carried out through literature review, documents survey, field work, laboratory analysis, and systematization of data obtained with erosion processes mapping, in view of the natural characteristics and discussion of the scientific literature. The study area presents favourable conditions to soil erosion processes, due to its natural conditions, such as hilly landscape, and therefore the dam has accelerated these processes, due to the modifications promoted by the dam construction, as well as the current operations. The results allow us to show the reality

of a recent constructed dam, which needs environmental monitoring, to ensure a long lifespan, with less expenditure for removing sediment from the reservoir, and for degraded areas recuperation.

**Keywords:** Gullies; Monitoring; Dam; Degraded Areas.

---

## 1. Introdução

A construção de barragens, apesar de suas intencionalidades positivas (prevenção de enchentes/inundações, geração de energia, armazenagem e suprimento hídrico etc.), resulta em impactos ambientais, seja no entorno do seu reservatório, ou à jusante e à montante das estruturas. Em qualquer lugar do mundo, estes impactos atingem diferentes ambientes/meios e elementos, a exemplo do meio físico, do meio biológico e do meio antrópico, em menor ou maior grau, a depender das características de cada local (PETTS; GURNELL, 2005; COELHO, 2008; REMO et al., 2018; KONG et al., 2020; VERCRUYSSSE; GRABOWSKI, 2021).

É comum a abordagem dos processos erosivos em ambientes urbanos devido a maior intensidade processual nessas áreas por conta das formas estruturais que favorecem o desencadeamento e a intensificação do escoamento superficial e a gênese de feições erosivas lineares, resultando em reflexos negativos para o sistema viário, moradias, atividades econômicas e de lazer. Ademais, nas áreas urbanas, o processo erosivo e a consequente geração de feições erosivas induzem ao aumento de áreas de risco geomorfológico e a diminuição das áreas passíveis de ocupação (GUERRA *et al.*, 2017; LOUREIRO *et al.*, 2020; GUERRA *et al.*, 2020; GUERRA; JORGE, 2021). Já em ambientes rurais, a erosão dos solos resulta na diminuição de áreas a serem utilizadas pela atividade agropecuária; no agravamento do assoreamento em lagos, rios e reservatórios; na poluição dos cursos d'água; na remoção das camadas superiores do solo que, em geral, apresentam uma maior fertilidade (GIRÃO *et al.*, 2013; JORGE; GUERRA, 2013; GUTIERRES *et al.*, 2020). No entanto, mesmo quando não estão em áreas urbanas, as obras de engenharia podem contribuir para a deflagração de incisões erosivas lineares, a exemplo das ravinas e voçorocas, principalmente se as recomendações para as construções e as medidas de controle ambiental não forem cumpridas. De acordo com Oliveira e Meis (1985) apud Marchioro et al. (2016), a etimologia do termo voçoroca é proveniente da junção de duas expressões do tupi-guarani, *ibi* (terra) e *soroc* (rasgão), portanto, voçoroca (*gully*, em inglês) seria um "rasgão na terra". Segundo a Soil Science Society of America (SSSA), voçoroca é definida como um canal resultante de erosão causado por fluxos de água concentrados, intermitentes e relacionados com a chuva, que interferem em operações normais de cultivo apresentando profundidade e largura superiores a 50 centímetros. Para Poesen et al. (2003) é o processo erosivo pelo qual a água de escoamento se acumula e frequentemente se repete em canais estreitos e, em curtos períodos, remove o solo dessa área estreita a profundidades consideráveis.

Para a construção das grandes barragens a legislação brasileira estabelece que esses empreendimentos sejam submetidos ao licenciamento ambiental com a exigência do Estudo de Impacto Ambiental e do respectivo Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) (DUARTE *et al.*, 2017). Tal estudo contempla o diagnóstico, o monitoramento e o controle dos processos erosivos e dos movimentos de massa. O caráter preventivo do EIA se associa a necessidade da implementação de ações preventivas para diminuir a ocorrência do escoamento superficial e subsuperficial, pois são os responsáveis pelos processos de erosão acelerada (JORGE; GUERRA, 2013). Dada a importância, as condicionantes da licença ambiental também devem contemplar o controle dos processos erosivos, a exemplo da barragem que será analisada neste artigo.

Quando se estuda o meio ambiente, a geomorfologia se situa numa posição privilegiada naquilo que se refere às suas contribuições na estruturação e dinâmica do ambiente físico-natural, impactando, positivamente e/ou negativamente, sobre os outros componentes naturais e nas formas de usos e ocupações espaciais por parte da sociedade humana. Os conhecimentos geomorfológicos apresentam um viés de aplicação prática ao subsidiar, de modo significativo, o ordenamento territorial, principalmente por entender que a atuação da sociedade humana pode contribuir para a manutenção do equilíbrio dos processos geomorfológicos, porém, como geralmente acontece, também pode provocar a desestabilização das dinâmicas processuais de ambientes naturais, já que as ações humanas resultam em alterações que promovem a reorganização da morfodinâmica numa determinada escala de tempo (GREGORY, 2019; VERCRUYSSSE; GRABOWSKI, 2021). Christofoletti (1999) demonstra a aplicabilidade do conhecimento geomorfológico nos projetos de planejamento diante da intensificação das intervenções antrópicas em gerar e alterar processos, além de construir e destruir as formas do relevo. Sendo assim, "[...] passa a Geomorfologia (leia-se geomorfólogos) a preocupar-se com a dinâmica dos processos, com os sistemas de erosão e com a dinamicidade da natureza em contraposição a Geomorfologia que imperou até os anos 1950,

descritiva e classificatória” (SUERTEGARAY, 2018, p.26). Downs e Booth (2011) reforçam o entendimento de que a previsão de condições futuras, embora crítica para a gestão ambiental, é um tópico relativamente novo para a geomorfologia e o papel específico que ela deve desempenhar nas aplicações geomorfológicas para a gestão ambiental vem sendo debatido, o que inclui os processos erosivos.

A erosão dos solos vem sendo objeto de preocupação dos pesquisadores brasileiros e estrangeiros (MARCHIORO et al., 2016; PEREIRA et al., 2016; POESEN, 2018; CASTRO et al., 2019). As intensas mudanças induzidas por barragens, nos últimos tempos, vêm gerando diversos impactos ambientais, a exemplo da morfodinâmica fluvial, bem como a morfodinâmica das encostas e terrenos que se encontram às margens dos reservatórios (BRANDT, 2000; GRAF, 2005; PETTS; GURNELL, 2005; COELHO, 2008; MA et al., 2012; BRIERLEY; HOOKE, 2015; PAL, 2016; CARVALHO; CABRAL, 2020; KONG et al., 2020; XIA et al., 2020; VERCRUYSE; GRABOWSKI, 2021).

O levantamento exaustivo sobre o monitoramento de voçorocas em bordas de reservatórios de barragens demonstra a pouca existência de referências nacionais e internacionais. Logo, compreende-se que o presente estudo pode ser uma contribuição para essa temática. Tal constatação é explicada por Morais e Montanher (2022), que afirmam que, no Brasil, os estudos sobre o impacto de reservatórios na morfologia dos sistemas fluviais são ainda escassos, principalmente voltados para os reservatórios de grandes rios, enquanto os pequenos, principalmente no Cerrado e no Semiárido, pouco se sabe sobre os seus impactos geomorfológicos. Tommaselli et al. (2014) abordam as erosões marginais em reservatórios e que a real extensão e dinâmica dessas erosões não são bem conhecidos para os reservatórios brasileiros. Apesar desse cenário, vale destacar que as pesquisas sobre os métodos de monitoramento da erosão hídrica apresentam uma gama de opções, dos métodos manuais aos digitais (LOUREIRO et al., 2022). Estudos atuais têm focado no monitoramento das voçorocas a partir do uso de estacas (LISBOA et al., 2017; FRANCISCO, 2018) e com o uso das imagens de satélite, do Veículo Aéreo Não Tripulado - VANT e LiDAR (Laser Scanner Terrestre - LST) (ETCHELAR, 2017; DINOTTE et al., 2019; GARRITANO, 2020; GUERRA et al., 2020) nas diversas regiões brasileiras. Tommaselli et al. (2014) indicam o escaneamento a LASER móvel para o acompanhamento da progressão dos processos, que foi feito em dois reservatórios localizados em São Paulo e no Paraná. Na mesma linha do uso de tecnologias, Oliveira e Leite (2018) identificaram as áreas de Risco de Erosão Laminar (REL) por meio de ferramentas geotecnológicas livres, tendo a área de drenagem da barragem do rio Juramento, no norte de Minas Gerais, como local de estudo. Para tais monitoramentos, aspectos como a morfogênese, formato da seção transversal, complexidade, tamanho, profundidade, área drenante, tipos e formas das voçorocas são aspectos importantes na avaliação no campo e em laboratório.

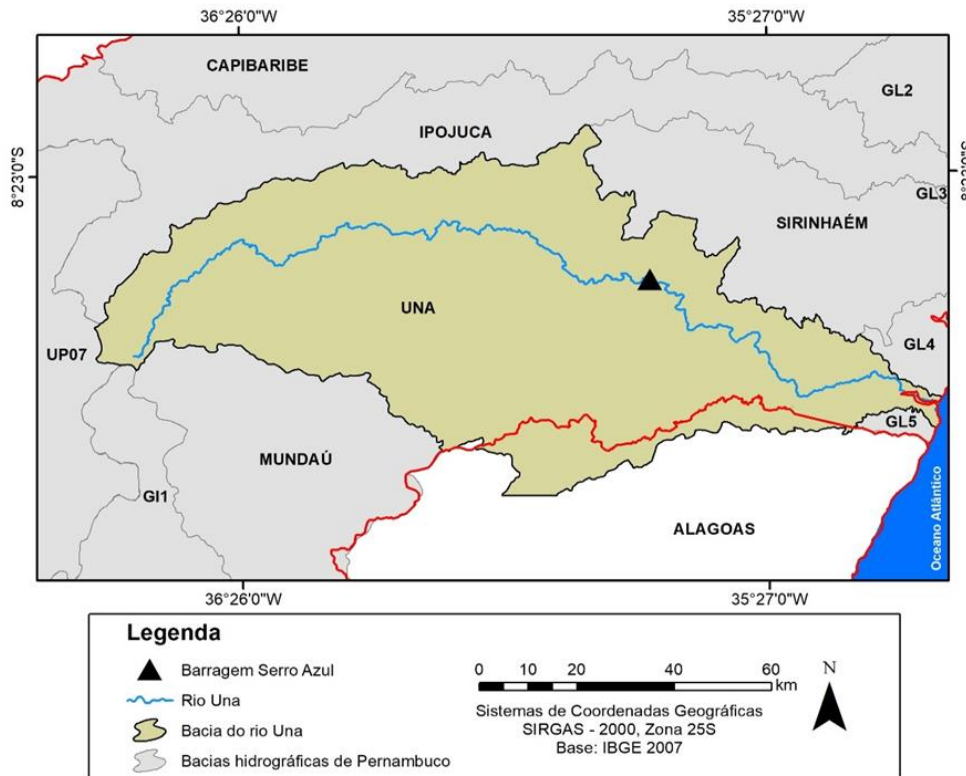
Sales et al. (2017) trazem uma extensa publicação sobre erosão em borda de reservatório, com destaque para a região central do Brasil, que apresenta características favoráveis (manto de solo e distribuição desigual de chuvas) para a ocorrência de processos erosivos. Os autores apresentam o monitoramento dos processos erosivos no entorno dos reservatórios das Usinas Hidrelétricas (UHE) de Batalha, Furnas e Itumbiara, localizadas nos estados de Goiás e Minas Gerais. Logo, tais estudos contribuem para um melhor entendimento da dinâmica da paisagem da bacia hidrográfica diante da alteração da dinâmica fluvial. O levantamento bibliográfico demonstra o predomínio das pesquisas que tratam do ajustamento fluvial a jusante em relação as áreas a montante de reservatórios, o que justifica “a necessidade emergente do desenvolvimento de pesquisas para maior conhecimento dos efeitos de mudanças de canal a montante de reservatórios” (MORAIS, MONTANHER, 2022, p.145).

Sendo assim, propõe-se discutir os resultados obtidos com o monitoramento de duas voçorocas às margens da barragem Serro Azul, localizada na mata sul do estado de Pernambuco, à luz das recomendações previstas no EIA do empreendimento (ITEP/OS, 2011), já que se entende que se as recomendações desses estudos ambientais fossem devidamente adotadas, diversas barragens poderiam minimizar a ocorrência dos processos do meio físico, especialmente dos erosivos e de assoreamento.

