

**DIRETRIZES METODOLÓGICAS E O PAPEL DA GEOMORFOLOGIA NA
PREVENÇÃO DE “DESASTRES” TECNOLÓGICOS DE MINERAÇÃO**

METHODOLOGICAL GUIDELINES AND THE ROLE OF GEOMORPHOLOGY IN THE PREVENTION OF
MINING TECHNOLOGICAL “DISASTERS”

Roberto José Hezer Moreira Vervloet

Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo – IEMA/ES. Doutor em
Geografia Física USP. Rodovia Br 262, s/nº, Jardim América, Cariacica, Espírito Santo, CEP: 29140-130.
E-mail: robertovervloet@gmail.com

Resumo

O artigo é o resultado de reflexões apresentadas durante palestra realizada no 13º Simpósio Nacional de Geomorfologia, em Juiz de Fora, Minas Gerais, nos dias 15 a 19 de novembro de 2021. O referido texto reflete sobre diretrizes metodológicas e técnicas da geomorfologia aplicadas ao ordenamento das atividades relacionadas à mineração, de forma a evitar “desastres” de rompimentos de barragens desse tipo de atividade, discutindo uma referência metodológica clássica que pode ser aplicada ao estudo desse tema. Aproveita também para refletir sobre parâmetros técnicos que devem ser usados para melhor aplicação do conhecimento geomórfico nos programas de recuperação ecológica da paisagem no pós-rompimento. Conclui defendendo a tese de que a cartografia geomorfológica, fundamentada nos parâmetros de ordem física e geotécnica aplicadas no ordenamento territorial, estabelece normas mais corretas para licenciamento desses empreendimentos, respondendo pela imposição de limites técnicos e decisões políticas que venham a evitar a implantação dessas atividades, há muito consideradas como rudimentares nos países ditos mais “avançados”.

Palavras-chave: Geomorfologia retrospectiva; compartimentação; cartografia geomorfológica e paisagem.

Abstract

This paper is the result of reflections presented during a lecture held at the 13th National Symposium of Geomorphology, in Juiz de Fora, Minas Gerais, from November 15 to 19, 2021. This text reflects on methodological guidelines and techniques of geomorphology applied to the ordering of activities related to mining, in order to avoid "disasters" of dam ruptures of this type of activity, discussing a classic methodological reference that can be applied to the study of this topic. It also takes the opportunity to reflect on technical parameters that should be used for better application of geomorphic knowledge in post-rupture landscape ecological recovery programs. It concludes by defending the thesis that geomorphological cartography, based on physical and geotechnical parameters applied in territorial planning, establishes more correct norms for licensing these enterprises, accounting for the imposition of technical limits and political decisions that may prevent the implementation of these activities, long considered rudimentary in more “advanced countries”.

Key-words: Retrospective geomorphology, compartmentalization, geomorphological cartography and landscape.

1. Introdução.

Advinda de reflexões em um ambiente onde havia de início uma forte preocupação com as alterações que os seres humanos poderia provocar na superfície da terra, a Geomorfologia, disciplina originada no âmbito das ciências geológicas, sempre esteve associada ao estudo dos processos da paisagem morfológica para melhor ocupação das terras e aproveitamento dos recursos naturais. Ela nasce, neste sentido, como uma disciplina que objetiva ofertar ao homem e a sociedade, a compreensão dos processos de formação do relevo, para fins de aproveitamento econômico na ocupação dos espaços, assim como a Geologia o foi para aproveitamento dos recursos da exploração mineral, na Inglaterra do século XVIII (CHORLEY; DUNN; BECKINSALE, 1964).

Deste modo, ela se configurou, historicamente, como uma disciplina que esteve inicialmente ligada aos conhecimentos pertinentes ao planejamento da paisagem, a partir de uma perspectiva de ocupação ordenada dos espaços, mas sempre para fins de aproveitamento dos recursos naturais advindos deste, dentro de uma ótica científica baseada em instituições geradas no âmbito da filosofia positivista, fundada no conhecimento parcelar da realidade natural.

É com base nessas premissas iniciais que nos fundamentamos para apresentar este artigo que é o resultado de reflexões apresentadas pelo autor na forma de palestra, durante sua

participação na mesa intitulada “A Geomorfologia nos Desastres Tecnológicos da Mineração”, no 13º Simpósio Nacional de Geomorfologia. Foi objetivo principal desta palestra contribuir e apresentar diretrizes para melhor aprofundamento do debate acerca do papel dessa disciplina no tema dos “desastres” tecnológicos de mineração, principalmente no período pré-rompimento de barragens. Nesta reflexão foram debatidos, também, conhecimentos que a Geomorfologia possui e podem ser aplicados em programas de recuperação territorial ecológica da paisagem, no período pós-rompimento de barragens, otimizando diretrizes de ordenamento territorial que a atividade econômica da mineração deve seguir, embora jamais o tenha realizado. O simpósio foi organizado pela União da Geomorfologia Brasileira – UGB e Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, em Juiz de Fora, Minas Gerais, nos dias 15 a 19 de novembro de 2021, de forma online.

2. Breve perspectiva histórica da geomorfologia antrópica e/ou antropogeomorfologia.

Desenvolvida como disciplina profissional e acadêmica nos EUA, a Geomorfologia nasce, neste país, com forte viés institucional, incentivada nas instituições responsáveis pelo planejamento da ocupação das terras no oeste americano, a partir dos trabalhos de cientistas como John Wesley Powell – diretor do U.S. Geological Survey dos EUA, em 1881, e Grove Karl Gilbert, geólogo sênior desta instituição, também nesta mesma época. A intenção desses pesquisadores era formular uma ciência moderna que possibilitasse entender a paisagem para fins de planejamento e ocupação espacial da porção oeste do território americano, que mais tarde, no início do século XX, seria denominada pela comunidade científica de Geomorfologia (CHORLEY; DUNN; BECKINSALE, 1964).

A partir dos trabalhos destes pesquisadores uma lavra de cientistas mergulha na pesquisa científica, intencionando entender os processos que regem a morfologia da paisagem terrestre, entretanto, com preocupações epistemológicas associadas a gênese do relevo, história cronogeomórfica e enquadramento dos fatos da superfície, a partir de sistemas teóricos de explicação, tais como William Davis, Walter Penck, Lester King, John Hack, Luna Leopold e muitos outros. Tais referências podem ser encontradas no belo livro de Chorley, Beckinsale e Dunn intitulado “*The history of the study of landforms*” de 1964 e “*Theories of Landform Development*” de Melhorn e Flemal (1981), Figura 01. Assim sendo, não é novidade que a Geomorfologia nunca esteve preocupada em entender as ações antrópicas sobre o meio físico. A sua gênese esteve ligada, num primeiro momento, a necessidade de se ocupar os espaços de forma territorial planejada.

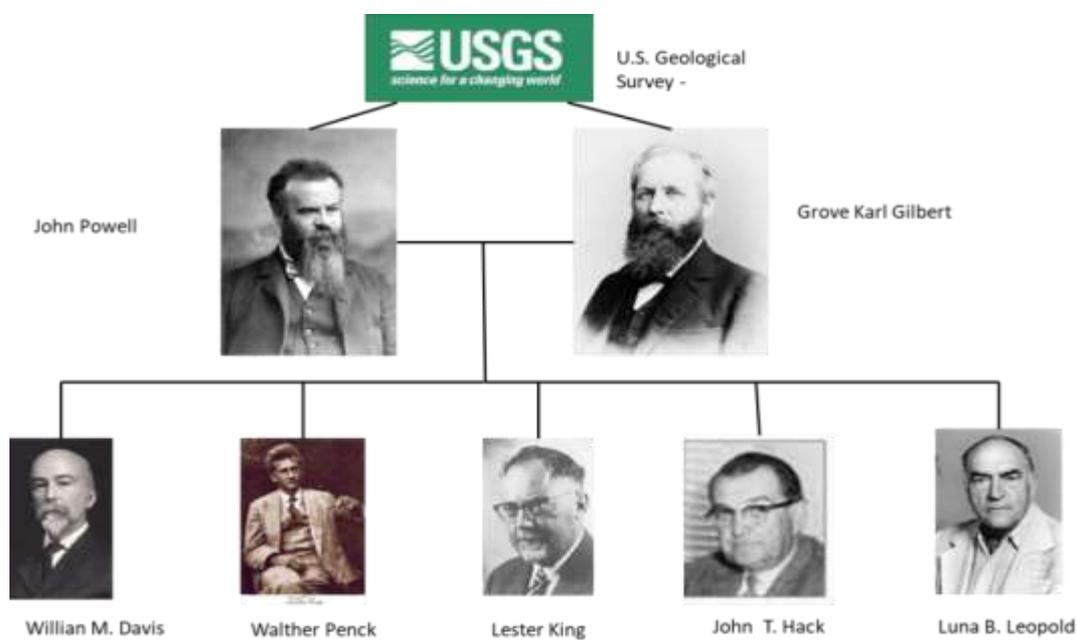


Figura 1. Filogênese simplificada de uma Geomorfologia institucional voltada ao estudo do planejamento de ocupação das terras do oeste americano. Baseado em Chorley, Beckinsale e Dunn (1964) e Melhorn e Flemal (1981). Penck e King não trabalharam necessariamente para o serviço geológico americano, mas contribuíram com seus estudos nas discussões. Esses autores prestaram serviços institucionais aos governos da Argentina (Penck) e Brasil (King). Elaboração: o autor.

