
Impactos do rompimento da barragem de Fundão (Mariana - MG) na geometria hidráulica do Rio Gualaxo do Norte

| **Diego Rodrigues Macedo**
UFMG

| **Antônio Pereira Magalhães Júnior**
UFMG

| **Regina Paula Benedetto de Carvalho**
UFMG

| **Miguel Fernandes Felipe**
UFJF

RESUMO

Em 5 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, no Município de Mariana em Minas Gerais, liberando 34 milhões de m³ de rejeitos de minério e causando diversos danos ambientais, sociais e econômicos. Dados os potenciais impactos hidrogeomorfológicos do evento, este trabalho tem como objetivo compreender como os rejeitos alteraram a dinâmica de ajuste do canal do rio Gualaxo do Norte, um dos mais afetados pelo rompimento. Tendo sido menos atingido pelos rejeitos, o Rio do Carmo foi adotado como referência para comparação devido às semelhanças hidrogeomorfológicas. Foram calculados parâmetros da geometria hidráulica de ambos os rios com base em dados de duas estações fluviométricas, uma no rio Gualaxo do Norte e uma no Rio do Carmo, entre os anos de 2011 a 2015 (antes do rompimento) e 2016 a 2020 (depois do rompimento). Os parâmetros de vazão (Q), largura (w), profundidade (d) e velocidade (v) foram avaliados através do ajuste de modelo de regressão, diagramas de dispersão e testes estatísticos. Os resultados indicam que os rejeitos alteraram o equilíbrio do canal do rio Gualaxo do Norte e este sofreu processos de reajustes após o acréscimo de carga sedimentar.

Palavras-chave: Rejeitos Minerais, Desastres Ambientais, Barragens de Rejeito, rio Gualaxo do Norte.

■ INTRODUÇÃO

No dia 5 de novembro de 2015 o rompimento da barragem de rejeitos de minério de ferro de Fundão, no município de Mariana (MG), liberou grande quantidade de lama e resíduos de mineração na bacia do rio Doce, gerando danos ambientais, sociais e econômicos (FERNANDES *et al.*, 2016; SEDRU, 2016; MILANEZ; LOSEKANN, 2016; RUCHKYS *et al.*, 2019). Após o rompimento, o fluxo viscoso atingiu a Barragem de Santarém, à jusante, causando o seu galgamento, e irrompendo em direção aos fundos de vales, percorrendo até 600 km de distância até alcançar o litoral Atlântico no município de Linhares (ES). Foram liberados 34 milhões de m³ de rejeitos de textura fina sob a forma de fluxos de lama, dentre os quais cerca de 18 milhões m³ foram imediatamente carreados pela drenagem e cerca de 16 milhões de m³ foram depositados no fundo do vale do rio Gualaxo do Norte, na bacia do Alto rio Doce, sendo gradativamente carreados para jusante pelos fluxos fluviais, principalmente nos períodos chuvosos (IBAMA, 2015). Os vales do córrego Santarém (MENDES *et al.*, 2019) e do rio Gualaxo do Norte (SANTANA, 2021) foram os mais impactados em termos hidrossedimentológicos (SANTANA, 2021), pois abrangem a área diretamente afetada pelo rompimento (Figura 1). O volume do rejeito e a energia do seu deslocamento causaram alterações na morfologia e na dinâmica hidrossedimentológica do sistema fluvial, além de alterações na qualidade da água (ÁVILA *et al.*, 2017; DA CUNHA RICHARD, 2020; CARVALHO *et al.*, 2021; SANTANA, 2021). A massa sedimentar se comportou como fluido, tal como descargas sedimentares lamosas típicas de inundações episódicas (CPRM/ANA, 2015a; 2015b. VERVLOET, 2016).

O fornecimento repentino de tão elevada carga sedimentar impactou a capacidade e a competência de transporte fluvial, alterando a dinâmica de ajuste do canal em termos geomorfológicos (ÁVILA *et al.*, 2017; CPRM/ANA, 2015a; 2015b). A investigação destas alterações pode ser baseada na mensuração de parâmetros de geometria hidráulica, como vazão, profundidade, largura e velocidade de fluxo (LEOPOLD *et al.*, 1964; CHRISTOFOLETTI, 2011; GRISON; KOBAYAMA, 2011).