## 2. Área de Estudo

A barragem Serro Azul tem uma capacidade de acumulação de 303.120.000 m<sup>3</sup> de água (ITEP/OS, 2011) e encontra-se no município de Palmares, Zona da Mata Sul do estado de Pernambuco, no médio curso do rio Una, canal principal da bacia hidrográfica de mesmo nome, integrando o Sistema de Contenção de Enchentes da Bacia Hidrográfica do rio Una (GUTIERRES, 2019) (Figura 1). Tal sistema é de iniciativa do Governo do estado de Pernambuco (Figura 1), tendo como motivação as enchentes ocorridas nos dias 17, 18 e 19 de junho de 2010, ao





**Figura 2.** Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do rio Una. Fonte: autores.

As cidades de Palmares e Barreiros, situadas, respectivamente, no médio e baixo curso do rio Una, possuem risco alto à ocorrência de desastres naturais, segundo Girão *et al.* (2013, p.152), “pois se localizam em setores da bacia que apresentam maior densidade de canais e alta hierarquia do sistema de drenagem, sob Latossolos, em Palmares, e Gleissolos contíguos ao leito do rio, em Barreiros”. Os autores destacam que as duas cidades foram fortemente afetadas pelos eventos anteriormente citados, nos anos de 2010 e 2011, já que as águas ocuparam o leito maior do rio Una, chegando a inundar o leito excepcional.

A cidade de Palmares está a uma altitude aproximada de 108 metros, com coordenadas geográficas de 08° 41' 00" de latitude sul e 35° 35' 30" de longitude oeste, distando 118,7 km da capital (Recife), cujo acesso é feito pela rodovia BR-101. De acordo com a população estimada do IBGE (2020), o município apresenta população de 63.500 habitantes, em uma área total de 339,29 km<sup>2</sup>, resultando numa densidade demográfica de 187,15 hab/km<sup>2</sup>.

Geologicamente, o município encontra-se inserido na Província Borborema, com a presença de litotipos dos complexos Cabrobó e Belém do São Francisco, além das Suítes Intrusiva Leucocrática Peraluminosa e Calcicalcina de Médio a Alto Potássio Itaporanga (CPRM, 2005). A área da barragem encontra-se inserida nos terrenos pré-cambrianos do Domínio Pernambuco-Alagoas, situada ao sul do Lineamento Pernambuco. Tem como principal configuração geológica a presença de estruturas rúpteis, representadas por um sistema de fraturamento regional. Esse conjunto de estruturas tem direções preferenciais NE-SW e ENW-WSE, e está distribuído a leste da área do barramento (ITEP/OS, 2011). Completando esse cenário geológico, ocorrem depósitos quaternários representados pelos aluviões ou elúvio-coluvionares, constituídos por sedimentos terrígenos (areias, argilas e detritos rochosos).

O relevo compreende as Superfícies Retrabalhadas, constituídas por áreas que têm passado por dinâmica intensa, com relevo de topos convexos modelado em rochas cristalinas, dissecado e vales profundos. Destaca-se a existência predominante de colinas médias e amplas, que caracterizam tal região, com a ocorrência de depósitos coluviais e uma drenagem que alia a compartimentação geomorfológica e os índices de precipitação favoráveis à acumulação de água na área do eixo da barragem. Logo, demonstrando a interdependência estabelecida entre as condicionantes naturais de alguns aspectos relacionados à própria obra, em especial o relevo, que é um dos fatores “[...] essenciais não apenas para definir o melhor arranjo das obras de uma barragem, mas também para analisar a própria viabilidade dessa obra” (COSTA, 2012, p. 21). Tal relevo encontra-se associado aos Latossolos (nos topos

planos), Argissolos nas vertentes íngremes e os Gleissolos, compreendendo solos orgânicos e encharcados, presentes nos fundos de vales estreitos (ITEP/OS, 2011).

Os latossolos apresentam estágio avançado de intemperização e têm sequência de horizontes A, B, C com pouca diferenciação de sub-horizontes, com transições usualmente difusas ou graduais e virtualmente destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo e com capacidade de troca de cátions da fração argila baixa. De um modo geral, os teores da fração argila no solum aumentam gradativamente com a profundidade ou permanecem constantes ao longo do perfil. Apresentam baixos teores de matéria orgânica. Já os argissolos compreendem solos constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural (imediatamente abaixo do horizonte superficial) de argila de atividade baixa, ou atividade alta, desde que conjugada com saturação por base baixa ou com caráter aluminico. São de profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, de cores avermelhadas ou amareladas e mais raramente brunadas ou acinzentadas. A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt, sempre havendo aumento de argila daquele para este. Apresentam baixos teores de matéria orgânica.

Por fim, os gleissolos são formados a partir de sedimentos, estratificados ou não, e sujeitos a constante ou periódico excesso d'água. Normalmente, desenvolvidos em sedimentos recentes nas proximidades dos cursos d'água e em materiais colúvio-aluviais sujeitos a condições de hidromorfia, além de terraços fluviais, lacustres ou marinhos. Ocorrência de vegetação hidrófila ou higrófila herbácea, arbustiva ou arbórea. Podendo ocorrer algum acúmulo de matéria orgânica. Com a característica marcante do processo de gleização, que implica a manifestação de cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas devido à redução e solubilização do ferro, permitindo a expressão das cores neutras dos minerais de argila ou ainda a precipitação de compostos ferrosos (SANTOS et al., 2018).

Na área do reservatório constata-se que o tipo presente do Latossolo é o amarelo, que está presente nos topos aplainados dos morros tipo meia laranja (relevo colinoso) e em algumas encostas acidentadas, tendo a floresta subperenifólia como vegetação natural primitiva. Apresentam profundidades consideráveis e boa drenagem. Já as áreas onde ocorrem os Argissolos Amarelos se caracterizam por vertentes íngremes, sendo pouco a medianamente profundos e com boa drenagem. Antes da desapropriação da área para a construção da barragem, esses terrenos eram ocupados pela cultura da cana de açúcar, que predomina na região. Os gleissolos compreendem os solos mal a muito mal drenados, presentes nos terrenos baixos e sujeitos ao excesso de umidade de forma permanente ou temporária, a depender do nível do lençol freático. As colinas estreitas e as vertentes do reservatório são as áreas que apresentam perigos ligados à erosão linear, especialmente ravinas e voçorocas (GIRÃO et al., 2013). Logo, a evolução da erosão deve levar em consideração o contexto ambiental de cada reservatório, especialmente as classes de solos existentes na área. A margem direita, objeto deste artigo, apresenta um solo do tipo argiloso, caracterizado por uma baixa permeabilidade, capacidade alta de retenção de água, resultando na potencialização do risco de erosão.

Esses componentes do meio físico estão sujeitos a um clima tropical chuvoso, sendo os meses entre abril e julho com maior precipitação, e os meses de outubro e novembro como os menos chuvosos, segundo os dados apresentados na tabela 1. O intervalo temporal adotado considerou os anos de 2018 e 2019 (monitoramento das voçorocas), além de 2016 e 2017 (anos finais da fase de construção da barragem), tendo sido inaugurada no final do primeiro semestre de 2017. Levando em conta que junho e julho são os meses de maior precipitação na faixa oriental de Pernambuco (GIRÃO et al., 2013), os dados revelam alguns anos com maiores volumes de chuva nos meses de inverno, enquanto que em outros apresenta-se uma tendência de antecipação no outono. Por isso, as medições das bordas das voçorocas foram realizadas no início e no término do período chuvoso para evidenciar a influência do período de maior precipitação no recuo das bordas das voçorocas estudadas, conforme os dados apresentados nas tabelas 2 e 3.

**Tabela 1.** Dados de precipitação (mensal e anual) na estação de Palmares – PE no período de 2016 a 2019.

Ano	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Total
2016	158	79	147,7	200,5	193,3	190,7	122,3	41,7	44,6	31,9	8,1	18	1235,8
2017	26,7	21,6	60,9	287,3	413,6	336,3	283,8	98,9	135,1	36,7	7,5	74,2	1782,6
2018	114,4	125	162	308,5	243	68,6	86,1	34	30,4	1,1	65,8	53,3	1292,2
2019	126,3	83,8	161,4	125,2	111,1	276,7	387,6	181,9	64,2	24	1,7	18,9	1562,8

Fonte dos dados: Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

Por fim, a rede hidrográfica do município encontra-se no domínio da Bacia Hidrográfica do Rio Una, tendo o rio Pirangi como um dos principais tributários. Os cursos d'água apresentam regime de escoamento perene e padrão de drenagem dendrítico (CPRM, 2005). A barragem Serro Azul encontra-se no médio curso do rio Una e a vegetação é caracterizada por uma Floresta Subperenifólia, com algumas presenças de Floresta Hipoxerófila.

### 3. Materiais e Métodos

O artigo pauta-se numa pesquisa qualitativa-descritiva desenvolvida por Gutierrez (2019), com o objetivo de detalhar um problema a ser investigado, permitindo uma melhor compreensão do mesmo, pois a perspectiva descritiva expõe a abordagem dos processos erosivos nas margens do lago da barragem Serro Azul e a abordagem exploratória busca o aprimoramento do tema proposto. Além do mais, é alicerçada no método geossistêmico, compreendendo os geossistemas como resultantes da combinação dos fatores geomorfológicos, climáticos, hidrológicos e da cobertura vegetal, além de agregar fatores sociais e econômicos, refletindo numa relação imbricada de diversos fatores que interferem uns sobre os outros e que variam no tempo e no espaço (CHRISTOFOLETTI, 1999; RODRIGUES, 2001; OLIVEIRA; MARQUES NETO, 2020).

Os procedimentos técnicos adotados foram: revisão da literatura, contemplando os assuntos: processos erosivos em barragens, voçorocas, EIA e a geomorfologia na avaliação dos impactos ambientais das barragens. Também foram realizados o levantamento e a pesquisa documental de fontes primárias (EIA da barragem Serro Azul); trabalhos de campo durante um período de 26 meses (visitas *in loco* – pesquisa de campo de reconhecimento para observação da área de estudo, registro fotográfico, levantamento com Veículo Aéreo Não Tripulado - VANT; monitoramento das voçorocas previamente escolhidas), coletas de solo e análise laboratorial, elaboração de produtos cartográficos e a finalização por meio da sistematização dos dados obtidos com a discussão à luz da literatura científica.

#### 3.1 Trabalhos de campo

Os trabalhos de campo consistiram na realização de seis incursões (agosto/2017, dezembro/2017, abril/2018, agosto/2018, abril/2019 e outubro/2019), logo após o enchimento do reservatório (que ocorreu no final do primeiro semestre de 2017), tomando o regime climático como referência na escolha dos meses (início do período chuvoso - abril, final do período chuvoso - agosto e os meses menos chuvosos – outubro/novembro). Foram realizados caminhamentos para a verificação das feições geomorfológicas com o uso de caderneta de campo e check list, registros fotográficos, coletas de amostras de solo, verificação e identificação *in loco* de processos erosivos acelerados, tendo sido utilizadas a trena a laser, trena analógica, estaqueamento, GPS para fins de medição das dimensões das voçorocas, o uso e tratamento das fotografias de drone, essenciais para o planejamento e a execução do monitoramento das voçorocas, além do uso de equipamentos e validação de dados cartográficos.

##### 3.1.1 Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)

Para o reconhecimento das áreas, além dos caminhamentos e registros fotográficos de campo, foram obtidas fotografias de drone, com o objetivo de identificar a ocorrência dos processos de voçorocamento nas margens do reservatório. Vale destacar a crescente importância do VANT nas pesquisas científicas envolvendo processos erosivos (MARZOLFF; POESEN, 2009; GUERRA et al., 2020; LOUREIRO et al., 2020). A exemplo de Loureiro et al.

(2020), que apresentaram os potenciais metodológicos e analíticos através da utilização do Laser Scanner Terrestre (LST) e do imageamento por VANT, voltados para o monitoramento da erosão por voçorocas.

As imagens foram obtidas através da câmera de 20mp embarcada em um VANT, modelo Phantom 4 PRO, que sobrevoou as áreas da barragem Serro Azul, registrando imagens em diferentes altitudes e posições, de acordo com as particularidades da área e dos processos identificados. As imagens panorâmicas são de grande importância para o registro da paisagem, principalmente em empreendimentos de grande extensão, uma vez que podem captar alterações que o olho humano não consegue enxergar no nível do solo. Sendo assim, possui um caráter qualitativo para a análise geomorfológica voltada ao diagnóstico e ao monitoramento dos processos erosivos nas margens da barragem. As voçorocas selecionadas levaram em consideração o fato de estarem ativas, com a presença de feições de retrabalhamento e os impactos ambientais gerados na área do reservatório.

### 3.1.2 Monitoramento das voçorocas

Constatou-se a ocorrência de avançados processos de ravinamento e voçorocamento na margem direita do reservatório. Logo, procedeu-se à escolha de duas voçorocas com o objetivo de verificar a evolução processual, por meio do estaqueamento e do monitoramento (iniciado em abril de 2018 e finalizado em outubro de 2019), segundo a metodologia de Cunha e Guerra (2011), com o uso da “Ficha de Campo – Cadastro de Voçorocas em Solos Residuais e Sedimentos Colúvio-Aluviais”, do Departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal de Pernambuco.

Foram feitas as medições de comprimento, largura e profundidade de cada voçoroca. No caso da voçoroca 01, a distância para a colocação das estacas de madeira no solo para a borda foi estabelecida em 7 metros e de 10 metros na voçoroca 02. Tal diferença aconteceu devido ao tamanho menor da voçoroca 01, além do mais, caso fosse adotada a mesma distância para a voçoroca 02, não seria possível a colocação das estacas devido a presença de uma outra voçoroca. Foram estabelecidos oito pontos de monitoramento em cada voçoroca, sendo duas estacas no topo e três em cada borda (direita e esquerda). No tocante a temporalidade, o monitoramento foi iniciado em abril de 2018 (início do período chuvoso), com obtenção de dados em agosto do mesmo ano, abril de 2019 e outubro de 2019. A escolha pelo mês de abril é devido ao início do período chuvoso na região, enquanto que o final de agosto e outubro compreendem um momento pós período chuvoso, o que possibilita uma análise do avanço da erosão.