Entretanto, um lapso de tempo grande se formou entre o nascedouro da geomorfologia, no final do século XIX e início do XX, e as últimas décadas, onde uma quantidade significativa de geomorfólogos e também geólogos tem se dedicado de forma mais sistemática ao estudo do impacto antrópico que é ocasionado no relevo pelas ocupações humanas. Isso vem ocorrendo, principalmente, a partir da 2ª Guerra Mundial e deriva, na Europa, da necessidade de reconstrução de cidades e zonas rurais destruídas por essa guerra. A necessidade de uma geomorfologia aplicada ou de conhecimentos aplicados sempre se impôs a sociedade.

Procurando trabalhar e desenvolver uma cartografia geomorfológica aplicada ao planejamento e associada ao ordenamento dos territórios, além do impacto da urbanização nos sistemas fluviais, originados pela expansão das cidades e pela agricultura em zonas rurais – como já nos alertava Tricart, em 1976, num clássico artigo, “*A geomorfologia nos estudos integrados de ordenação do meio natural*” – essa corrente tem sido denominada, comumente, de Antropogeomorfologia, Geomorfologia Antropogênica e/ou Geomorfologia Urbana. Junto a ela um arsenal interessante de conceitos e novos termos têm sido desenvolvidos, procurando ressaltar a ação humana, ou melhor, ação antrópica na modificação dos relevos e de seus processos correlatos.

Dentre esses conceitos, o mais utilizado e de forte expressão científica é o conceito de **depósitos tecnogênicos**, formulado por Chemekov em 1983. Fato que levou Ter Stepanian, em 1988, a designar o período atual – pós Revolução industrial e onde há forte atuação geológico-geomorfológica do homem sobre a superfície da Terra – de **Período Quinário** (Era do Tecnógeno), Quadro 01. Período não muito bem marcado na história, mas que pode ser delimitado a partir das

alterações sistemáticas do homem sobre a paisagem e que recebeu relativa popularização no meio acadêmico.

Quadro 1. O período Quinário e sua posição na escala geológica, a partir do Quaternário. Fonte: extraído de Ter Stepanian (1988).

Período	Época	Paisagens
Quinário	Tecnógeno	Tecnogênicas
Quaternário	Holoceno 10.000 a	Naturais
	Pleistoceno 1,82 Ma	

Neste sentido, o relevo tecnogênico seria aquele resultante da alteração da fisiografia das paisagens pela chamada morfotectogênese, abarcando o modelado cujo agente geomórfico principal é o homem. Teríamos, assim, as chamadas “paisagens tecnogênicas”. Trabalhos dentro dessa ótica vêm sendo desenvolvidos em muitos países, principalmente na Inglaterra, EUA, Índia, Japão, Europa do Leste, etc., desde os anos 1960. Na China e Brasil, mais recentemente, a partir dos anos 90 (BHUNIA *et al.*, 2022), (GOUDIE; HEATHER, 2016), (CHANDRA DAS *et al.*, 2020), (MEADOWS; LIN, 2016), (THORNBUSH; ALLEN, 2018), (ANTHONY *et al.*, 2002) e (BEYER, 2002). Além de muitos artigos e linhas de pesquisa criadas nessa linha, livros com o estado da arte sobre o tema e aplicações de conhecimentos também tem sido publicados Figura 2.



Figura 2. Capa das principais publicações de referência sobre o tema geomorfologia antrópica, nos últimos anos. Elaboração: o autor.

Entretanto, não é somente nos espaços urbanos e rurais onde o relevo tem sido sistematicamente objeto de intervenções antrópicas profundas com transformações, na maioria das vezes, irreversíveis da paisagem. Passam ao largo da discussão, em geral, as alterações tanto verticais quanto horizontais, que a atividade ligada à mineração tem provocado na paisagem, ficando esse tema muito restrito ao campo da Geologia de Engenharia, e em certas situações, Engenharia de Minas. Todavia, nos últimos anos no Brasil, estimulados pelo rompimento de barragens como as da Vale e Samarco em Minas Gerais, geomorfólogos tem se preocupado em investigar os processos de mega alteração do relevo, ocasionados por esse segmento da atividade econômica.

3. As Diretrizes metodológicas

Para sistematizar o papel da geomorfologia no estudo de rompimento de barragens, ou numa linha mais geral, na investigação das mega transformações ocasionadas no relevo pela mineração, estabelecendo diretrizes metodológicas para pesquisas nessa temática, um ponto de partida seria a concepção de geomorfologia fundamentada no tripé metodológico formulado por Ab'Sáber. Essa concepção de geomorfologia foi publicada de forma sistematizada, em um texto clássico de 1969, no antigo boletim do Instituto de Geografia da USP, intitulado “*Um conceito de Geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário*” (AB’SÁBER, 1969).

Neste texto, Ab'Sáber expõe um conceito de geomorfologia tripartite, fundamentado em três níveis de tratamento, conforme Figura 03, nas quais são reunidos os principais objetivos e enfoques que caracterizam a moderna ciência do relevo. O primeiro nível seria o da *compartimentação topográfica regional*, com a descrição e caracterização, o mais fiel possível das formas e compartimentos de uma dada paisagem geográfica. O segundo nível de tratamento seria o da *estrutura superficial da paisagem*, associados a todos os compartimentos e formas de relevos observadas, junto com seus depósitos correlativos, formas de vertentes, pedimentos, relevos residuais, formações superficiais pedogênicas, cobertura pedológica, depósitos paleoclimáticos etc. O terceiro nível de tratamento se refere à *fisiologia da paisagem*, ou seja, ao reconhecimento dos processos morfoclimáticos e pedogênicos atuais, em sua plena atuação, dependente da sucessão habitual do tempo e da hidrodinâmica global da paisagem estudada, onde é permitido verificar as derivações antropogênicas.

A fim de elucidar melhor como essa concepção de geomorfologia pode ser plenamente aplicada ao estudo das alterações da paisagem, provocadas pela indústria extrativa mineral, bem como prevenir “desastres” tecnológicos associados ao rompimento de barragens, construídas por empresas desse segmento, procurarei tratar mais detidamente de cada um desses níveis de

tratamento metodológico, referentes ao problema da compreensão de relevos profundamente alterados pela mineração em grande escala.

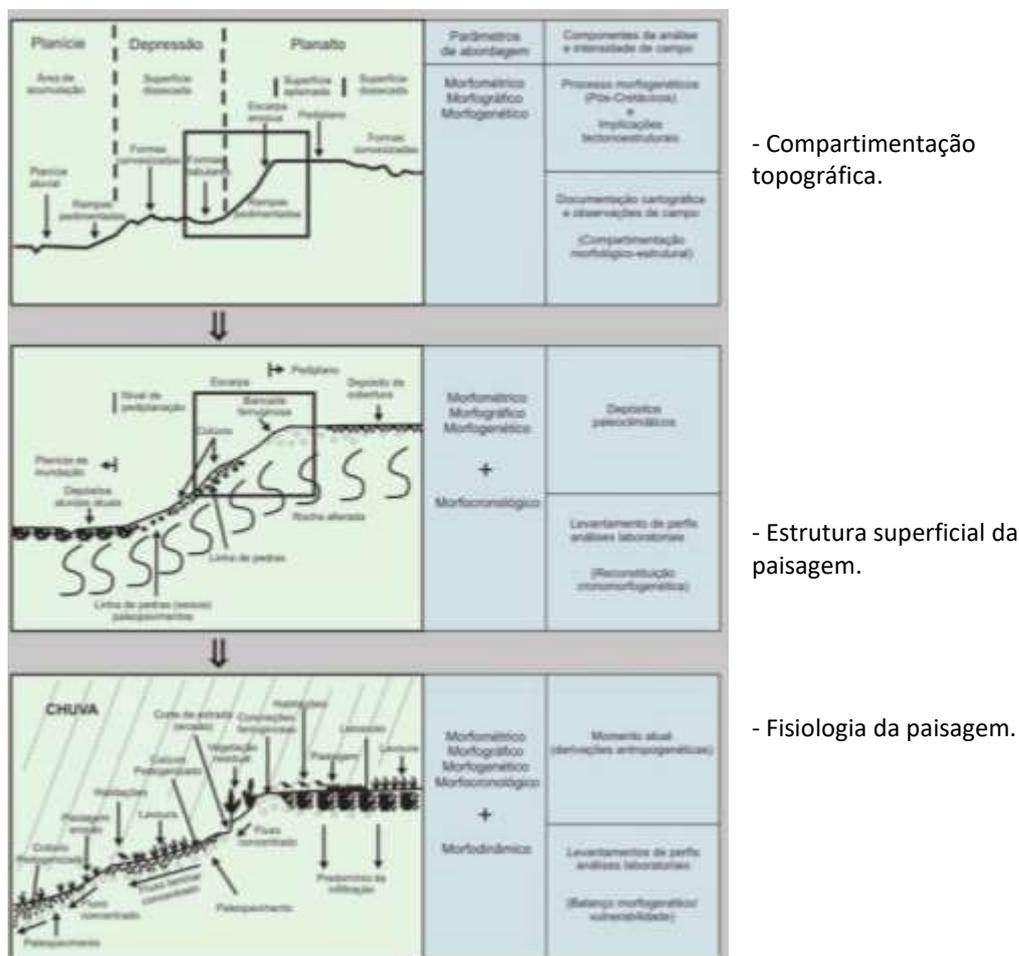


Figura 3. Representação esquemática dos níveis de tratamento metodológico da proposta de Ab'Sáber (1969). Fonte: extraído de Dantas (2010).