A aplicação de variáveis de geometria hidráulica permite analisar a dinâmica de comportamento de parâmetros dos cursos d'água em termos espaço-temporais, sendo relevantes para o grau de eficiência de intervenções que buscam a mitigação e a recuperação de impactos ambientais (CHRISTOFOLETTI, 2011; MACEDO *et al.*, 2020; MACEDO; MAGALHÃES JÚNIOR, 2020; SANTANA, 2021). Neste sentido, a interpretação dos parâmetros deve considerar que a configuração morfológica de cada curso d'água resulta de processos de esculturação que buscam otimizar a energia empregada no escoamento de água e sedimentos. Variáveis como a seção largura-profundidade, o perfil longitudinal fluvial e a organização espacial dos canais, dependem não apenas das características do fluxo



(magnitude, velocidade e regime) mas também do tipo de substrato (rochoso ou aluvial), da natureza da carga sedimentar (de fundo, suspensa ou dissolvida) e da quantidade de material transportado (DINGMAN, 2009; STEVAUX & LATRUBESSE, 2017; MAGALHÃES JÚNIOR *et al.*, 2020). As relações entre parâmetros de geometria hidráulica podem, portanto, trazer indicadores úteis à investigação dos impactos de rompimentos de barragens de rejeito, os quais tornaram-se recorrentes no panorama nacional e internacional a partir do Século XX (AZAM, 2010; MARSHALL, 2017; REIS *et al.*, 2020).

Considerando o potencial de alteração hidrogeomorfológica dos sistemas diretamente afetados pelo rompimento, buscou-se avaliar os ajustes do canal do rio Gualaxo do Norte por meio das relações entre vazão (Q), profundidade (d), largura (w) e velocidade do fluxo (v). A comparação dos valores dessas variáveis antes e após o desastre pode evidenciar possíveis alterações na dinâmica fluvial e sua capacidade de ajuste às novas condições hidrogeomorfológicas.

■ MÉTODO

Área de estudo

Com 83.400 km² de área, a bacia do rio Doce situa-se na região sudeste do país, abrangendo os estados de Minas Gerais e Espírito Santo. O rio Doce nasce da confluência dos rios Piranga e Carmo, com nascentes nos municípios de Ressaquinha e Ouro Preto (MG) e foz no oceano Atlântico, em Linhares (ES). O regime fluvial regional é perene e acompanha o comportamento climático tropical, com vazantes entre os meses de agosto a setembro e picos de cheias entre dezembro e março. Cerca de 98% da bacia se insere no bioma Mata Atlântica e 2% no Cerrado, apresentando relevo ondulado, montanhoso e acidentado (CBH-DOCE, 2019).