Apesar da recomendação da implantação de um “Programa de Controle dos Processos Erosivos” no Estudo de Impacto Ambiental da barragem (ITEP/OS, 2011), não foi identificada, durante o período de realização dos trabalhos de campo, qualquer ocorrência da implementação do referido programa. Sendo assim, a presente pesquisa utilizou de técnicas voltadas para avaliações qualitativas e/ou semiquantitativas e quantitativas, conforme detalhado por Azevedo e Rubio (2018), procedendo à caracterização dos parâmetros morfométricos (tamanho, forma e tipo) e as feições de retrabalhamento, associando aos impactos gerados à área de estudo (aumento das taxas de erosão e perda de solo; alteração da topografia; assoreamento do reservatório e aumento da carga de sedimentos nos corpos d’água; deflagração de processos de abrasão lacustre; reajustamento na morfologia do canal diante da mudança dos setores de erosão e de sedimentação; descida do nível de base dos afluentes a jusante da barragem etc. ).

### 3.1.3 Análise granulométrica

Com o objetivo de aprofundar a análise do monitoramento das voçorocas, procedeu-se à coleta das amostras de solo, em abril de 2018, nas duas voçorocas, e a caracterização mecânica dos materiais superficiais das suas vertentes, por meio de análises de laboratório. Segundo Oliveira (2010), as pesquisas em geomorfologia experimental (de campo e laboratório), com ênfase nos processos erosivos, aumentaram substancialmente e têm contribuído para um entendimento mais coerente e real dos mecanismos dos processos e sua influência na evolução das vertentes e das paisagens tropicais (MARZOLFF; POESEN. 2009; BEZERRA et al., 2016; POESEN, 2018; GUERRA et al., 2020; LOUREIRO et al., 2020).

A escolha dos locais para as coletas levou em consideração o diagnóstico das margens do reservatório, realizado em dezembro de 2017, através de caminhamentos e do uso do VANT para o registro de fotos e vídeos, que indicaram, na margem direita, uma maior incidência de redes de ravinas e de voçorocas em relação as outras áreas do entorno do reservatório. Além do mais, levou-se em consideração a previsão do EIA de que as principais



ações da dinâmica superficial sobre o entorno do reservatório seriam os processos erosivos, além dos deslizamentos e do assoreamento. Tendo esse “entorno” passado por cortes ao longo do período das obras de construção da barragem, expondo o solo e instabilizando o mesmo. O que motivou o EIA a indicar o impacto “instabilidade dos solos no entorno do reservatório”, destacando a necessidade das margens do lago serem monitoradas continuamente pelo operador da barragem, para verificar a incidência de processos erosivos.

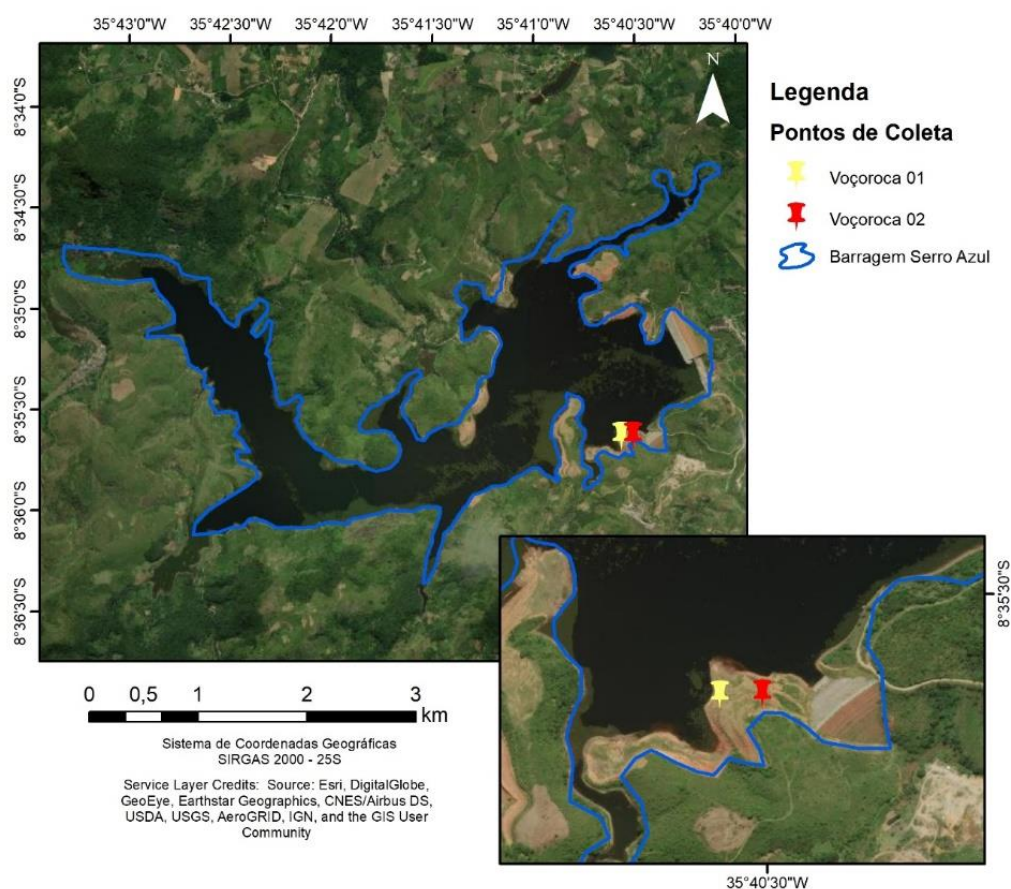
Nos trabalhos de campo foram utilizadas uma pá para a retirada das amostras de maneira uniforme em volume e profundidade, o uso de sacos resistentes para embalar o material, com a etiquetagem dos mesmos, para serem levados para a análise laboratorial, o uso do GPS para a localização dos pontos e o uso da prancheta de campo com o registro de informações básicas (localização dos pontos das coletas; características do solo, da vegetação, profundidade das coletas, uso antrópico etc.) que foram essenciais para uma melhor interpretação dos resultados obtidos com a análise granulométrica.

Os locais das coletas de solo das duas voçorocas têm suas coordenadas geográficas indicadas no Quadro 01 e mostrados na Figura 3, situados na margem direita do lago, próximos à barragem auxiliar.

**Quadro 1.** Localização dos pontos de coleta das amostras de solos na barragem Serro Azul.

Ponto de coleta	Coordenadas geográficas (Latitude)	Coordenadas geográficas (Longitude)
Voçoroca 1	8°35'37.99"S	35°40'30.35"O
Voçoroca 2 (duas coletas)	8°35'38.06"S	35°40'33.75"O

Fonte: Trabalho de campo.



**Figura 3.** Imagem de satélite mostrando os locais de coleta de solo na margem direita da barragem Serro Azul.

Fonte: Adaptada de © Google Earth (2018).

Na voçoroca 01, diante da sua baixa profundidade, foi realizada uma coleta a uma profundidade de 30 centímetros. Enquanto que na voçoroca 02, as coletas foram realizadas em dois pontos: meia encosta e no topo. Como referência, as coletas aconteceram no P2, sendo o topo a cerca de 5 metros e na meia encosta a uma profundidade de 2 metros. No entorno do reservatório, onde a declividade dos terrenos é elevada, predomina a ocorrência dos argissolos, que na área das voçorocas são profundos, moderadamente drenados e apresentam uma significativa diferença de textura entre o horizonte superficial A e o de subsuperfície B textural (Bt), com textura variando de arenosa a argilosa em superfície e de média a muito argilosa em subsuperfície.

O conhecimento da composição granulométrica permite compreender a dinâmica geomorfológica e diagnosticar a predisposição aos processos erosivos, especialmente aqueles que contribuem para o recuo das margens do reservatório (que varia a velocidade do processo, de acordo com as condições dos materiais afetados – mais alterados, mais fraturados e menos coesos ou mais coesos e com os ângulos das encostas mais favoráveis), que podem ser deflagrados através da erosividade das chuvas e do embate das ondas formadas por ventos atuantes sobre a superfície líquida (principalmente quando esses têm direção predominante alinhada ao reservatório) (AZEVEDO; RUBIO, 2018).

Foram realizadas três coletas de solo nas duas voçorocas. Após a etiquetagem dos sacos em campo, eles foram encaminhados para análise granulométrica no Laboratório de Geomorfologia do Quaternário, do Departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal de Pernambuco. Foram realizados os seguintes procedimentos: uso do método da pipetagem para os valores de silte e argila; pesagem da amostra na balança de precisão; colocação das amostras no agitador mecânico; secagem na estufa a 80° C; e utilização do jogo de peneiras e uso do rotap por 10 minutos. O objetivo principal foi realizar a análise granulométrica baseada nos procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7181 (análise granulométrica do solo e sedimentação) e na metodologia proposta por Gale e Hoare (1991), com a execução do peneiramento das amostras e a definição das classes de tamanho das partículas, segundo a escala de Wentworth.

Para a análise dos dados alcançados em cada fração, os mesmos foram processados de acordo com os critérios de Folk e Ward (1957), tendo realizado o cálculo do diâmetro médio, o grau de seleção, o grau de assimetria e de curtose. Os diagramas de Shepard (1954) e Pejrup (1988) foram utilizados para classificar os sedimentos, por meio do programa SysGran 3.0.

### 3.1.4 Mapeamento Geomorfológico

Por fim, foi elaborado um mapa geomorfológico da área a partir da proposta metodológica de mapeamento geomorfológico do IBGE (2009). Foram utilizados a plataforma do Google Earth e o software AutoCAD. A área foi georreferenciada com base nas coordenadas estabelecidas para a Área Diretamente Afetada (ADA), descritas no Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do empreendimento (ITEP/OS, 2011). No tocante à geração das informações de altimetria e curvas de nível da área de estudo, foi utilizado o aplicativo Cad-Earth.

## 4. Resultados e Discussão

A área estudada já apresentava a ocorrência de processos erosivos diante das características naturais, tendo, com a barragem, incrementado a dinâmica geomorfológica devido às alterações resultantes da obra, bem como da operação atual do empreendimento (PETTS; GURNELL, 2005; MA et al., 2012; SALES et al., 2017; GREGORY, 2019). Destaca-se a incidência dos movimentos de massa em encostas e topos do relevo colinoso, principalmente quando da exposição do solo e da movimentação de terras por meio de cortes e aterros, que acarretam na exposição do material à ação erosiva das chuvas, que estão presentes na área, resultando no aumento na ocorrência desses processos.

O eixo da barragem encontra-se estruturado em um vale assimétrico, com embasamento cristalino, predominando formas de colinas amplas e médias, destacando-se as planícies aluviais e terraços fluviais presentes (Figura 4). De acordo com a morfodinâmica dos dois compartimentos predominantes na área, verifica-se que apresentam um perigo associado aos movimentos de massa, dados os padrões de dissecação do relevo, amplitude do relevo e declividades acima dos 30% (ITEP/OS, 2011).



**Figura 4.** Relevo colinoso à montante da área da barragem Serro Azul (21 dez. 2017). Fonte: autores.

Tais compartimentos estão sujeitos a inundações periódicas, correspondendo a terrenos baixos e mais ou menos planos, junto às margens do rio Una, nos quais se desenvolviam atividades ligadas à agropecuária, policultura e pequenas vilas (ITEP/OS, 2011; SOUZA *et al.*, 2017), na época anterior ao início da construção e enchimento do reservatório, estando, atualmente, parte dessas áreas submersas, diante do enchimento iniciado no final do primeiro semestre de 2017. A figura 5 apresenta a mesma área inundada junto ao barramento, mostrada na figura 4, expondo diversos trechos que sofreram cortes e aterros no período da construção, e que não foram totalmente submersos com o enchimento do reservatório, fazendo com que esses locais, atualmente, apresentem condições favoráveis (erosividade, erodibilidade, característica da vertente, declividade, cobertura vegetal etc.) para a deflagração de processos erosivos e movimentos de massa.



**Figura 5.** Finalização das obras na área do futuro reservatório da barragem Serro Azul. **Fonte:** Pedro Cavalcanti (fev. 2017).

Para um melhor entendimento da compartimentação geomorfológica e morfodinâmica, a Figura 6 detalha o recorte da área do reservatório da barragem, como também o percurso da rodovia estadual PE-103 (que ligava a cidade de Palmares a cidade de Bonito), que foi submersa com o enchimento do reservatório, especialmente o trecho contido na planície aluvial e no terraço fluvial.