Num primeiro momento penso que o entendimento da compartimentação topográfica de uma paisagem – para efeitos de ordenamento e licenciamento da exploração mineral com barragens de rejeitos – é necessidade primordial para o posicionamento desta em face dos processos associados ao metabolismo primário do relevo em relação ao meio natural.

Neste sentido, a técnica mais condizente para uma perfeita compartimentação topográfica da superfície é a que pode ser realizada através da cartografia geomorfológica. Esta auxilia o reconhecimento da cadeia de interferências na morfologia dos terrenos que compõem a estrutura superficial das paisagens, inseridas nestes complexos de exploração mineral. Mais do que estabelecer o reconhecimento dessas interferências, a cartografia geomorfológica permite uma compartimentação topográfica que possibilita reconhecer os limites físicos de suporte dos diversos mecanismos de controle pseudoambiental, utilizados para justificar a implantação desses

complexos de extração polimineral de larga escala (VERVLOET, 2016a). Só a título de exemplo, tomemos a posição topográfica e altitudinal da barragem do Fundão, que se rompeu em Mariana, pertencente à Samarco Mineração, Figura 04.

Ao observarmos a compartimentação topográfica dos vales onde se asilava essa barragem é fácil perceber que as diferenças de cota altimétrica entre esta, situada em 1.081m de altitude, e o vale do Rio Gualaxo e Bento Rodrigues, em cerca de 700m, já coloca de início sérios obstáculos para licenciamento e aceitação desse tipo de empreendimento.

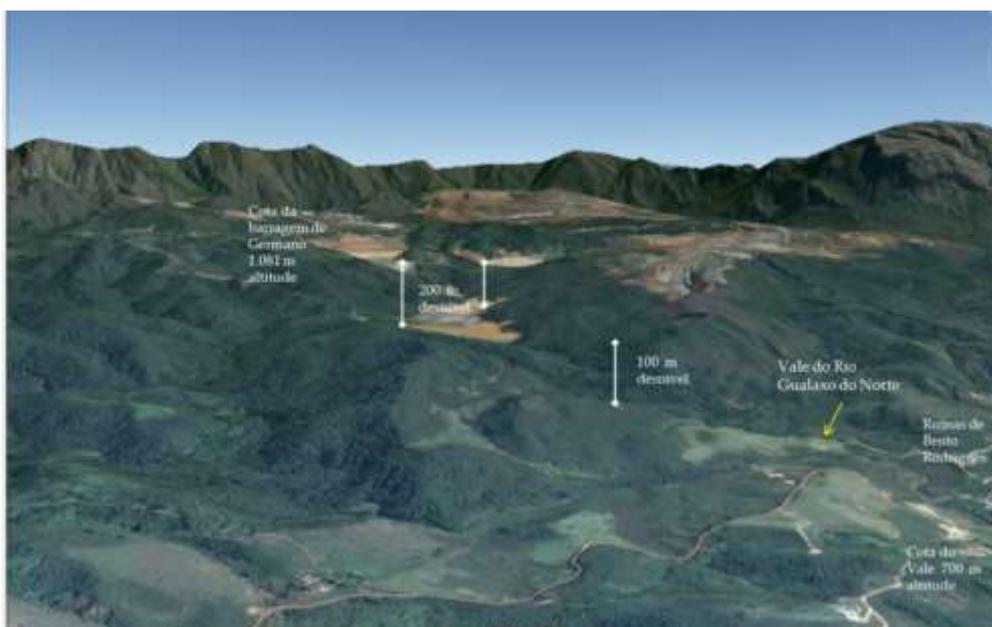


Figura 4. Imagem com as diferenças de cotas altimétricas e visualização tridimensional da região de Bento Rodrigues, Mariana, Minas Gerais. Notam-se os gradientes topográficos presentes ao longo do vale do Rio Gualaxo do Norte, com a barragem de Germano, situada cerca de 300 m acima de Bento Rodrigues. Fonte: extraída do site Google Earth. Elaboração: o autor.

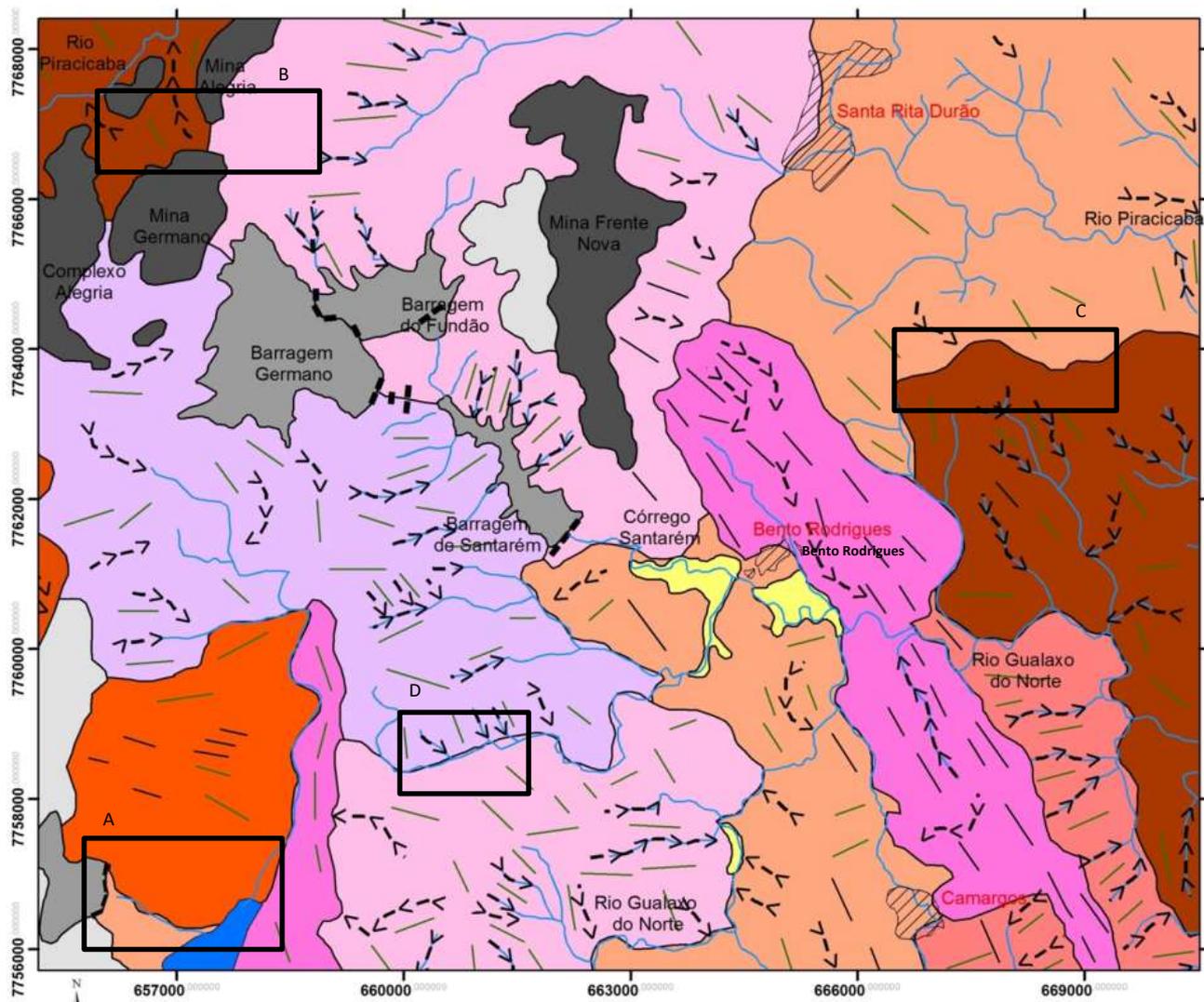
Considerando que o relevo é um campo de forças onde mecanismos de equilíbrio estão em permanente atuação, respondendo por uma complexa cinemática – como nos faz saber Leopold e Langbein (1962), num trabalho intitulado *The concept of entropy in landscape evolution* – é de se esperar que a deposição de toneladas e mais toneladas de rejeitos na porção superior de um vale desta configuração, com cotas altimétricas tão discrepantes, coloca em risco os mecanismos de estabilização de materiais compostos por rejeitos, removidos das frentes de lavra, que precisam, num curto espaço de tempo, apresentar total imobilidade, estabilidade e alto fator de segurança. O campo de forças de relevos tecnogênicos é ainda mais complexo do que terrenos onde impera uma cinemática em condições “naturais”.

Importante salientar que as técnicas rudimentares de construção de barragens por alteamento – como as que são adotadas por empresas como a Samarco e Vale – são estimuladas

pelo aproveitamento da compartimentação dos vales em forma de “V” fechado e semifechado que ocorrem na região, sendo estes compartimentos “ideais” para a deposição confinada de rejeitos, em barragens de alteamento, por diminuir os custos de sua implementação. É dessa forma que a compartimentação topográfica é usada de forma criminosa e geopolítica por essas empresas de mineração. O conhecimento geomorfológico, neste sentido, não serve somente para entendimento de desastres tecnológicos, mas principalmente, como fundamento basilar para formulação de políticas e normas que venham a evitar a aceitação desse tipo de empreendimento, influenciando fortemente na análise custo-benefício.

Mais do que uma boa e funcional compartimentação topográfica regional, técnicas de cartografia geomorfológica possibilitam o pleno reconhecimento da originalidade da paisagem, vista como o cenário mais próximo possível que se pode chegar ao seu metabolismo geomórfico primário. Desta forma, é possível comparar cenários em dois períodos distintos, para efeitos de análise geomórfica de empreendimentos humanos de mineração; um cenário pré-intervenção, quando é possível vislumbrar a originalidade do relevo em seu domínio paisagístico e outro pós-intervenção antrópica, quando os efeitos dessas alterações se fazem presentes como integrantes do metabolismo geomórfico transformado, como faz Vervloet (2016a).

De um ponto de vista mais específico, em relação a “desastres tecnológicos” como o rompimento de barragens, é possível estudar o relevo no período pré-rompimento e pós-rompimento, através de técnicas de geomorfologia retrospectiva, possibilitando comparar processos geomórficos impossíveis de serem previstos sem uma boa cartografia geomorfológica, conforme Figuras 05, 06, 07 e 08.



Escalas 1:70.000

0 600 1.200 2.400 3.600 4.800 M

Base cartográfica: Imagens do satélite Geoeye de julho de 2015, fotografias aéreas IBAMA e trabalhos de campo. Elaboração: Roberto Vervloet.

Legenda

— Hidrografia — Lineamento topográfico
 ▨ Distrito — Lineamentos estruturais
 <-- Vales de seccionamento

Formas antrópicas (mineração).

■ Lago artificial
 ▬ Barragem
 □ Área de recomposição
 ■ Frente de lavra
 ■ Depósitos de rejeito e pilhas de minério

Morfologia/Morfocronologia/Morfografia	Morfometria (altitudes)	Morfodinâmica/Morfogênese
Planície alveolar	700 - 710	Planícies oriundas de processos de acumulação da zona de confluência do Rio Gualaxo com o Córrego Santarém. Em alguns setores adquirem um caráter bem embutido devido ao entulhamento de sedimentos fluviais em zonas de knickpoints
Morros alinhados	736 - 850	Relevos derivados de processos de dissecação estrutural sobre as rochas do Supergrupo Rio das Velhas. Trata-se de resíduos de de sinclinais alçadas e arrasadas por processos fluviais de dissecação. As cristas de topos alinhadas refletem o nítido controle litostrutural na gênese das formas.
Morros pequenos de topos convexos	710 - 840	Conjunto de morros com morfologia de topos convexos originados de processos de convexização sobre granitos e gnaisses do Complexo Santa Bárbara. O arredondamento dos topos é devido a homogeneidade e composição da textura granítica dessas rochas que facilitam o processo de dissecação homogênea pela rede hidrográfica.
Morros de topos semi-convexos	739 - 884	A morfogênese dessas formas é muito parecido com os morros pequenos de topos convexos, com a diferença de que por estarem próximas das rochas e zonas de dobras de maior resistência do Grupo Piracicaba são menos disseçadas com topos semi-convexos
Morros de topos convexos	700 - 1046	Esses relevos derivam de acentuada dissecação fluvial sobre rochas do Supergrupo Rio das Velhas que por serem de forte resistência a ação fluvial originam vales mais profundos nos sopés da Serra do Caraça, respondendo por topos bem convexizados.
Morros de topos simétricos	701 - 813	Esse conjunto de formas de caráter nitidamente localizado deriva do disseçamento de vertentes em setor de borda de sinclinal na zona de contato com os morros alinhados. A evolução de cabeceiras de drenagem sobre esses videntes derivou vales alinhados que possuem cristas perfeitamente simétricas conforme a direção de dissecação da drenagem.
Morros convexos	655 - 843	Os morros de topos convexos derivam, também, de dissecação homogênea da superfície por processos fluviais sobre as rochas do Complexo Santa Bárbara, no entanto, por estarem no setor de curso médio da bacia do Rio Gualaxo do Norte apresentam maior dissecação fluvial, tendo como consequência o nítido arredondamento das formas.
Escarpas erosivas	989 - 1893	As encostas mais disseçadas sobre as rochas do Grupo Itabira por cabeceiras de drenagem de 1ª e 2ª ordem originam essa tipologia de relevos que basicamente apresenta-se escarpado, rocha exposta e processos fluviais encaixados de alto poder erosivo
Morros de morfologia dômica	762 - 1319	Esses relevos são resíduos de núcleos de rochas mais resistentes, tanto do Supergrupo Rio das Velhas quanto do Supergrupo Minas, tratando-se de formas residuais que conseguiram manter a morfologia frente a intensa dissecação fluvial da região.

Figura 5. Mapa geomorfológico da região de Bento Rodrigues no cenário pré-rompimento. As quadriculas assinaladas no mapa se referem às fotos da figura (07). Fonte: extraído de Vervloet (2016a).



Figura 6. Fotos representativas dos compartimentos de relevo do mapa geomorfológico, em cenário pré-rompimento, da figura 06. Posição através das quadriculas assinaladas no mapa. Fonte: do autor.

Tomando como exemplo novamente o rompimento da barragem do Fundão da Samarco é possível visualizar os compartimentos de relevo no período pré e pós-rompimento, com novas formas de relevo geradas, tais como a *planície de rejeitos*, ao longo do vale do Rio Gualaxo do Norte e seus afluentes, *vales de erosão regressiva* que continuam a carrear material para essa planície e o *vale de rompimento*, originado do rápido deslocamento dos rejeitos após ruptura da barragem. Portanto, estudando o relevo da região no período pré e pós-rompimento, ou seja, através de uma cartografia geomorfológica que podemos considerar como retrospectiva ao período anterior e posterior a esse “desastre”, além da cadeia de interferências e alterações provocadas pela atividade de mineração intensa, torna-se perfeitamente possível avaliar mudanças na originalidade da paisagem, e induzir, empiricamente, sobre processos geomórficos que porventura poderão ocorrer em função das alterações originadas pelo rompimento. Já existe no Brasil conjunto considerável de trabalhos que adotam essa perspectiva cartográfica geomórfica retrospectiva (ANDRADE, 2012; PASCHOAL; CUNHA; CONCEIÇÃO, 2012; PASCHOAL, 2014; ANDRADE; VALADÃO, 2016; PEREIRA; CRUZ; GUIMARÃES, 2019; MACHADO; HENRIQUES; SOUZA, 2021; EDUARDO; FELIPPE; SILVA, 2021) entre outros, e fora do Brasil, como nos livros textos demonstrados anteriormente.

Já o segundo nível de tratamento da pesquisa geomorfológica de Ab'Sáber (1969) deve vir associado ao nível da compartimentação, sem a qual, este torna-se incompleto. Trata-se, como dito anteriormente, da *estrutura superficial da paisagem*, ou seja, da análise dos depósitos de cobertura, formações superficiais quaternárias, coberturas pedogênicas em vertentes, pedimentos, depósitos sedimentares atuais em planícies, formações colúvias, etc., associados, não podemos esquecer, a compartimentação topográfica anteriormente reconhecida.

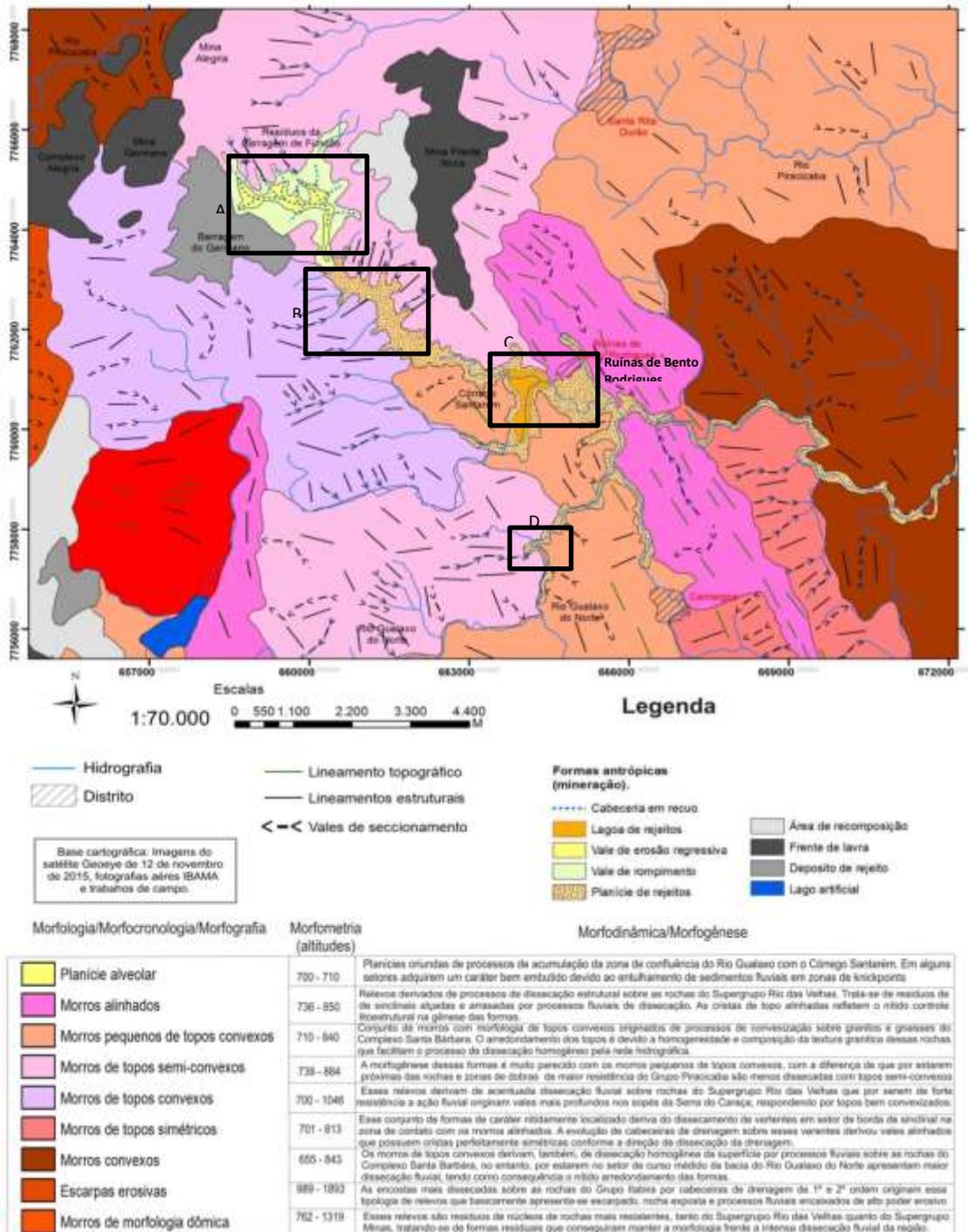


Figura 7. Mapa geomorfológico da região de Bento Rodrigues no cenário pós-rompimento. As quadriculas assinaladas no mapa se referem às fotos da figura (10).