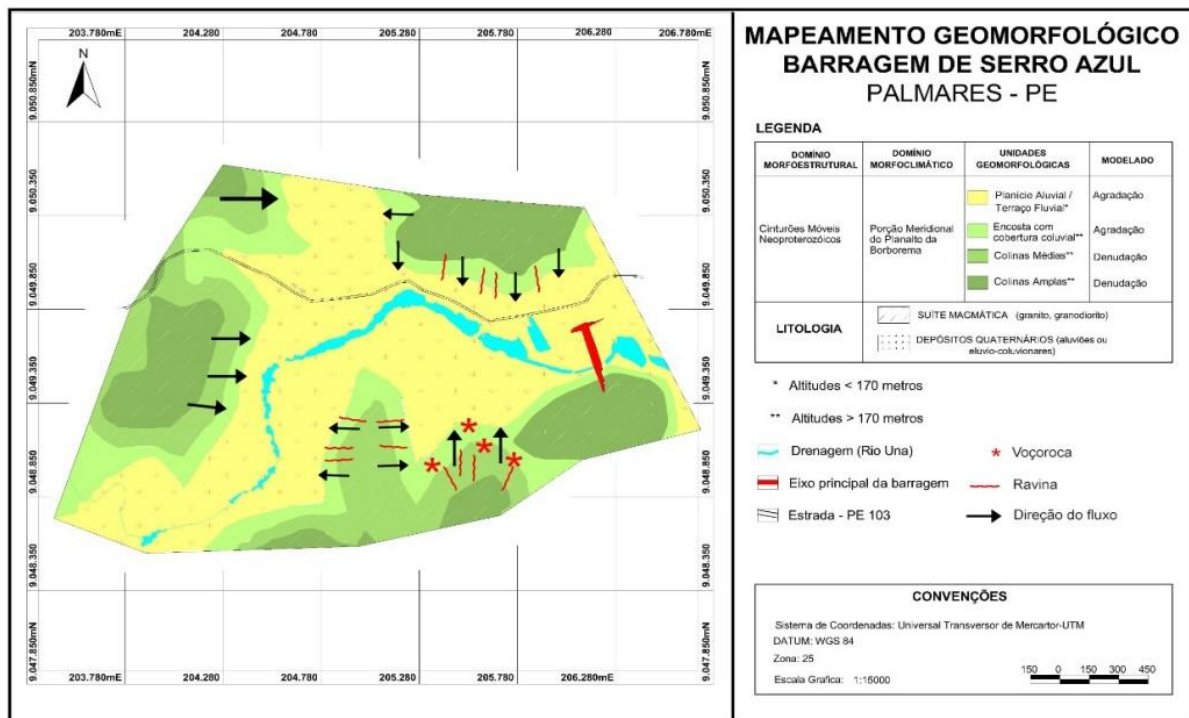


Figura 6. Mapa geomorfológico da área da barragem Serro Azul. Fonte: autores.

Destaca-se uma área constituída por uma planície aluvial e a presença de terraços fluviais ao longo do curso do rio Una, que percorre uma área mais rebaixada (por volta dos 150 metros), encaixada entre colinas (amplas e médias), que alcançam 255 metros em alguns pontos mais aguçados, associadas à presença de encostas com cobertura coluvial, decorrente das declividades presentes, do alto índice pluviométrico (em determinados meses do ano, especialmente de abril a julho) e do material pedológico suscetível aos processos erosivos (ravinas e voçorocas) e aos movimentos de massa. O mapa expõe que as duas margens próximas ao barramento estão sendo afetadas por ravinas e voçorocas. No tocante à margem direita, objeto do monitoramento das voçorocas discutidas neste artigo, a situação é mais grave, já que diversas ravinas e voçorocas foram identificadas no campo, que tendem a agravar tais processos através do aumento do comprimento das voçorocas, bem como o seu alargamento diante da evolução da erosão das ravinas, que passam a se expandir em comprimento, largura e profundidade com o passar do tempo.

Ross (1990) considera o mapeamento geomorfológico como algo de grande importância para as pesquisas nessa área do saber, tornando-se igualmente relevante para estudos de caracterização ambiental, de planejamento físico territorial, de instalação de grandes projetos de engenharia e de exploração mineral. Dessa forma, o mapeamento geomorfológico é essencial na compreensão e entendimento dos ambientes naturais, o que resulta numa melhor avaliação dos impactos (positivos e negativos) que uma determinada obra de engenharia pode gerar (LUIZ; LAMAS, 2017; BARBOSA et al., 2019). Tal mapeamento oferece subsídio para os projetistas das barragens terem o conhecimento das condições favoráveis e desfavoráveis da implantação do seu eixo. Para Argento (2007, p. 368), “[...] o grande potencial na aplicação de mapeamentos geomorfológicos está no seu interfaceamento com os projetos de planejamento da ocupação humana, com vistas à economia dos recursos investidos, mediante a

prevenção de problemas futuros”. Obviamente, para uma análise integrada do meio físico, o mapa geomorfológico necessita vir acompanhado de um diagnóstico e de uma avaliação holística dos outros componentes, buscando avaliar as suscetibilidades e vulnerabilidades. No entanto, vale salientar que a escolha do local de construção da barragem está também condicionada ao objetivo da mesma. Se o objetivo for o controle de cheias, a sua construção, normalmente, acontece a montante de uma cidade, distrito ou de uma comunidade (o eixo principal de Serro Azul encontra-se a montante da cidade de Palmares e do distrito de Serro Azul), a fim de proteger as propriedades e vidas humanas a jusante da devastação das inundações.

Por meio das técnicas e dos procedimentos adotados, foram identificadas diversas formas menores, resultantes da ação dos processos erosivos atuais associados às intervenções antropogênicas (ravinas, voçorocas, cortes de taludes, escavações, depósitos tecnogênicos como assoreamentos, aterros, “bota-foras”, ou as consideradas naturais, como cicatrizes erosivas, bancos de deposição fluvial, dentre outros). Portanto, sendo fatores favoráveis ao agravamento do assoreamento do reservatório, comprometendo o tempo de vida útil da barragem, já que o transporte do material sedimentar é uma das preocupações mais expressivas para esse tipo de empreendimento (COELHO, 2008; MA et al., 2012; AZEVEDO; RUBIO, 2018; GUTIERRES, 2019).

Na margem direita, como apresentado na figura 6, ravinas e voçorocas estão ocorrendo de forma mais intensa e com diferentes graus de evolução. O levantamento no local também identificou e permitiu a análise das áreas em processo de erosão e/ou propícias à instalação de fatores deflagradores dos processos erosivos na barragem, por meio das características do relevo e das propriedades físicas do solo. Azevedo e Rubio (2018) apontam as condições de operação do reservatório como um dos fatores que potencializam a erosão das margens, através da variação do nível operacional dos reservatórios. E enfatizam a possibilidade da ocorrência de diferentes processos erosivos decorrentes da relação entre as características geomorfológicas das margens e as condições operacionais. Para tanto, citam dois tipos principais de sistemas de operação de reservatório: a fio d’água e de acumulação. A barragem Serro Azul se enquadra nesse segundo tipo. Os autores explicam que as condições de operação do reservatório, especialmente a variação do nível operacional dos reservatórios, é um fator potencializador para a erosão das suas margens. Logo, entendem que “[...] diferentes processos erosivos atuam, dependendo da relação entre as características geomorfológicas das margens e das condições operacionais” (AZEVEDO; RUBIO, 2018, p. 256).

Com essa compreensão, faz-se necessário investigar os materiais presentes na área e como reagem diante da dinâmica fluvial e climática. Para isso, foram obtidos os seguintes resultados da análise granulométrica realizada nas amostras de solo coletadas nas duas voçorocas monitoradas (Tabela 1).

**Tabela 1.** Resultados da análise granulométrica das amostras de solos das voçorocas monitoradas na margem direita da barragem Serro Azul (Norma de referência: ABNT/NBR 6502/95 – Terminologia – Rochas e Solos).

	Areia Grossa (0,6 – 2mm)	Areia Média (0,2 a 0,6mm)	Areia Fina (0,06 a 0,2mm)	Total (Peneiramento)	Silte	Argila	Total da amostra (g)	Areia Fina + Silte (gramas)
<b>Voçoroca 1</b>	7,29	15,46	19,82	42,57	53,54	3,89	100	73,36 g
<b>Voçoroca 2 (topo)</b>	5,27	15,36	18,58	39,21	56,97	3,82	100	75,55 g
<b>Voçoroca 2 (meia encosta)</b>	11,99	13,94	17,69	43,62	52,42	3,96	100	70,11 g

A análise demonstrou o predomínio das frações silte e areia fina em todas as amostras. Procedeu-se à inserção de uma coluna com valores da soma dessas duas frações, adaptando a classificação granulométrica. Essas frações superaram os 70% em relação ao total das demais e classificadas na classe franco silteoso. Sobre a predominância dessas frações, Amah et al. (2021) destacam que, com base em autores, que pesquisaram outros lugares no sudeste da Nigéria, a origem da erosão do solo está relacionada às formações geológicas com predominância de silte e areia. Os resultados das análises de laboratório revelaram ser um bom indicador de solos propensos à erodibilidade e formação de voçorocas, em associação com outros fatores (hidrologia, fatores climáticos, ações humanas etc.). Sendo assim, foram aplicados os diagramas de Shepard (1954) e Perjup (1988) para as três amostras na margem do reservatório da barragem Serro Azul. Na amostra da voçoroca 1 foi obtida a fração silte arenosa, uma assimetria “muito negativa” e uma curtose “muito platicúrtica” (Figura 7).

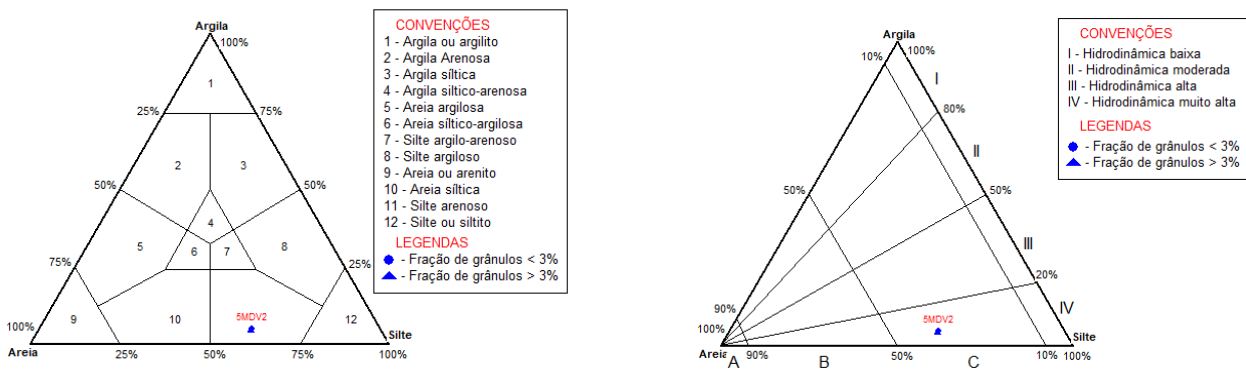


Figura 7. Aplicação dos diagramas de Shepard (1954) e Perjup (1988) na amostra voçoroca 1. Fonte: autores.

Já na amostra do topo da voçoroca 2 foram obtidas as mesmas classificações da amostra anterior (Figura 8).

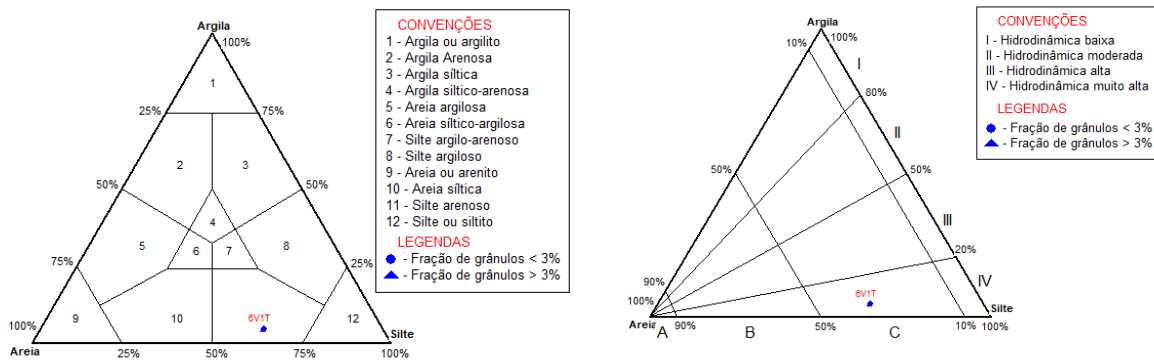
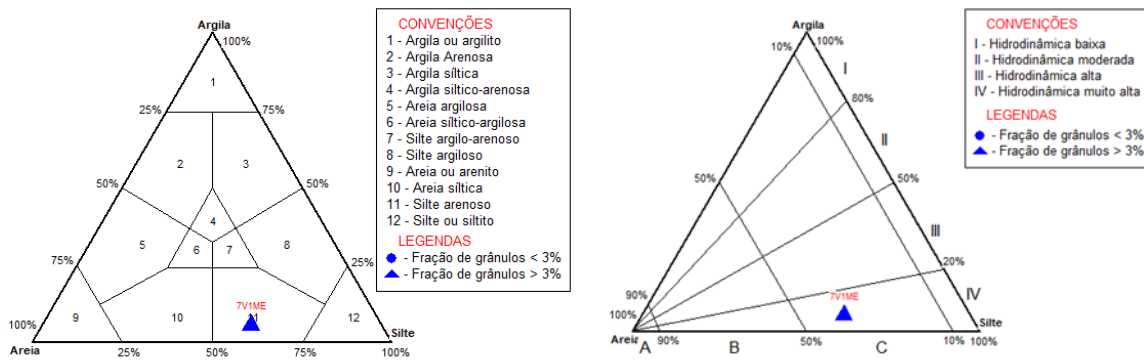


Figura 8. Aplicação dos diagramas de Shepard (1954) e Perjup (1988) na amostra voçoroca 2 (topo). Fonte: autores.

Por fim, a amostra da voçoroca 2 (meia encosta) manteve a mesma classificação das anteriores, contudo, evidenciou-se a presença de maior quantidade de grânulos – 4,6% (Figura 9).



**Figura 9.** Aplicação dos diagramas de Shepard (1954) e Pejrup (1988) na amostra voçoroca 2 (meia encosta). Fonte: autores.

Pejrup (1988) apresenta um diagrama triangular voltado para classificar os sedimentos, de acordo com as condições de hidrodinâmica que ocorreram no período de deposição dos sedimentos. As seções (I, II, III e IV) presentes no diagrama refletem o grau de energia da hidrodinâmica da área. A seção I reflete ambientes com condições hidrodinâmicas muito baixas, enquanto que as demais refletem aumentos gradativos de energia (CORRÊA, 2005). Por outro lado, as seções (A, B, C e D) são definidas por meio do conteúdo de areia existente nos sedimentos. Dessa forma, o diagrama de Pejrup (1988) é dividido em dezesseis grupos, sendo nomeados por números (indicando as condições hidrodinâmicas predominantes no processo de deposição) e as letras (indicando o tipo de sedimento). Logo, de acordo com as figuras 7, 8 e 9, todas as amostras foram classificadas com uma hidrodinâmica muito alta (IV) e na seção C (10% a 50% de areia). Essa hidrodinâmica muito alta correlaciona-se com a distribuição sedimentar, no que indica processos de alta energia no sistema, relacionados a velocidade e intensidade dos processos, correspondente aos valores elevados de silte arenoso, presentes nos sedimentos que foram analisados. Vinculados ao comportamento da curtose identificada como “muito platicúrtica” para todas as amostras, o que significa dizer que os sedimentos são de ambientes de baixa movimentação, indicando uma distribuição mais homogênea na frequência de ocorrência dos movimentos. Segundo Queiroz e Rocha (2010), a assimetria “muito negativa” justifica-se pela presença da fração arenosa, isso indica também que são áreas de remoção seletiva, já que uma assimetria positiva indica áreas de deposição. As características granulométricas caracterizam o ambiente como bastante dinâmico.

Souza et al. (2017) destacaram a importância, na construção de barragens, do estudo das morfologias, da declividade e do comprimento das encostas, mas sem se esquecer do material que recobre tais feições – os solos, buscando a análise das suas propriedades físicas, que constituem um dos fatores na degradação e na recuperação das áreas com alto potencial erosivo. Logo, o agravamento das erosões marginais em reservatórios tem causado problemas econômicos e ambientais (TOMMASELLI et al., 2014). Portanto, os resultados granulométricos, referentes à Tabela 1 e às Figuras 7, 8 e 9 retratam bem a alta erodibilidade dos solos analisados. Todas as amostras coletadas apresentaram valores superiores a 70% (silte + areia fina), sendo que a referente à voçoroca 2 (topo), obteve o valor mais alto, com 75,55%. Solos com alto percentual de areia fina e silte possuem baixa coesão e, conseqüentemente, são mais facilmente erodidos e transportados. Diversos autores nacionais e internacionais demonstram isso nas suas pesquisas (DE VENTE; POESEN, 2005; CARVALHO et al., 2006; GOUDIE; BOARDMAN, 2010; GUERRA et al., 2017; GUERRA et al., 2018; GUERRA et al., 2020; BARBOSA et al., 2021). De posse dos resultados das análises dos materiais coletados, o entendimento do monitoramento das voçorocas passa a ser melhor compreendido.

### A evolução do voçorocamento na margem do reservatório

O monitoramento das margens do reservatório indicou que a margem direita tem apresentado uma série de processos erosivos, especialmente ravinas e voçorocas, desde o início da operação do empreendimento (Figura 10). A imagem evidencia cicatrizes que estão associadas aos trechos com características favoráveis do terreno para a deflagração dos processos, além da diferenciação da cobertura vegetal, que é mais densa em áreas menos afetadas

pelas obras. Outro aspecto na realidade pesquisada são as condições de operação do reservatório como um dos fatores que potencializam a erosão das margens através da variação do nível operacional. E a possibilidade da ocorrência de diferentes processos erosivos decorrentes da relação entre as características geomorfológicas das margens e as condições operacionais (AZEVEDO; RUBIO, 2018).

Trabalhos como o de Amah et al. (2021), concluíram que a área estudada na Nigéria sofre com o impacto do relevo, constatando que a pressão erosiva dos escoamentos aumenta com o aumento da declividade, resultando em voçorocas. Tal situação é agravada no pico da estação chuvosa e a presença de solos com características desfavoráveis, indicando que, assim como a realidade da barragem Serro Azul, a combinação de fatores (hidrologia, tipo de solo, fatores climáticos e humanos) é responsável pela propagação dos processos de voçorocamento nas duas realidades.



**Figura 10.** Margem direita do reservatório e a indicação (seta vermelha) das voçorocas 1 (V1) e 2 (V2). Fonte: autores (dez/2017).

No tocante à viabilidade da execução do monitoramento, esse foi possível devido às condições de vigilância da área e de acesso de pessoas, diminuindo a possibilidade da retirada das estacas e/ou da descaracterização da voçoroca por ações humanas. Sendo assim, a Tabela 2 expõe os dados referentes ao monitoramento da voçoroca 01. A mesma apresentou medidas de profundidade, largura e comprimento bem menores, em relação à segunda voçoroca, tendo as estacas sido colocadas a uma distância de sete metros. No geral, a voçoroca totalizou um comprimento de 11 metros, com uma largura média de 1,60m e profundidade média de 58,6 centímetros.

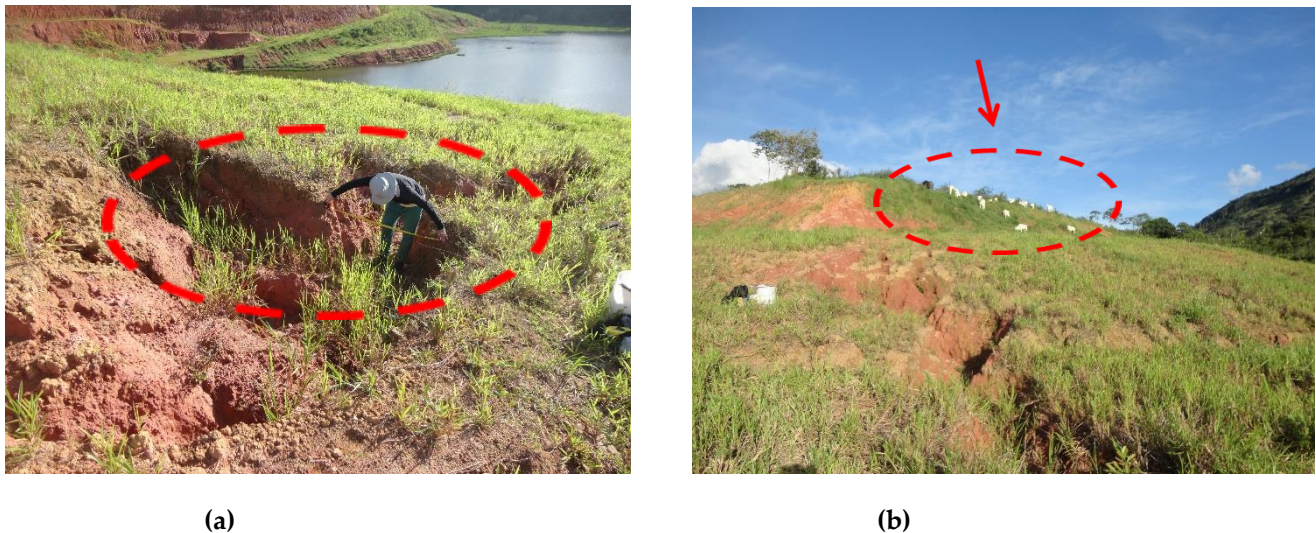
Observa-se que os avanços dos processos se deram no período entre abril de 2018 (início do monitoramento) e agosto de 2018, especialmente nas estacas dos pontos 1 e 2 (borda direita), que apresentaram um recuo de 65 centímetros, tendo mantido esses recuos nos outros dois trabalhos de campo realizados (abril e outubro de 2019). Por outro lado, os pontos da borda esquerda apresentaram uma pequena perda identificada na medição feita em agosto/2018, tendo mantido esses recuos nos outros dois trabalhos de campo (abril/2019 e outubro/2019). Os dois pontos do topo também seguiram a dinâmica de recuo da margem esquerda, contudo, o recuo só foi identificado na segunda medição (campo de abril/2019).



**Tabela 2.** Dados do monitoramento da voçoroca 1 na margem direita da barragem Serro Azul.

<b>VOÇOROCA 01 - Barragem Serro Azul (Município: Palmares – PE)</b>				
<b>Início do monitoramento:</b> 26/04/2018	<b>Comprimento:</b> 11 metros	<b>Distância das estacas para a borda:</b> 7 metros	<b>Coordenadas geográficas:</b> 08° 35.63' S 35° 40.52' W	
<b>LARGURA</b>	<b>PROFUNDIDADE</b>	<b>Campo: 23/08/2018</b>	<b>Campo:</b> <b>17/04/2019</b>	<b>Campo: 31/10/2019</b>
L1 (Topo): 4,27 m	P1 (topo): 90 cm	P1Direita: <b>6.35 m</b> P2Direita: <b>6.35 m</b> P3Direita: <b>7 m</b>	P1Direita: <b>6.35 m</b> P2Dreita: <b>6.35 m</b> P3Direita: <b>7 m</b>	P1Direita: <b>6.35 m</b> P2Dreita: <b>6.35 m</b> P3Direita: <b>7 m</b>
L2: 1,54 m	P2: 65 cm			
L3: 1,20 m	P3: 76 cm	P1Esquerda: <b>7 m</b> P2Esquerda: <b>6,89 m</b> P3Esquerda: <b>6,95 m</b>	P1Esquerda: <b>7 m</b> P2Esquerda: <b>6.89 m</b> P3Esquerda: <b>6.91 m</b>	P1Esquerda: <b>7 m</b> P2Esquerda: <b>6.89 m</b> P3Esquerda: <b>6.91 m</b>
L4: 1,54 m	P4: 48 cm			
L5: 60 cm	P5: 51 cm	Topo 1: <b>7 m</b> Topo 2: <b>7 m</b>	Topo 1: <b>6.91 m</b> Topo 2: <b>6.92 m</b>	Topo 1: <b>6.91 m</b> Topo 2: <b>6.82 m</b>
L6 (base): 50 cm	P6 (base): 22 cm			

Compreende-se que a baixa declividade (13%), a maior presença de uma vegetação de baixo porte ao redor da voçoroca (chegando até a colonizar algumas partes internas) e a baixa ocorrência de ravinas ao redor da voçoroca (sendo possível constatar as duas primeiras características na Figura 11), podem representar os principais fatores que justificam esse ritmo menor de recuo das bordas da voçoroca 1, se comparado ao ritmo de recuo na voçoroca 2. Com relação a vegetação, essa foi introduzida artificialmente fruto do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) recomendado pelo Estudo de Impacto Ambiental, já que no período de construção foi necessária a limpeza dos solos do entorno do reservatório. Portanto, as interações resultantes entre solos e raízes podem contribuir com o reforço da estabilidade e a modificação do regime de saturação do solo, contribuindo para a redução de processos erosivos (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017; SALES et al., 2017; CASTRO et al., 2019). Outras variáveis (a exemplo do solo mais propenso à erosão) podem ser mais determinantes para a ocorrência da erosão, mesmo encontrando variáveis “mais favoráveis” a um ritmo menor de evolução do processo. Com relação às diferenças granulométricas, estas não são representativas, já que os resultados da análise granulométrica das amostras de solo das duas voçorocas demonstraram um padrão semelhante (Tabela 1).



**Figura 11.** (a) Medições sendo realizadas para preparação do estaqueamento da voçoroca 1 na margem direita do reservatório da barragem Serro Azul; (b) Presença de animais de grande porte com a consequente degradação da vegetação e compactação do solo com o registro feito dentro da voçoroca. (abr./2018). Fonte: trabalho de campo.

Conforme as fotos da Figura 11, foram recorrentes a presença de animais (bois) na área do entorno da voçoroca nas visitas realizadas, o que pode favorecer, com o passar do tempo, para o aumento dos processos erosivos na área, já que esses animais se alimentam da vegetação ali presente, e o seu pisoteio constante contribui para a compactação do solo (SALES et al., 2017; GUERRA; JORGE, 2021; MORAIS; MONTANHER, 2022).