Fonte: extraído de Vervloet (2016a).



Figura 8. Fotos representativas dos compartimentos de relevo do mapa geomorfológico, em cenário pós-rompimento, da figura 08. Posição através das quadriculas assinaladas no mapa. Fonte: do autor.

A estrutura superficial da paisagem evidencia a dimensão do relevo que é mais modificada pelas alterações provenientes da mineração. Em termos de rompimento de barragem, a imensa carga sedimentar de rejeitos liberadas, deslocadas num tempo muito curto, como o caso em questão, provocou modificações quase irreversíveis em planícies fluviais, aluviais e sistemas de drenagem de uma região. Para efeito de exemplo, no córrego Santarém, onde estava instalada a barragem do Fundão da Samarco, o rompimento resultou em uma vazão do fluxo de rejeitos e materiais arrastados pelo seu escoamento que foi de 2 a 3 ordens de magnitude maior do que uma enchente decamilenar (ASSOCIATES, 2016, p. 08).

O que isso significa em termos de processos hidrogeomórficos? Significa dizer que o rompimento dessa barragem foi capaz de provocar um processo de deslocamento de material sedimentar que a natureza, dentro dos parâmetros físicos do período geológico atual, não possui condições naturais para realizar, ou seja, um evento hidrogeomórfico de deslocamento de material fluído e semi lamoso ocasionando uma vazão fluvial e sedimentar que apresenta tempo de retorno da ordem de 01 para cada 10 mil anos, conforme relatório apresentado pela Associates (2016, p. 08), contratado pela própria Samarco. Portanto, essas empresas são capazes de criar situações em que as forças físicas da natureza, nas condições termodinâmicas “naturais”, jamais criariam, e

isso pressupõe uma reflexão profunda sobre a necessidade de aceitação desse tipo de atividade econômica de mineração por parte da sociedade.

O resultado, como é bem sabido por todos, não poderia ser mais catastrófico em termos geomorfológicos; uma vazão que ocorreria na calha do Rio Gualaxo do Norte, com período de retorno de 10 mil anos, só poderia ter como consequência, o arraste de árvores, rochas, solos, casas, edificações, vilas e cidades, e a criação de uma nova planície fluvial com capa de rejeitos, em fase de erosão ativa, nos córregos da região.

Se é que a geomorfologia deva ser uma disciplina com peso significativo nos processos antrópicos de exploração mineral, os conhecimentos delegados por ela para os projetos de recuperação e restauração de paisagem, devem vir com o mesmo grau de importância. Foram os geomorfológicos quem descobriram, desde Surell, passando Willian Morris Davis, Penck, King, Leopold, Hack, etc., as implicações ecológicas e hidráulicas das pulsações fluviais periódicas dos rios, seja em ambientes tropicais ou de clima temperado (VERVLOET, 2016b). Esse conhecimento permitiu que ecologistas como Junk, Bayley e Sparks (1989) investigasse o papel das planícies fluviais na ecologia da ictiofauna, descobrindo o valor funcional dessas feições do relevo, formulando teorias ecológicas como a dos pulsos de inundação.

Os conhecimentos geomorfológicos de planícies fluviais, neste sentido, possibilita saber que esses espaços geomórficos cumprem um papel primordial na manutenção dos processos ecológicos da paisagem por meio do sistema planície-vertente (LEOPOLD; LANGBEIN, 1962). A geomorfologia, neste sentido, impõe diretrizes importantes a serem consideradas nos projetos de recuperação de paisagens fluviais impactadas por desastres de barragens. Tomando, mais uma vez, como exemplo, o rompimento da barragem do Fundão, os compartimentos de planícies fluviais, aluviais e fundos de vale, ao longo do Rio Gualaxo do Norte e do Carmo¹, tiveram a estrutura superficial da paisagem profundamente transformada. Em quase todos os compartimentos de planícies alveolares desses rios houve retenção de rejeitos com mudança abrupta da calha fluvial, chegando à cobertura de rejeitos, em muitos setores, na ordem de mais de três metros de espessura, em uma deposição espasmódica violenta, a qual não se verifica nos processos fluviais naturais de ambientes tropicais (MINAS GERAIS, 2015).

Que as planícies fluviais e alveolares dos rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce cumpriram uma funcionalidade geomórfico-ecológica primordial para comunidades ecológicas da região, não resta nenhuma dúvida, pois são nestes espaços que pequenas propriedades e comunidades agrícolas encontram condições favoráveis a realização de atividades econômico rurais necessárias a sua subsistência (TRICART, 2003) Todavia, o que é importante saber é se os projetos de

¹ São os rios principais da região de rompimento da Barragem do Complexo Germano da Samarco Mineração S.A.

recuperação ambiental desses ambientes, apresentados pós-rompimento e aprovados pelos órgãos ambientais, tem considerado a importância das diretrizes geomórficas na sua recuperação.

Os pulsos de inundação hidrodinâmica da vazão fluvial desses rios evidenciava a originalidade morfoclimática do regime tropical desses ambientes, com sua complexa cadeia trófica associada (VERVLOET, 2016a). A recuperação e restauração desses espaços geomórficos, em termos de originalidade ecológico-paisagística, pressupõe projetos que venham a restabelecer a condição mais próxima possível do seu metabolismo primário, ou seja, deve-se buscar estabelecer projetos com parâmetros que objetivem recuperar a dinâmica fluvial e ecológica da planície, o mais próximo possível ao período anterior aos impactos ocasionados. Fato muito bem colocado por Park (1981) no início da década de 1980, sendo discutido, posteriormente, por Verstappen (1983), Cooke e Doornkanp (1990), Thorne, Hey e Newson (1997), Downs e Gregory (2004), Gordon et al. (2004), Zhao, Xu e Zhang (2012), entre outros.

Embora se saiba que o estado primário de uma dinâmica ecológica de planície fluvial, fortemente impactada, seja situação muito difícil de restaurar, deve-se ter sempre em mente, como referência, as condições dinâmicas mais próximas ao estado na qual inexistia a cadeia de impactos geomórficos realizadas, como bem nos adverte Ojeda (2007).

Entretanto, não é o que ocorre na região, como se observa na Figura 09, os projetos de “recuperação” das planícies fluviais atingidas pelos rejeitos, tem procurado estabelecer técnicas de aproveitamento agrônômico desse material que foi decantado, para fins de produção agrícola em programas de recuperação apresentados por consultorias contratadas pela própria empresa e por instituições como a Fundação Renova, ao invés de reestabelecer a originalidade geomórfica primária das planícies, a partir de critérios ecológicos e geomorfológicos.

Tenta-se, a todo custo, dá uma funcionalidade agrônômica aos depósitos de rejeitos porque é mais barato plantar gramíneas e culturas específicas do que retirar a capa de rejeitos e restaurar a condição geomórfico-ecológica dessas planícies fluviais e alveolares. Infelizmente, a troco do que, nós não sabemos, professores, pesquisadores e mentalidades ligadas a algumas universidades, têm chancelado essas técnicas, no absurdo de denominar rejeito de minério de ferro de “tecnossolos”, em prol do custo menor em projetos de recuperação ambiental (SCHAEFER, et al., 2015).

Assim sendo, a estrutura superficial do relevo pós-rompimento é cristalizada na paisagem, em detrimento da perda paisagística e ecológica dos seus atributos primários, de sua originalidade (VERVLOET, 2016a). De outro lado, a estrutura superficial pré-rompimento, que deveria ser parâmetro para busca de sua configuração ecológica a ser recuperada, é totalmente descartada, em prol da economia de dinheiro para empresas como a Samarco.

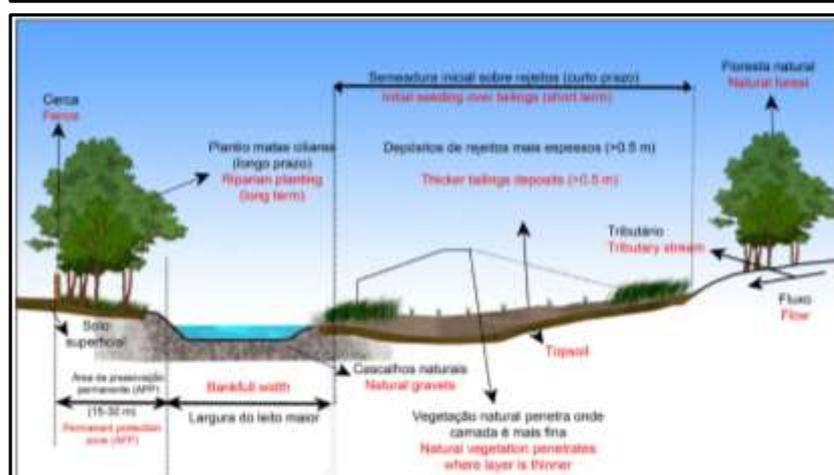
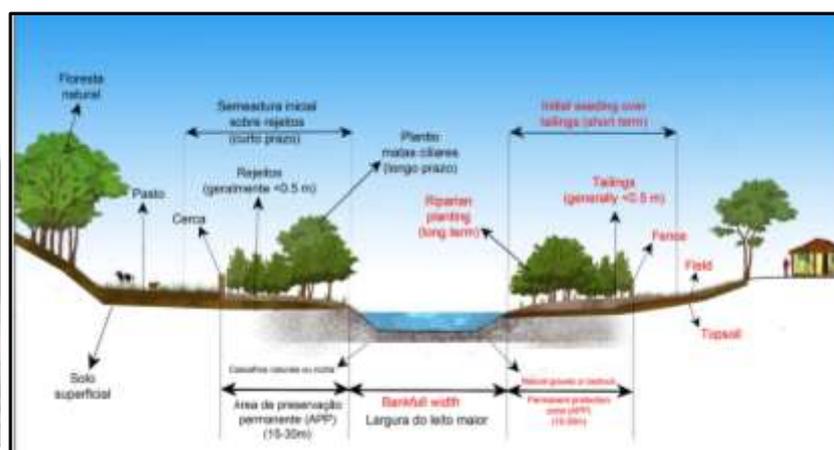


Figura 9. Proposta esquemática de recuperação ambiental dos ambientes fluviais do Rio Gualaxo do Norte, pela Samarco. Na parte superior uma suposta “reabilitação” do ambiente com revegetação e cultivo sobre os rejeitos de minério, em várzeas com deposição de cobertura fina sobre a planície. Na parte inferior a mesma proposta em zonas com deposição de cobertura mais espessa de rejeitos. Em ambas, o que se percebe é uma tentativa de maquiagem dos impactos na paisagem. Proposta aprovada pelos órgãos ambientais. Fonte: extraída de Golden Associates (2016, p. 28).

As consequências dessa prática, ou seja, da ausência de se considerar a originalidade da paisagem nos processos de recuperação ambiental, aparecem anos depois, tais como os resultados do programa de monitoramento dos impactos dos rejeitos da Samarco na costa do Espírito Santo, realizados por pesquisadores da Rede Rio Doce (FEST, 2019a; 2019b). Quatro anos após rompimento da barragem, os dados evidenciam claramente que a contínua chegada e permanência dos rejeitos nos ecossistemas costeiros, adjacentes à foz do Rio Doce, vem causando importantes alterações na estrutura, composição e funcionamento das comunidades biológicas. Neste contexto, destacam-se modificações significativas no habitat e o uso deste por organismos da praia (bentos), manguezal e megafauna, bem como alterações na fisiologia dos componentes da restinga (FEST, 2019a, p. 05).

Realizar projetos ditos de “recuperação ambiental” que objetiva manter nas planícies fluviais a capa de rejeitos oriundos da barragem é contribuir para o contínuo transporte de metais pesados que contamina o ambiente costeiro, próximo a foz do Rio Doce, como tem aparecido nos programas de monitoramento.

Junto ao compartimento topográfico reconhecido e com sua estrutura superficial associada, iremos ter o terceiro nível de tratamento da pesquisa geomorfológica, conforme Ab’Sáber (1969). Esse terceiro nível é que pode ser muito bem aplicado ao estudo dos relevos tecnogênicos, em áreas de mineração, é denominado *fisiologia da paisagem*. Esta se refere aos processos geomórficos *stricto senso*, ou seja, trata-se de compreender a morfodinâmica da paisagem morfológica em processo.

Nos estudos de relevos tecnogênicos, em áreas de mineração, a compreensão dos processos responsáveis pela fisiologia da paisagem se posiciona, predominantemente, no campo geotécnico, ou melhor, na tentativa de consolidar mecanismos de controle geotécnico das massas de rejeitos confinadas em compartimentos de vales fechados e pilhas alocadas em frentes de lavras desativadas (MENDES, 2007; PEREIRA, 2005). A fisiologia da paisagem, neste sentido, pode ser considerada como a diretriz metodológica mais importante da pesquisa geomorfológica, para efeito de estudo dos relevos tecnogênicos. Mais do que estabelecer diretrizes metodológicas, esse nível de tratamento traz aplicações que colocam normas e fatores a serem seguidos no conhecimento geotécnico, aplicado à construção e gerenciamento de barragens.

Importante salientar que o conhecimento científico geomorfológico sobre estabilidade e evolução de vertentes, é pesquisado nessa disciplina desde os anos 1940, sendo esta a precursora do estabelecimento de parâmetros geotécnicos de estabilidade de barragens. Foram os geomorfólogos quem desvendaram os processos de evolução dinâmica do relevo, ou seja, os fatores que respondem pela fisiologia das paisagens, através da descoberta dos mecanismos de força atuantes no equilíbrio das vertentes, sintetizados em obras e artigos que se tornaram clássicos, tais como os de Carson e Kirkby (1972), De Ploy e Gabriel (1980), Selby (1983), Sidle, Pearce e O’Loughlin (1985), De Ploey, Kirkby e Ahnert (1991), entre outros, gerando conhecimentos que, atualmente, são aplicados nos projetos de construção de barragens.

Do estudo da evolução das vertentes no meio tropical úmido, ou, mais especificamente, da descoberta dos mecanismos atuantes nos movimentos de massa, derivaram os conhecimentos geotécnicos que são utilizados para justificar as técnicas de construção de barragens, em projetos que diminuem os custos para empresas de mineração. Portanto, como geomorfólogos temos aqui uma responsabilidade maior nesta questão, principalmente em cobrar das instituições responsáveis pelo licenciamento desses empreendimentos, à elaboração de normas e parâmetros técnicos que fundamentem princípios de segurança, baseados na preservação da vida e absoluta consideração

pelos limites impostos pelos fatores geotécnicos que respondem pela estabilidade dessas massas de rejeitos, asiladas em compartimentos de vale e cavas desativadas (VERVLOET, 2016a).

Dos rompimentos de barragens como os da Samarco, em Mariana, e Vale, em Brumadinho, depreende-se uma injustificada desconsideração pelos parâmetros de segurança da geotecnia, baseados nos princípios físicos de estabilidade de taludes. Barragens de rejeitos de mineração, feitas as considerações técnicas, são massas sedimentares que possuem comportamento semelhante, em muitos aspectos geológicos e geomorfológicos, aos taludes e vertentes dos meios tropicais (ESPÓSITO, 2000).

Do ponto de vista teórico, uma barragem de rejeitos se apresenta sempre basicamente como uma massa de material, em geral feito de solo removido ou do próprio rejeito, submetida a três campos de forças distintos: forças devidas ao peso dos materiais, forças devidas ao escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento (ESPÓSITO, 2000; MENDES, 2007; FREIRE NETO, 2009). A construção e gerenciamento de barragens deve sempre levar, em consideração, o equilíbrio entre essas forças, uma vez que as duas primeiras se somam, e tendem a movimentar a massa de rejeitos vale abaixo, a última atua como um freio a essa movimentação (MENDES, 2007; PEREIRA, 2005). Dessa forma, é muito importante compreender exatamente o mecanismo de atuação de cada força, a fim de projetar corretamente as medidas preventivas a qualquer evento que force o seu rompimento.

A análise do equilíbrio-limite considera que as forças que tendem a induzir a ruptura ou o movimento são exatamente balanceadas pelas forças resistentes, segundo Carson e Kirkby (1972) e Selby (1983). O desequilíbrio entre as forças de cisalhamento e de resistência ocorre a partir de um desajuste entre as condições de drenagem subsuperficiais e as características intrínsecas do material envolvido. Quando o limiar de resistência é atingido por causa de um colapso coesivo generalizado, todo o material escoava como um fluido viscoso, gerando um fluxo de lama (mudflow), (COLANGELO, 1990). Quando ocorre apenas uma queda relativa da coesão na extensão de uma superfície de ruptura, o atrito entre as partículas do material não é suficiente para anular a ação da força cisalhante, fazendo com que o material se movimente como *land slide*, ou seja, com uma superfície de ruptura bem definida, ainda no estado plástico, ou mesmo, semissólido (SELBY, 1983). Entre essas duas situações há uma série de circunstâncias que impõe tipos intermediários de movimentos de massa (CARSON, 1975).

Importante salientar que esta massa de material asilada em compartimentos de vale irá apresentar, logo após a deposição, a busca de equilíbrio nos processos pedogênicos, de forma a permitir a circulação de água e as discontinuidades pedológicas entre a massa anteriormente considerada como homogênea (CIMNE, 2021, p. 200). Assim sendo, o material irá se comportar, após alguns anos, como uma grande vertente, procurando seu equilíbrio morfodinâmico e pedológico. O exemplo mais fiel desse contexto descrito é o entendimento dos processos e ações

que levaram a ruptura da barragem I do Complexo Minerário de Paraopeba, em Brumadinho, da Vale, Figura 10.