Enquanto que na voçoroca 2, as profundidades precisaram ser medidas através de cinco segmentos: topo (cabeceira), três na meia encosta e um na base. A profundidade média foi calculada a partir dos valores obtidos em cada trecho medido. Enquanto que as estacas foram colocadas a uma distância de 10 metros da borda. No início do monitoramento essa voçoroca apresentava 15,4 metros de comprimento, com uma largura média de 9,93 metros e uma profundidade média de 5,88 metros (tabela 3). Logo, a voçoroca 2 apresentou uma profundidade bem maior em relação ao que foi encontrado na voçoroca 1 (58,6 cm), compreendendo 4,6 metros no topo e 6,6 metros na base, enquanto a voçoroca 1 apresentou 22 centímetros na base e 90 centímetros no topo.

**Tabela 3.** Dados do monitoramento de voçoroca 2 na margem direita da barragem Serro Azul.

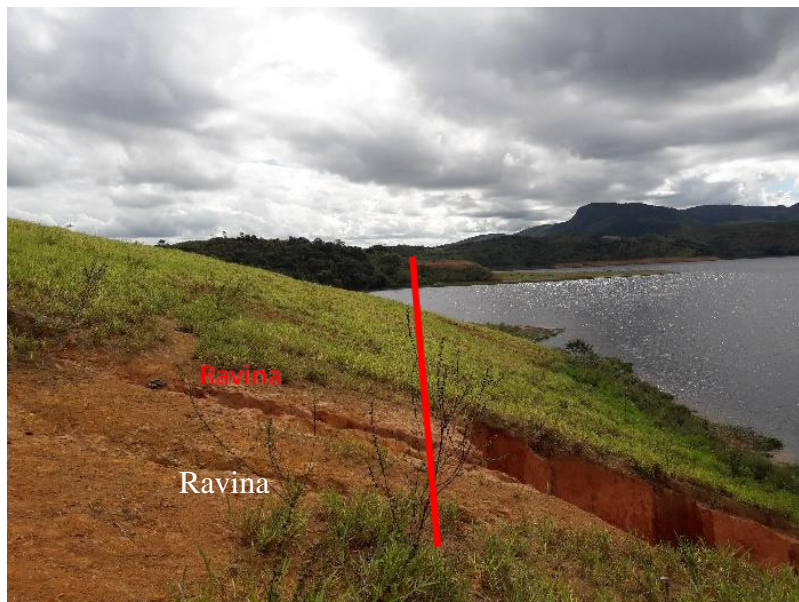
VOÇOROCA 02 - Barragem Serro Azul (Município: Palmares – PE)				
Início do monitoramento: 26/04/2018	Comprimento: 15,4 m	Distância das estacas para a borda: 10 metros	Coordenadas geográficas: 8° 35' 37,5'' S 35° 40' 29,4'' W	
LARGURA	PROFUNDIDADE	Campo: 23/08/2018	Campo: 17/04/2019	Campo: 31/10/2019
L1 (topo) = 10,25 m	P1 (Topo) = 4,6 m	P1Direita: 8,50 m P2Direita: 10 m P3Direita: 9,68 m	P1Direita: 8,50 m P2Direita: 9,57 m P3Direita: 9,68 m	P1Direita: 7,21 m P2Direita: 9,57 m P3Direita: 9,36 m
L2 = 10,29 m	P2 = 5,5 m			
L3 = 8,9 m	P3 = 6,2 m	P1Esquerda: 10 m P2Esquerda: 9,16 m P3Esquerda: 10 m	P1Esquerda: estaca saiu do lugar P2Esquerda: 8,90 m	P1Esquerda: estaca saiu do lugar no campo anterior
L (base) = 10,3 m	P4 = 6,5m			

			P3Esquerda: <b>10 m</b>	P2Esquerda: <b>estaca saiu do lugar</b> P3Esquerda: <b>10 m</b>
	P5 (Base) = 6,6m	Topo 1: <b>9,66 m</b> Topo 2: <b>9,22 m</b>	Topo 1: <b>8,55 m</b> Topo 2: <b>8,73 m</b>	Topo 1: <b>3,03 m</b> Topo 2: <b>3,05 m</b>

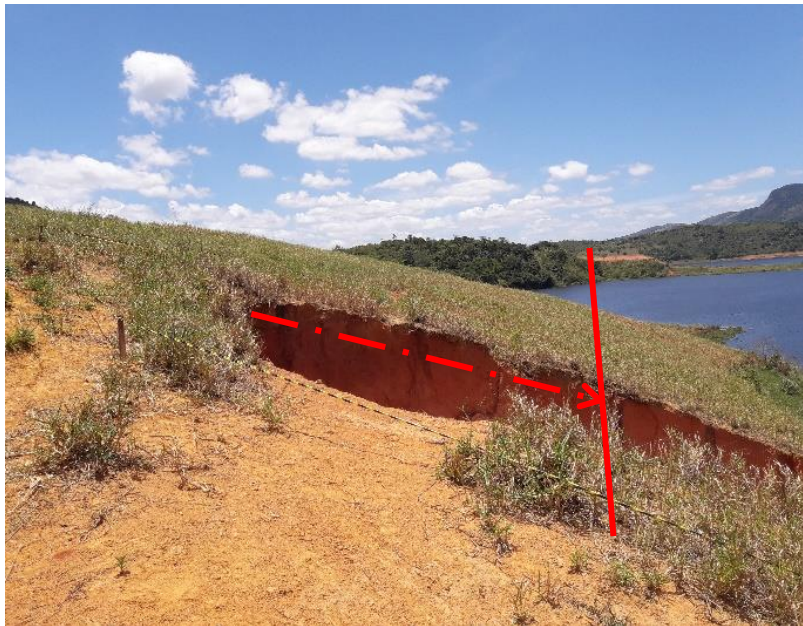
Os dados demonstraram alterações consideráveis nas estacas do lado direito da voçoroca, especialmente no ponto P1, principalmente após o período chuvoso do ano de 2019. No entanto, as medições no mês de abril/2019 indicaram certa estabilização dos três pontos, verificando-se uma perda da borda no ponto P2 (43 cm).

As estacas do lado esquerdo não sofreram alterações, exceto a estaca P2, o que também se verificou nas medições no mês de abril de 2019. Por fim, as estacas do topo apresentaram o maior dinamismo, verificando-se a perda da borda nos dois pontos e nos dois períodos de medição, ocasionado pela presença de ravinas que se conectavam com o topo da voçoroca, desde o início do monitoramento. O “Topo 1” apresentou uma perda de 1,11m de agosto/2018 a abril/2019, enquanto o “Topo 2” perdeu 1,27m nas duas medições, estando tais avanços associados a existência de uma rede de ravinas no topo da voçoroca, alcançando extensões acima de dois metros, trinta centímetros de profundidade e de largura (figura 12). No entanto, a maior perda foi na medição de outubro de 2019, quando o “Topo 1” perdeu 5,52 m e o “Topo 2” recuou 5,68m, em relação às medidas obtidas em abril do mesmo ano (que fica demonstrada nas fotos da Figura 12). Tal dinâmica, provavelmente, fez refletir na diminuição da estaca do P1Direita, que registrou 7,21m em outubro/2019, enquanto que em abril/2019 estava em 8,50m. Por fim, no monitoramento de outubro, o ponto P2E, evidenciando um intenso processo de erosão laminar, teve sua estaca deslocada, sendo bem comprovado no campo pela considerável diminuição da vegetação e a exposição do material pedológico no entorno do ponto utilizado para medição.

Diante dos cenários apresentados, os dados do monitoramento das duas voçorocas evidenciam existir uma relação dos meses mais chuvosos e um possível padrão na deflagração e na intensificação dos processos erosivos na área. Como exemplo, de março a agosto de 2019 (tabela 1), esses meses concentraram 79,4% da precipitação anual. Portanto, sendo um período com grande remoção de sedimentos, a exemplo dos topos da voçoroca 2, onde o recuo ultrapassou cinco metros em cada ponto.



(a)



(b)

**Figura 12.** Recuo da cabeceira da voçoroca 02 (demonstrada pela linha vermelha, que foi inserida no mesmo local nas duas fotos – a e b). Fonte: (a) trabalho de campo (ago. 2018). (b) trabalho de campo (out. 2019).

As fotos mostram uma evolução considerável da voçoroca (Figura 12), já que a linha vermelha, inserida no mesmo ponto de referência nas duas fotos, demonstra que, em agosto de 2018, a cabeceira da voçoroca estava sendo afetada por uma rede de ravinas e que, diante dos meses chuvosos seguintes, a foto registrada em outubro de 2019 indica uma perda considerável de solo, evidenciada pelo distanciamento da linha vermelha e da perda de 5,52m (entre abril e outubro de 2019), segundo a medição feita em campo e detalhada na Tabela 3. A presença de uma rede de ravinas (figura 12a), juntamente com a ocorrência de alcovas de regressão (que podem ser visualizadas na figura 14a – registro feito também em agosto de 2018), já indicavam que esses sedimentos seriam deslocados pela erosão mais superficial, bem como pelo desmoronamento das paredes internas da voçoroca. O que veio a ser constatado nas medições efetuadas no segundo semestre de 2019.

Por fim, o processo erosivo analisado na figura 12 vem contribuindo para a deposição dos sedimentos no reservatório, resultando no seu futuro assoreamento (conforme indicado pelo círculo vermelho na Figura 13). Esse cenário corrobora com o levantamento de Poesen et al. (2003), que a partir de dados coletados em diferentes partes do mundo, expuseram que as taxas de perda de solo por voçorocas representam de 10% a 94% da produção total de sedimentos causada pela erosão hídrica. Os autores destacam que as voçorocas desempenham uma importante função na produção de sedimentos que são transportados pelos rios e que ocasionam o assoreamento dos reservatórios. Destacam que um estudo desenvolvido no reservatório de Puentes (sudeste da Espanha), entre 1970 e 1994, demonstrou que só 40% dos sedimentos depositados se originaram no solo superficial de 10cm de espessura. Enquanto 60% dos sedimentos acumulados vieram de horizontes subsuperficiais do solo. Também apontam que pesquisa recente nas bacias hidrográficas de vinte e dois reservatórios espanhóis mostrou que a produção específica de sedimentos aumenta quando a frequência de voçorocas aumenta na bacia hidrográfica. Logo, existe uma relação no fornecimento de sedimentos para o reservatório decorrentes das voçorocas e da dinâmica dos canais fluviais.

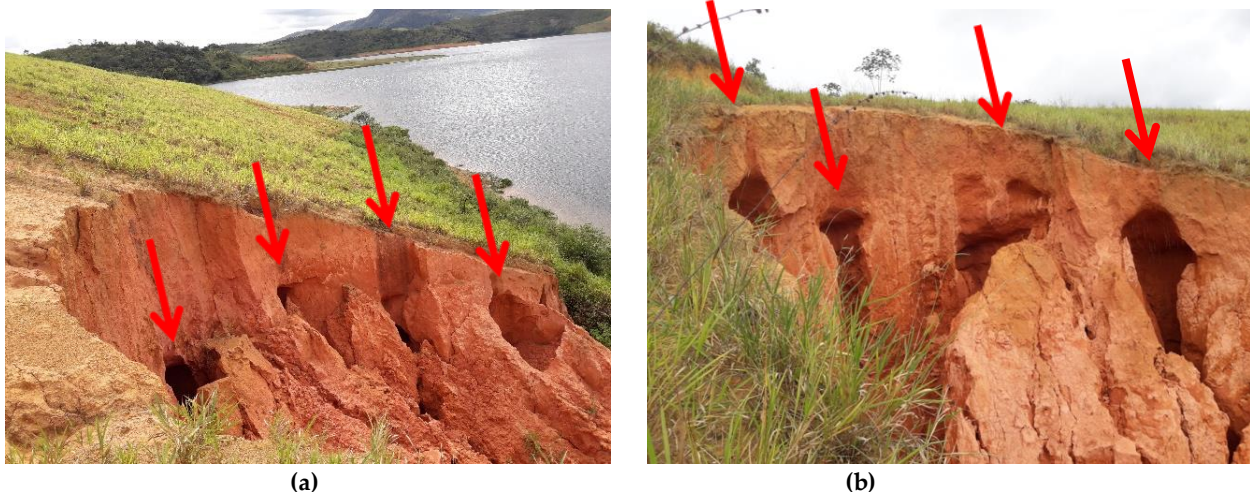
Ma et al. (2012) explicam que as mudanças no regime de sedimentos causadas por barragens podem variar significativamente entre os trechos dos rios e ao longo do tempo, o que se constitui em preocupação por parte dos pesquisadores da geomorfologia fluvial (PETTS; GURNELL, 2005; MA et al., 2012). Na área de estudo de Ma et al.

(2012), a barragem de Sanmenxia foi construída em 1960 e, ao longo do tempo, os modos de operação mudaram, resultando em considerável variação no regime de fluxo e de sedimentos no rio Amarelo na China. Portanto, futuras pesquisas poderiam avaliar a evolução desses processos na realidade da barragem Serro Azul.



**Figura 13.** Deposição dos sedimentos oriundos da voçoroca, contribuindo para o assoreamento do reservatório da barragem Serro Azul. Fonte: trabalho de campo (ago. 2018).