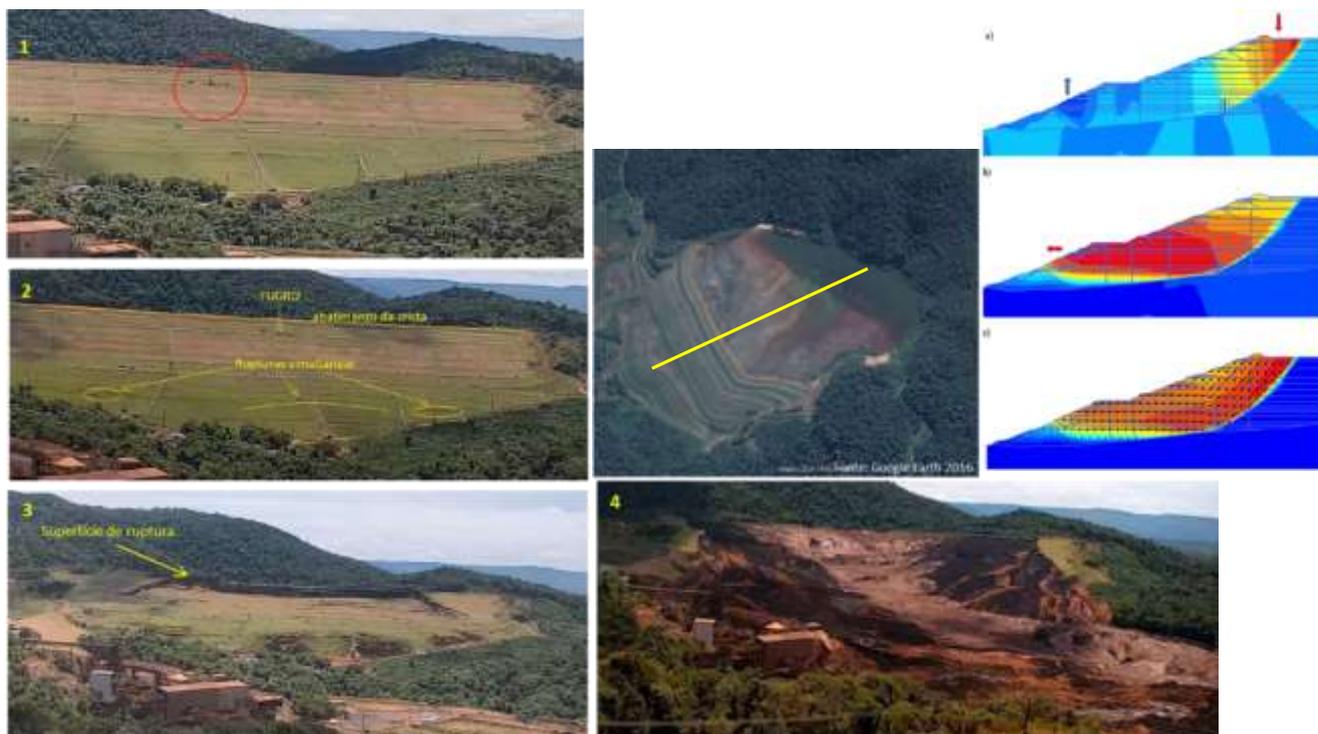


Figura 10. Processo de rompimento retrogressivo da Barragem I do Complexo Paraopeba da Vale S.A., em Brumadinho, Minas Gerais. Nas imagens de 1-4, evolução do rompimento em visão tomada das câmeras de segurança da Vale. Cenário 4 se deu 6 minutos após cenário 1. Circulo vermelho o local do furo B1-SM-13 que deu inicio ao gatilho do rompimento. Na figura da esquerda a – c, visão em perfil dos depósitos da barragem, com simulação da evolução do rompimento em vetores e superfície de ruptura. A figura de centro é visão em planta através de imagem do Google Earth, com localização do perfil (traço amarelo). Fonte: extraído do Relatório CIMNE (2021).

O processo de rompimento dessa barragem apresentou comportamento típico de movimento de massa, em vertente a procura de equilíbrio, estimulado por ações humanas em sua estrutura. Segundo os dados do CIMNE (2021, p. 201) – Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia da Universidade Politécnica de Catalunya Espanha, instituição contratada pela Vale S.A., a pedido do Ministério Público Federal, no processo de investigação do seu rompimento – a ruptura inicial foi acompanhada por uma sequência de falhas retrogressivas dos taludes que progrediram na direção superior através dos rejeitos. Essa ruptura teria sido consequência do processo de liquefação nos rejeitos da barragem, a partir do furo B1-SM-13, em andamento no momento da ruptura. Após estudos com modelagem numérica, o mecanismo de colapso obtido mostra uma ruptura dentro da barragem, começando na crista e se estendendo até um local logo acima do dique de partida (CIMNE, 2021, p. 203). O padrão de deslocamento apresenta abatimentos na crista da barragem e protuberâncias para fora da base, conforme o que pode ser observado em imagens de câmeras de segurança da Vale, conforme Figura 10.

De acordo com o CIMNE (2021) o processo inicial da ruptura ocorreu porque o furo resultou no aumento repentino da poropressão, devido ao ingresso de água localizada por meio desse furo, ocasionando liquefação nos rejeitos. Liquefação em massas de material seja de rejeito ou de solos já é fato conhecido da literatura geomorfológica de vertentes (DE PLOEY E GABRIEL, 1980). Esta é um processo associado ao aumento da poropressão, pelo qual a resistência ao cisalhamento é reduzida, à medida que a tensão efetiva no material se aproxima de zero (CARSON; KIRKBY, 1972).

Somente materiais contráteis estão sujeitos à liquefação que esta intrinsecamente relacionada ao comportamento frágil não drenado do material que fazia parte da composição da barragem de rejeito. Esse material não era homogêneo e apresentava gradações mais finas e outras mais grossas. Trata-se de descontinuidades ocasionadas por processos pedogênicos após deposição do material. As mais finas tinham permeabilidades mais baixas e estruturas mais contráteis e com menor capacidade de mobilizar resistência em condições não drenadas. Deste modo, rejeitos mais finos eram mais propensos à liquefação e mais perigosos porque mais frágeis e suscetíveis ao cisalhamento. A liquefação foi o gatilho da ruptura, provocada pela movimentação de água na região do furo, provocando a superfície de ruptura e o consequente movimento da massa de rejeitos vale abaixo (CIMNE, 2021, p. 201).

4. À guisa de conclusão

Para efeitos de uma conclusão preliminar, não podemos deixar de salientar que as descontinuidades existentes no rejeito da barragem precisam ser melhor compreendidas, em termos pedogênicos, porque responde por processos morfodinâmicos de busca de ajustamento e equilíbrio da massa sedimentar, através dos movimentos de massa. Essa diretriz geomórfica deve ser primordial para o entendimento da fisiologia da paisagem de relevos tecnogênicos em áreas de mineração, impondo limites e fundamentando, como dito anteriormente, políticas públicas que sejam capazes de substituir essa modalidade utilizada pela indústria de extração mineral.

Portanto, é importante dizer que o estudo de relevos tecnogênicos é uma necessidade básica nos países que, assim como o Brasil, precisam planejar minuciosamente a aplicação de seus recursos nos projetos de ordenamento territorial e aproveitamento dos recursos naturais, objetivando evitar esses “desastres ambientais”.

Para os geomorfólogos é necessário avançar nas pesquisas que possibilitem conhecer melhor a dinâmica geomórfica dos relevos tecnogênicos, principalmente em áreas de mineração com mega barragens de rejeitos e frentes de lavra extensas. A proposta de Ab’Sáber (1969) é um eixo metodológico que pode servir de diretriz a fundamentar melhor essas pesquisas em países tropicais como o Brasil. Fato que possibilitará desenvolver técnicas de cartografia geomorfológica

fundamentada nos parâmetros de ordem físico geotécnica, para melhor aplicação no ordenamento territorial, estabelecendo normas mais corretas para licenciamento desses empreendimentos. Isso responderá pela imposição de limites técnicos que venham a evitar a implantação dessas atividades, a muito tempo consideradas como rudimentares nos países mais avançados.

Referências

AB'SÁBER, A. N. Um conceito de Geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário. **Boletim Instituto de Geografia da USP**, 18, São Paulo, 1969.

ABREU, A. A. A Teoria Geomorfológica e sua Edificação: Análise Crítica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 4, n. 2, p. 51-67, 2003.

ANDRADE, C. F. **Relevo antropogênico associado à mineração de ferro no Quadrilátero Ferrífero: uma análise espaço temporal do Complexo Itabira (município de Itabira – MG)**. 2012. 130 f., Tese (Doutorado em Geografia), Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia, UFMG, Belo Horizonte, 2012.

ANDRADE, C.F.; VALADAO, R.C. **Relevo Antropogênico: mineração de ferro e a interferência humana**. 1ª ed. Curitiba: Appris, 2016. 147p.

ANTHONY, D. J.; HARVEY, M. D.; LARONNE, J. B.; MOSLEY, M. P. **Applying Geomorphology to Environmental Management**. **Water Resources Pubns**, Colorado, EUA, 2002.

ASSOCIATES, G. **Relatório – Levantamentos de Campo e Plano Inicial de Recuperação**. RT 001-159-515-2282-2-J. Preparado para a Samarco Mineração S.A, Vitória, 76 p., janeiro de 2016.

BEYER, P. J. (2022). **Dams in Geomorphology**. Elsevier Science; 1st edition, Binghamton, EUA, 2002.
BHUNIA, G. S.; CHATTERJEE, U.; LALMALSAWMZAUVA, K.C.; SHIT, P. K. (editores). **Anthropogeomorphology. A Geospatial Technology Based Approach**. Springer Cham: Switzerland.

CARSON, M. A. Thresholds and Characteristic Angle of Straight Slopes. **Mass Wasting**, 4th Ghelph Symposium on Geomorphology, Ontario, Canada, 1975, p. 19-34.