Outro exemplo que demonstra uma dinâmica acelerada desse voçorocamento é a presença das alcovas de regressão (Figura 14), que apresentaram evolução considerável, entre agosto de 2018 e abril de 2019, o que também contribuiu para o recuo da cabeceira da voçoroca (Figura 12b), já que é comum o desprendimento do teto das alcovas. Os dados da tabela 3 comprovam a dinâmica mais acentuada da borda do lado direito da voçoroca monitorada em relação a borda esquerda (baixa ocorrência de alcovas), pois o “P1Direita”, que compreende boa parte da extensão das alcovas retratadas na figura 14, registrou um recuo de 1,50m nos quatro primeiros meses e de 1,29m na medição realizada no ano seguinte. Tais feições de retrabalhamento, também presentes nas reentrâncias da cabeceira da voçoroca, potencializam a expansão dos processos erosivos na área. Além das contribuições da dinâmica superficial, a ocorrência das alcovas evidencia a influência da dinâmica subsuperficial, não tendo sido possível retratar os indicativos de ocorrência desses processos subsuperficiais. Apesar do monitoramento ter sido realizado já na fase de operação da barragem, não se pode deixar de destacar a influência para essa deflagração processual oriunda das ações executadas no período da construção, já que a perda de solo em canteiros de obras acontece e pode variar de acordo com as várias ordens de grandeza durante as várias fases de construção, como bem explica Trenouth e Gharabaghi (2015) e que propõem modelos de perda de solo baseados em eventos para canteiros de obras a partir do monitoramento de escoamento superficial realizado em alguns locais.



**Figura 14.** Alcovas de regressão identificadas na borda direita da voçoroca 02: (a) No final do período chuvoso (ago/2018); (b) No início do período chuvoso (abr/2019). Fonte: trabalho de campo.

Em sendo tais processos intrínsecos a um empreendimento dessa natureza, sujeito ao licenciamento ambiental e que exige a elaboração do Estudo de Impacto Ambiental (EIA), este é um instrumento fundamental na previsão de cenários, mas também na gestão ambiental do empreendimento, que envolve a tomada de decisões no tocante às medidas mitigadoras dos impactos reais e potenciais.

#### **Programa Ambiental “Controle de erosão” previsto no EIA da barragem Serro Azul**

O Estudo de Impacto Ambiental da barragem Serro Azul estabeleceu dezesseis Programas Ambientais (Monitoramento e Acompanhamento), sendo oito voltados para o meio biótico, cinco para o meio socioeconômico e três para o meio físico (“monitoramento hidrológico”; “monitoramento da qualidade da água”; e “controle de erosão”). Segundo o ITEP/OS (2011), o programa de controle de erosão tem por objetivo identificar, caracterizar e acompanhar o desenvolvimento das feições erosivas, que ocorrerem durante a construção e a operação do reservatório, estimulando a prevenção das erosões durante a obra. Logo, deve-se prever e analisar as condicionantes dos processos e mecanismos de instabilização das encostas marginais do lago, e das margens dos rios à jusante da barragem. Sendo assim, o estudo indica as áreas onde serão implementadas as medidas previstas, dentre os quais o entorno do reservatório, local das voçorocas monitoradas.

No EIA é proposto que a implementação das medidas será verificada por meio da realização de vistorias técnicas rotineiras, para acompanhamento das intervenções realizadas e monitoramento dos processos erosivos e da drenagem provisória implantada, e acompanhamento da execução das ações preventivas e/ou corretivas. No entanto, durante o tempo de incursões de campo (agosto de 2017 a outubro de 2019), não se observou a presença de nenhuma equipe e/ou indícios nas áreas que pudessem evidenciar a implementação de ações no controle dos processos erosivos, o que caracteriza um erro na aplicação desse estudo ambiental (DUARTE et al., 2017; CARVALHO; CABRAL, 2020; GUTIERRES et al., 2020). De modo geral, o EIA estabelece as seguintes medidas para o Programa de Controle de Erosão:

- a) Estudo e definição das alternativas técnicas para controle dos processos erosivos, demandando a realização das atividades a seguir relacionadas: [...]
- b) Definição dos procedimentos a serem adotados: [...]
- c) Estudo e definição das ações a serem desenvolvidas para recuperação das áreas degradadas por erosão, deslizamento e assoreamento: [...]
- d) Retaludamento e proteção de taludes;
- e) Material cartográfico para o monitoramento;
- f) Vistorias de campo e caracterização geológico-geotécnica dos processos de instabilização.

Sendo assim, como demonstrado ao longo do texto, tais medidas de controle de erosão não foram implementadas durante o período de monitoramento. Logo, o EIA, enquanto instrumento para subsidiar o

licenciamento ambiental, não vem sendo utilizado para a gestão ambiental da barragem no que se refere à identificação e ao monitoramento dos processos erosivos (ravinas e voçorocas), bem como a implementação das ações para a recuperação dessas áreas degradadas, podendo refletir num cenário futuro de agravamento do assoreamento do lago da barragem. Portanto, constata-se que as recomendações presentes no EIA desempenham (ou podem desempenhar) importante função como um dos instrumentos a serem utilizados no planejamento e no gerenciamento ambiental de um curso-d'água impactado por uma barragem (COSTA, 2012; GUTIERRES, 2019; CARVALHO; CABRAL, 2020), como também os demais cursos d'água, que compõem a bacia hidrográfica (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017). E que o maior desenvolvimento das voçorocas resulta em aumento na conectividade na paisagem, o que gera a necessidade de mais estudos de monitoramento, experimentais e de modelagem da erosão de voçorocas como base para prever os efeitos das mudanças ambientais (mudanças climáticas e de uso da terra) nas taxas de erosão de voçorocas (POESEN et al., 2003).

## 5. Conclusões

O artigo apresenta a realidade de áreas que vêm sendo degradadas por processos erosivos, tendo a geomorfologia como referência no estudo das formas de relevo, dos processos que promovem a evolução dessas morfologias e os materiais que são mobilizados na dinâmica geomorfológica.

Do ponto de vista da sua estruturação, a geomorfologia atual apresenta uma gama de conhecimentos, técnicas e procedimentos que podem ser utilizados em favor do melhor uso e ocupação de um determinado terreno, considerando que o homem é o agente geomorfológico mais importante. Por outro lado, a integração da geomorfologia com outros conhecimentos, especialmente com a geologia, clima, pedologia e recursos hídricos (JESUS et al., 2017), impõe a necessidade de uma abordagem holística, que permita entender os diversos impactos ambientais, diante das previsões e recomendações presentes nos Estudos de Impacto Ambiental, fundamentais para a manutenção da harmonia da dinâmica processual paisagística.

Os resultados obtidos permitem apresentar a realidade de uma barragem recém-construída, e que necessita de monitoramento ambiental, para que garanta maior vida útil, com menos gastos financeiros, por parte do governo estadual, principalmente para o desassoreamento e a recuperação de áreas degradadas. A adoção dos procedimentos implementados (análise e mapeamento geomorfológico, granulometria, monitoramento de voçorocas, levantamento com uso de drone, análise de Estudo de Impacto Ambiental etc.) contribui para que tais aplicações possam acontecer em outras barragens. Logo, entende-se que o trabalho fornece dados que permitem o gerenciamento do uso da área, assim como proposto por Amah et al. (2021), possibilitando a adoção de medidas de controle de voçorocas multifacetadas para ser eficaz.

**Contribuições dos Autores:** Concepção: H.E.P. Gutierrez e O. Girão; metodologia: H.E.P. Gutierrez e O. Girão; software: H.E.P. Gutierrez e C.S. da Silva; validação: H.E.P. Gutierrez, O. Girão e C.S. da Silva; análise formal: H.E.P. Gutierrez, O. Girão, C.S. da Silva e A.J.T.Guerra; pesquisa: H.E.P. Gutierrez, O. Girão, C.S. da Silva; recursos: H.E.P. Gutierrez; preparação de dados: H.E.P. Gutierrez e C.S. da Silva; escrita do artigo: H.E.P. Gutierrez, O. Girão, C.S. da Silva e A.J.T.Guerra; revisão: O. Girão, C.S. da Silva e A.J.T.Guerra; supervisão: H.E.P. Gutierrez. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Financiamento:** Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento externo. A pesquisa foi realizada com recursos próprios.

**Agradecimentos:** Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEO/UFPE). Aos técnicos da Secretaria Estadual de Recursos Hídricos do estado de Pernambuco, Pedro Vanderlei de Vasconcelos Cavalcanti e Jupuirá Aguiar (*in memoriam*), essenciais na viabilização das atividades de campo e para a obtenção da documentação da barragem.

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

## Referências

1. AMAH, J.I.; AGHAMELU, O.P.; OMONONA, O.V.; ONWE, I.M. AGBI, I.O. Analysis of the impacts of hydrology, soil properties, and geotechnics on gully propagation on the Edda-Afikpo Mesas of the Lower Cross River watershed (southeastern Nigeria). **Journal of African Earth Sciences**, v.174, p.1-13, 2021.
2. APAC - Agência Pernambucana de Águas e Climas. Monitoramento Pluviométrico. Disponível em: < <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php> > . Acesso em 28 fev 2023.
3. ARGENTO, M. S. F. Mapeamento geomorfológico. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da (Ed.) **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 365-391
4. AZEVEDO, A. A.; RUBIO, M. F. Erosão e assoreamento de reservatórios. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; MONTICELI, J. J (Ed.). **Geologia de engenharia e ambiental**. São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2018. p. 249-272.
5. BARBOSA, T.S.; LIMA, V.F.; FURRIER, M. Mapeamento geomorfológico e geomorfologia antropogênica do município do Conde – Paraíba. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.20, n.3, p.525-540, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i3.1571
6. BARBOSA, W. C. S.; LIMA, I. M. F. ; GUERRA, A.J.T. Análise multivariada da voçoroca urbana localizada na porção sul da bacia hidrográfica do baixo rio Paraíba. **William Morris Davis Revista de Geomorfologia**, v. 2, p. 1-15, 2021. DOI: 10.48025/ISSN2675-6900.v2n2.2021.167
7. BEZERRA, J. F. R.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A. Granulometria por difração à laser dos sedimentos superficiais nas áreas degradadas por voçorocamento na bacia do rio Bacanga. In: CASTRO, C. E. de; MASULLO, Y. A. G. (Ed.). **Gestão ambiental: uma diversificada ferramenta na consolidação de paradigma ecológico inovador**. 1ed. São Luís: EDUEMA, v. 1, 2016. p. 5-22.
8. BRANDT, S.A. Classification of geomorphological effects downstream of dams. **Catena**, v.40, n.4, p.375–401, 2000. DOI: 10.1016/S0341-8162(00)00093-X
9. BRIERLEY, G. B.; HOOKE, J. Emerging geomorphic approaches to guide river management practices. **Geomorphology**, v.251, p. 1-5, 2015. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.08.019
10. CARVALHO, J. C.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO, M.T.S. Processos Erosivos. In: CARVALHO, J. C., et. al. (Ed.). **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. Brasília, Distrito Federal: Finatec, 2006. p. 39-91.
11. CARVALHO, A.T.F.; CABRAL, J.J. da S.P. Avaliação de impacto ambiental de projetos de intervenções em cursos d’água no Brasil: análise documental e de coerência técnica de estudos ambientais. **Revista DAE - Departamento de Águas e Esgotos**, v. 68, n.223, p.06-22, 2020. DOI: 0000-0002-6642-3802
12. CASTRO, W. de S.; CAMPOS, A. B. de; ZANCOPÉ, M. H. de C. A influência dos materiais das margens e da vegetação ciliar na erosão de meandros: o caso do rio Claro, afluente do rio Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 3, p.623-640, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i3.1584
13. CRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgar Blücher, 1999. 236p.
14. COELHO, A. L. N. Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens. **Caminhos de Geografia**, v. 9, n. 26, p.16-32, 2008.
15. CORRÊA, I.C.S. Aplicação do Diagrama de Pejrup na Interpretação da Sedimentação e da Dinâmica do Estuário da Baía de Marajó-PA. **Pesquisas em Geociências.**, v., n.2, p.109 – 118. 2005.
16. COSTA, W. D. **Geologia de barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352p.
17. CPRM (Serviço Geológico do Brasil). **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água subterrânea de Pernambuco – Diagnóstico do município de Palmares**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 11p.
18. CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Ed.). **Geomorfologia: exercícios técnicas e aplicações**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. 346p.
19. DE VENTE, J.; POESEN, J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: Scale issues and semi-quantitative models. **Earth Science-Reviews**, 71 (1-2), 95–125, 2005. DOI: 10.1016/j.earscirev.2005.02.002
20. DINOTTE, A. C. B. P.; VIEIRA, C. A.; TEIXEIRA, W. A.; SILVA, J. R. Caracterização e análise da evolução espaço temporal das voçorocas: estudo de caso da microbacia do rio Grande em Gouveia/MG. In: PINHEIRO, L. S.; GORAYEB, A. (Ed.). **Geografia Física e as mudanças globais**. Fortaleza: Editora UFC, 2019. p. 1-14.
21. DOWNS, P. W.; BOOTH, D. B. Geomorphology in Environmental Management. In: GREGORY, K. J.; GOUDIE, A. (Eds.). **Handbook of Geomorphology**. SAGE Publications Ltda, 2011. p. 78-104.
22. DUARTE, C. G.; DIBO, A. P. A.; SIQUEIRA-GAY, J.; SÁNCHEZ, L. E. Practitioners’ perceptions of the Brazilian environmental impact assessment system: results from a survey. **Impact Assessment and Project Appraisal**, v. 35, p.1-17, 2017. DOI: 10.1080/14615517.2017.1322813



23. ETCHELAR, C. B. **Processos Erosivos em Áreas Úmidas, APA do Banhado Grande – RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017. 106p.
24. FOLK, R. L.; WARD, W. Bazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Research**, v. 27, p. 3-26, 1957. DOI: 10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D
25. FRANCISCO, A. B. Proposta metodológica na Geomorfologia Experimental através de monitoramento de erosão de solos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 2, p. 705-712. 2018. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.6.p705-712>
26. GALE, S. J.; HOARE, P. G. **Quaternary sediments: petrographic methods for the study of ulithified rocks**. Londres: Bethaven Press, 1991. 318p.
27. GARRITANO, F. do N. **Diagnóstico da degradação do solo na bacia do Alto rio Pirai (RJ) – monitoramento com uso de VANT em áreas com erosão em diferentes estágios de intervenção**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2020. 97p.
28. GIRÃO, O; CORRÊA, A. C. B.; NÓBREGA, R. S.; DUARTE, C. C. O Papel do Clima nos Estudos de Prevenção e Diagnóstico de Riscos Geomorfológicos em Bacias Hidrográficas na Zona da Mata Sul de Pernambuco. In: GUERRA, A. J. T.; OLIVEIRA JORGE, M. C. (Ed.). **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p. 126-159.
29. GOUDIE, A.C.; BOARDMAN, J. Soil erosion. In: ALCÁNTARA-AYALA, I.; GOUDIE, A.C. (Ed). **Geomorphological hazards and disaster prevention**. Cambridge University Press, Cambridge, 2010. p.177-188.
30. GRAF, W.L. Geomorphology and American dams: the scientific, social, and economic context. **Geomorphology**, v.71, n. 1-2, p.3-26, 2005. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.05.005
31. GREGORY, K.J. Human influence on the morphological adjustment of river channels: The evolution of pertinent concepts in river Science. **River Research and Applications**, v.35, n.8, p.1097-1106, 2019. DOI: 10.1002/rra.3455
32. GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. C. O.; BEZERRA, J. F. R.; SHOKR, M. S. Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. **Pedosphere**, v.27, n.1, p. 27– 41, 2017. DOI: 10.1016/S1002-0160(17)60294-7
33. GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; BEZERRA, J. F. R.; JORGE, M. C. O. Gully Erosion and Land Degradation in Brazil: A Case study from São Luís Municipality, Maranhão State. In: DAGAR, JAGDISH CHANDER, SINGH, ANIL KUMAR. (Ed.). **Ravine Lands: Greening for Livelihood and Environmental Security**. 1ed. Cingapura: Springer Singapore, v. 1, 2018. p. 195-216.
34. GUERRA, A.J.T.; JORGE, M.C.O.; RANGEL, L.A.; BEZERRA, J.F.R.; LOUREIRO, H.A.S.; GARRITANO, F.N. Erosão dos solos, diferentes abordagens e técnicas aplicadas em voçorocas e erosão em trilhas. **William Morris Davis Revista de Geomorfologia**, v.1, n.1, p.75-117, 2020. DOI: 10.48025/ISSN2675-6900.vol1n1.p75-117.2020
35. GUERRA, A.J.T.; JORGE, M.C.O. Degradação dos solos – abordagens teóricas e estudos de casos ao longo de 25 anos (1994-2019), no âmbito do LAGESOLOS. **Revista Humboldt**, v. 1, n.1. p. 1-29, 2021.
36. GUTIERRES, H.E.P. **Proposta Metodológica para a avaliação dos impactos geomorfológicos a partir dos estudos de impacto ambiental das barragens de Serro Azul e Igarapeba no estado de Pernambuco**. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2019. 315p.
37. GUTIERRES, H. E. P.; RODRIGUES, J. O. N.; SANTOS, C. J. S.; PEREIRA, V. D. A abordagem da geomorfologia nos Estudos de Impacto Ambiental para fins de licenciamento no estado da Paraíba. **Revista Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 24, n. 57, p. 1-35, 2020. DOI: 10.5902/2236499448365
38. IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Manual técnico de geomorfologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p.
39. IBGE. **Estimativa da população**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/palmares/panorama>. Acesso em: 23 abr. 2021.
40. ITEP/OS. **Estudo de Impacto Ambiental: Sistema de controle de cheias da bacia do rio Una – Barragem Serro Azul**. Recife: ITEP/OS, 2011. 915p.
41. JESUS, A. S. de; SOUSA, M.S.; NASCIMENTO, D.T.F.; ROMÃO, P. de A.; CARVALHO, J.C. de. A influência de aspectos geomorfológicos, de cobertura do solo e climáticos no surgimento e evolução de processos erosivos no entorno de reservatório. In: SALES, M. M.; CARVALHO, J. C.; MASCARENHA, M. dos A. (Ed.). **Erosão em borda de reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG, 2017. p.171-194.
42. JORGE, M. do C.O.; GUERRA, A.J.T. Erosão dos solos e movimentos de massa – recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes. In: GUERRA, A.J.T.; JORGE, M. do. C. (Ed.). **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p.7-30.
43. KONG, D.; LATRUBESSE, E. M.; MIAO, C.; ZHOU, R. Morphological response of the Lower Yellow River to the operation of Xiaolangdi Dam, China. **Geomorphology**, v.350, p.1-11, 2020. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.106931

44. LISBOA, G. S.; BEZERRA, J. F. R.; MORAIS, M. S. de. Monitoramento dos processos erosivos por voçorocamento na bacia do rio Bacanga, São Luís/MA. In: PEREZ FILHO, A.; AMORIM, R. R. (Ed.). **Os desafios da Geografia Física na fronteira do conhecimento**. Campinas: Instituto de Geociências – UNICAMP, 2017. p. 5847-5857.
45. LOUREIRO, H.A.S.; GUERRA, A.J.T.; ANDRADE, A.G. de. Contribuição ao Estudo de Voçorocas a partir do Uso Experimental de Laser Scanner Terrestre e VANT. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.21, n. 4, p.871-892, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i4.1880
46. LOUREIRO, H.A.S.; GUERRA, A.J.T.; BEZERRA, J.F.R.; PEREIRA, L. dos S.; GARRITANO, F. do N. Monitoramento da erosão hídrica no Brasil: dos métodos manuais aos digitais. In: CARVALHO JUNIOR, O.A. de; GOMES, M.C.V.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T (Ed.). **Revisões de literatura da geomorfologia brasileira**. União da Geomorfologia Brasileira (UGB), 2022. p.530-563.
47. LUIZ, E. L.; LAMAS, M. M. da R. Aplicação do mapeamento geomorfológico na discussão das potencialidades e limitações de terrenos da zona costeira frente à ocupação humana: estudo de caso no distrito de Rio Vermelho, Florianópolis/SC. **Sociedade & Natureza**, v. 29, n. 1, p.173-186, 2017. DOI: 10.14393/SN-v29n1-2017-11
48. MA, Y.; HUANG, H.Q.; NANSON, G.C.; LI, Y.; YAO, W. Channel adjustments in response to the operation of large dams: the upper reach of the lower Yellow River. **Geomorphology**, v.147-148, p.35–48, 2012. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.07.032
49. MARCHIORO, E.; ANDRADE, E. E.; OLIVEIRA, J. C. Evolução espaço-temporal de voçorocas no Espírito Santo: estudo de caso nos municípios de Afonso Cláudio e Alegre. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 1, p. 191-204, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i1.712
50. MARZOLFF, I.; POESEN, J. The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. **Geomorphology**, v. 111, p.48–60, 2009. DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.05.047
51. MORAIS, E.S. de; MONTANHER, O.C. Ajustamento fluvial à agropecuária, urbanização e reservatório e análise cientométrica do impacto dessas atividades nos rios brasileiros. In: CARVALHO JUNIOR, O.A. de; GOMES, M.C.V.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T. **Revisões de literatura da geomorfologia brasileira**. União da Geomorfologia Brasileira (UGB), 2022. p. 128-160.
52. 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**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010. p..58-99.
53. OLIVEIRA, W.F.; LEITE, M.E. Perda de solo por erosão hídrica em bacia hidrográfica: o caso da área de drenagem da barragem do rio Juramento, no norte do estado de Minas Gerais. **Revista Caminhos de Geografia**, v.19, n.67, p.16-37, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/RCG196702>
54. OLIVEIRA, C.S.; MARQUES NETO, R. Gênese da Teoria dos Geossistemas: uma discussão comparativa das escolas russo-soviética e francesa. **RA'EGA – O Espaço Geográfico em Análise**, v. 47, n.1, p.6-20, 2020. DOI: 10.5380/raega.v47i1.58198
55. PAL, S. Impact of Massanjore Dam on hydro-geomorphological modification of Mayurakshi River, Eastern India. **Environment, Development and Sustainability**, v.18, p.921–944, 2016. DOI: 10.1007/s10668-015-9679-1
56. PEREIRA, L. dos S.; RODRIGUES, A. M.; JORGE, M. do. C. O.; GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A. Processos hidroerosivos em solos degradados em relevo de baixa declividade. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 2, p. 299-316, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i2.877
57. PERJUP, M. The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach. In: BOER, P. L.; VAN GELDER, A.; NIO, D. D. (Ed.). **Tide-Influenced Sedimentary Environments and Facies**. Reidel: Dordrecht, 1988. p. 289-300.
58. PETTS, G.E.; GURNELL, A.M. Dams and geomorphology: Research progress and future directions. **Geomorphology**, v.71, n.1-2, p.27–47, 2005. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.02.015
59. POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v.50, 2-4, p.91-133, 2003. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00143-1
60. POESEN, J. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, n.1, p. 64–84, 2018. DOI: 10.1002/esp.4250
61. REMO, J. W.; ICKES, B. S.; RYHERD, J. K.; GUIDA, R. J.; THERRELL, M. D. Assessing the impacts of dams and levees on the hydrologic record of the Middle and Lower Mississippi River, USA. **Geomorphology**, v.313, p. 88-100, 2018. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.01.004
62. QUEIROZ, F. L. L.; ROCHA, P. C. Avaliação de Sedimentos do Leito no Canal Curutuba - Planície Fluvial do Alto Rio Paraná, Mato Grosso do Sul, Brasil. *Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros - Seção Três Lagoas*, n. 11, p. 147-164, 2010. DOI: [doi.org/10.55028/agb-tl.v1i36](http://doi.org/10.55028/agb-tl.v1i36)

63. RODRIGUES, C. A teoria geossistêmica e sua contribuição aos estudos geográficos e ambientais. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 14, n. 1, p. 69-77, 2001. DOI: 10.7154/RDG.2001.0014.0007
64. SALES, M. M.; CARVALHO, J. C. de; MASCARENHA, M. M. A.; LUZ, M. P.; SOUSA, N. M. de; ANGELIM, R. (Orgs.). **Erosão em Borda de Reservatório**. Goiânia: Gráfica UFG, 2017. 584p.
65. SANTOS, H.G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 2018. 356 p.
66. SHEPARD, F. P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 24, p. 151-158, 1954. DOI: 10.1306/D4269774-2B26-11D7-8648000102C1865D
67. SOUZA, J.C.L.; GREGÓRIO, M das N.; SILVA, D.L. da; CARNEIRO, M.C. de S.; JUNIOR, E.C. de A.; CAVALCANTE, T.C. Análise dos processos erosivos em áreas suscetíveis a instabilidade de encostas na barragem de Serro Azul, Palmares – Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 3, p.924-939, 2017. DOI: 10.26848/rbgf.v10.3.p924-939 DOI: 10.26848/rbgf.v10.3.p924-939
68. STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 336p.
69. SUERTEGARAY, D. M. A. **Geomorfologia e geografia física: uma (re) leitura**. 2. ed. Rio Grande do Sul: Editora Unijur, 2018. 126p.
70. TRENOUTH, W. R.; GHARABAGHI, B. Event-based soil loss models for construction sites. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 780–788, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.010>
71. TOMMASELLI, A. M. G.; MORAES, M. V. A.; SILVA, L. S. L.; RUBIO, M. F.; CARVALHO, G. J.; TOMMASELLI, J. T. G. Monitoring marginal erosion in hydroelectric reservoirs with terrestrial mobile laser scanner. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 40, n. 5, p. 589-596, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-589-2014>.
72. VERCRUYSE, K.; GRABOWSKI, R.C. Human impact on river planform within the context of multi-timescale river channel dynamics in a Himalayan river system. **Geomorphology**, v.381, p. 1-16, 2021. DOI: 10.1016/j.geomorph.2021.107659
73. XIA, B.; QIANG, M.; JIANG, H.; WEN, Q.; AN, N.; ZHANG, D. Phase-based externality analysis for large hydropower projects. **Environmental Impact Assessment Review**, v.80, n.12, p.1-12, 2020. DOI: 10.1016/j.eiar.2019.106332



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.