CARSON, M. A.; KIRKBY, M. J. **Hillslopes, forms and process**. Cambridge University Press, 1972.

CHANDRA DAS. B.; SANDIPAN. G.; AZNARUL. I.; ROY. S. **Anthropogeomorphology of Bhagirathi-Hooghly River System in India**. CRC Press, India, 2020.

CHEMEKOV, Y. F. **Technogenic deposits**. INQUA - International Association for Quaternary Studies, 11, Moscow, Abstracts, v. 3, p. 62, 1983.

CHORLEY, R. J.; DUNN, A. J.; BECKINSALE, R. P. The history of the study of landforms or The Development of Geomorphology. Volume one: **Geomorphology before Davis**. London, John Wiley & Sons Inc, Great Britain, 1964.

CIMNE – Centro Internacional de Metodos Numéricos en Ingeniería (UPC – Universidad Politecnica de Catalunya). Computational analyses of Dam I failure at the Corrego de Feijao mine in Brumadinho - Final Report. 561 p., Agosto de 2021. Disponível em <http://www.mpf.mp.br/mg/sala-de-imprensa/noticias-mg/desastre-da-vale-relatorio-elaborado-por-universidade-da-espanha-aponta-causas-do-rompimento-da-barragem-em-brumadinho-mg>. Acesso em outubro de 2021.

COLANGELO, A. C. **Movimentos de Massa e Evolução Geomorfológica das Vertentes no Alto Vale do Paraíba do Sul – São Luis do Paraitinga, SP**. Tese (Doutorado em Geografia Física), Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Departamento de Geografia, FFLCH – USP, São Paulo, 1995.

- COOKE, R. U.; DOORNKANP. J. C. **Geomorphology in environmental management: a new introduction**. 2ª ed., Oxford: Claredon Press, 413f, 1990.
- DANTAS, M. E. Apêndice II. Biblioteca de Relevo do Território Brasileiro. In: MORAES, J. M. (Org.). **Geodiversidade do Estado do Mato Grosso**. Goiânia, CPRM, 2010, p. 13-22.
- DE PLOEY, J.; GABRIELS, D. **Measuring soil loss and experimental studies**. In: KIRKBY, M. J.; MORGAN, R. P. C. Soil erosion. John Wiley & Sons, 1980.
- DE PLOEY, J.; KIRKBY, M. J.; AHNERT, F. Hillslope Erosion by rainstorms – A magnitude-Frequency Analysis. **Earth Surface Processes and Landforms**, vol. 16, p. 399-409, 1991.
- DOWNS, P. W.; GREGORY, K. J. **River channel management: towards sustainable catchment hydrosystem**. London, Arnold, 2004.
- GOUDIE, A. S.; HEATHER, A. V. **Geomorphology in the anthropocene**. London, Cambridge University Press, 2016.
- EDUARDO, C. C.; FELIPPE, M. F.; SILVA, T. M. Proposta Metodológica para Mapeamento de Relevos Tecnogênicos em Áreas de Desastres Ambientais. **Espaço Aberto**, v. 11, n.1, p. 5-26, 2021.
- ESPOSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulica**. 2000, 363 f., Tese, (Doutorado em Geotecnia), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2000. Disponível em <https://www.gov.br/ibama/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/cif/relatorios-da-rede-rio-doce-mar> Acesso em janeiro de 2020.
- FREIRE NETO, J. P. **Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade**. 2009, 179 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica), NUGEO – Núcleo de Engenharia da Escolha de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, 2009.
- FUNDAÇÃO ESPÍRITO SANTENSE DE TECNOLOGIA – FEST. **Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente**. Relatório Anual: Integração da Biodiversidade da Zona Costeira. RT-31 RRDM/NOV19. Comitê Interfederativo – CIF, Relatórios da Rede Rio Doce Mar, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, novembro de 2019a, 23 f. Disponível em <https://www.gov.br/ibama/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/cif/relatorios-da-rede-rio-doce-mar> acesso em janeiro de 2021.
- FUNDAÇÃO ESPÍRITO SANTENSE DE TECNOLOGIA – FEST. **Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente**. Relatório Anual: Anexo 1 – Monitoramento ecotoxicológico dos impactos causados pela lama oriunda do rompimento da barragem de Mariana (MG) em regiões dulcícolas, estuarinas e marinhas. RT-17 RRDM/NOV19. Comitê Interfederativo – CIF, Relatórios da Rede Rio Doce Mar, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, novembro de 2019b, 884 f. Disponível em <https://www.gov.br/ibama/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/cif/relatorios-da-rede-rio-doce-mar> acesso em janeiro de 2021.
- GORDON, N.; MCMAHON, T. A.; FINLAISON, B. L.; GIPPEL, C. J.; NATHAN, R. J. **Stream Hydrology: An introduction for ecologists**. England: John & Sons, Ltd., 2004.
- JUNK, W.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. Proceedings of the International Large River Symposium (LARS). **Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences**, 106, p. 110-127, 1989.
- LEOPOLD, L.B.; LANGBEIN, W.B. The concept of entropy in landscape evolution: **U.S. Geol. Survey Prof. Paper**, 500-A, pp. A1-A20, 1962.

MACHADO, H. A.; HENRIQUES, R. J.; SOUZA, R. F. Mineração e relevo antropogênico, o exemplo da extração de esteatito em Santa Rita, Ouro Preto, Minas Gerais. **Caminhos de Geografia**, v. 22, n. 81, p.166–175, 2021.

MEADOWS, M.; LIN, J. C. **Geomorphology and Society**. 1ª ed., Springer, Cape Town, South Africa, 2016.

MELHORN, W. N.; FLEMAL, R. C. Theories of landform development. A Proceedings Volume of the Sixth **Annual Geomorphology Symposia Series held at Binghamton**, New York, September 26-27, 1975. London George Allen & Unwin, London, 1981.

MENDES, M. B. **Comportamento geotécnico de uma barragem de rejeitos de minério de ferro alteada para montante**. 2007, 192 f., Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - USP, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, São Paulo, 2007.

MINAS GERAIS (Estado), Secretaria de Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana. Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. Grupo da Força-Tarefa, Decreto nº 46.892/2015. Belo Horizonte, fevereiro de 2016.

OJEDA, A. O. **Território Fluvial: diagnóstico y propuesta para la gestión ambiental y de riesgos em el Elbro y los cursos bajos de sus afluentes**. Bilbao: Bakeaz y Fundación Nueva Cultura del Agua, 2007.

PASCHOAL, L. J. **Estudo dos efeitos da criação de morfologias antropogênicas em área de mineração**. 2014, 177f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Rio Claro, 2014.

PASCHOAL, L. G.; CUNHA, C. M. L.; CONCEIÇÃO, F. T. A cartografia geomorfológica como subsídio para a análise do relevo antropogênico em área de mineração. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, n.4, p.379-391, 2012.

PARK, C. C. Man, river systems and environmental impacts. **Progress in Physical Geography**, v. 5, n. 1, p. 1-31, 1981.

PEREIRA, E. L. **Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. 2005, 210 f, Dissertação (Mestrado em Geotecnica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Ouro Preto, 2005.

PEREIRA, L. F.; CRUZ, G. B.; GUIMARÃES, R. M. F. Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 4, n. 2, p.122-129, 2019.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SANTOS, E. E.; SOUZA, C. M.; NETO, J. D.; FILHO, E. I. F.; DELPUPO, C. **Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecno solos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG**. Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG, Belo Horizonte, V. 24, nº 1/2, 2015.

SELBY, M A. **Hillslopes, materials and process**. Oxônia, Oxford University Press, England, 1983.

SIDLE, R. C.; PEARCE, A. J.; O'LOUGHLIN, C. L. **Hillslope stability and land use**. American Geographers Union: Washington, 1985.

SZABÓ, J.; DÁVID, L.; LOCZY, D. **Anthropogenic Geomorphology: A Guide to Man-Made Landforms**. Budapeste: Springer, 2010.

TER STEPANIAN, G. **Beginning of the Technogene**. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, 38: 133-144, 1988.

THORNBUSH, M. J.; ALLEN, C. D. **Urban Geomorphology: Landforms and Processes in Cities**. 1ª edition, London, England, 2018.

THORNE, C. R.; HEY, R. D.; DOORKAMP, J. C. **Applied fluvial geomorphology for engineering and management**. Chichester: John Willey & Sons, 1997.

TRICART, J. A geomorfologia nos estudos integrados de ordenação do meio natural. Boletim Geográfico, n. 251, p. 15-42., 1976

_____. A geomorfologia, a edafologia e o ordenamento do espaço rural. **GEOgraphia**, ano V, n. 09, p. 135-148, 2003,

VERSTAPPEN, H. Th. **Applied geomorphology: geomorphological surveys for environmental development**. Amsterdam: Elsevier, 1983.

VERVLOET, R. J. H. M. (2016) A geomorfologia da região de rompimento da barragem da Samarco: da originalidade da paisagem à paisagem da mineração. In: MILANEZ, B. e LOSEKANN, C. (org.). **Desastre no Vale do Rio Doce: antecedentes, impactos e ações sobre a destruição**. Rio de Janeiro: Folio Digital Letra e Imagem: 91-121.

_____. Meditações em torno da relação entre Engenharia Hidráulica e Geomorfologia Fluvial: Breve apanhado histórico e apontamentos para novas pesquisas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 3, p. 547- 564, 2016. Disponível em <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i3.1031>

ZHAO, F.; XU, Z.; ZHANG, L. Changes in streamflow regime following vegetation changes from paired catchments. **Hydrological Processes**, v. 26, p. 1561-1573, 2012.