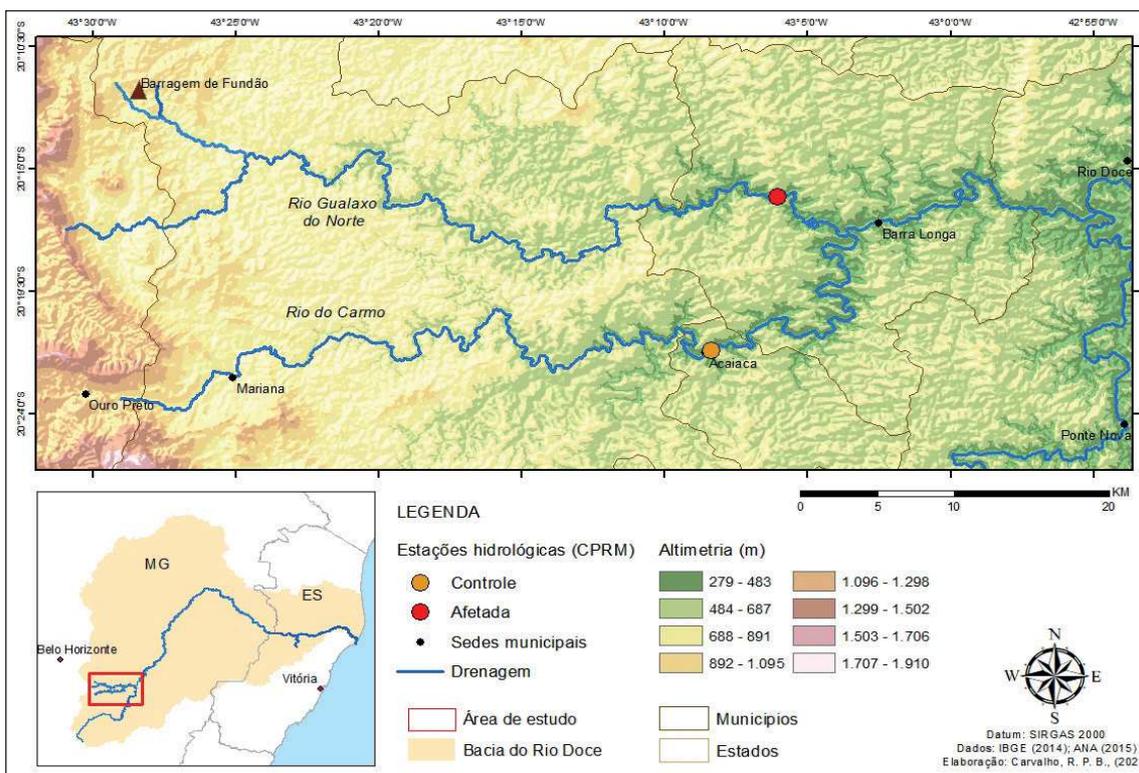
O rio Gualaxo do Norte é um dos principais afluentes do Alto rio Doce (bacia com cerca de 561,55 km²), e foi o curso d'água de maior porte mais afetado pelo rompimento (DA CUNHA RICHARD, 2020; SANTANA, 2021). Os rejeitos entulharam de imediato os córregos Ferrugem e Santarém, atingindo o Gualaxo do Norte até a confluência com o Rio do Carmo em Barra Longa. Este último foi utilizado como sistema de referência para comparação pois não foi atingido diretamente pelo desastre e possui porte semelhante ao Gualaxo do Norte, ambos de 6^a ordem (*sensu* Strahler). Além disso, as estações hidrológicas que são fontes dos dados utilizados nos dois rios estão situadas nas mesmas declividades (4°) e faixas altimétricas (279 a 483m) - Fig. 1. No Gualaxo do Norte, a distância entre a nascente e a estação (afetada) é em torno de 78,13 km, com desnível topográfico de 636m. Já a distância





entre a nascente do Rio do Carmo e a estação (controle) é de 65,42 km, com um desnível topográfico de cerca de 1136m.

Figura 1. Rios Gualaxo do Norte e do Carmo e estações hidrológicas (fontes de dados).



Fonte: elaborado pelos autores; extraído de IBGE (2014) e ANA (2015).

A bacia do rio Gualaxo do Norte abrange as unidades geológico-geomorfológicas do Quadrilátero Ferrífero (QF), no Alto curso, e os Planaltos dissecados do Centro-Sul e do Leste de Minas no restante da área (IBGE, 2021). O QF possui cerca de 7000 km², sendo delimitado por morfoestruturas serranas sustentadas por rochas resistentes à desnudação, e onde se concentra a maior parte das reservas minerais do estado de Minas Gerais. Diversos estudos destacam o papel da tectônica e do complexo quadro estrutural na configuração do relevo regional (VARAJÃO, 1991; ALKMIM; MAGALHÃES JÚNIOR; SAADI, 1994; MARSHAK, 1998; SALGADO *et al.*, 2008; LANA; CASTRO, 2010). Conforme trazem Barros e Magalhães Júnior (2019), o QF pode ser dividido em unidades geológicas a partir da sistematização das informações publicadas em diferentes trabalhos como os de Maxwell (1972), Dorr (1969), Varajão (1991) e Alkmim e Marshak (1998) - Fig. 2: (i) Complexos cristalinos (gnaisses, migmatitos e granitóides) expressos em estruturas dômicas; (ii) Supergrupo Rio das Velhas, principalmente, xistos e filitos, expresso por uma sequência tipo greenstone belt com base vulcânica; (iii) Supergrupo Minas, um pacote metassedimentar proterozóico constituído principalmente por quartzitos e itabiritos, estes últimos sendo formações ferríferas bandadas adotadas como critério de delimitação do QF (ALKMIM; MARSHAK, 1998); (iv) Grupo Itacolomi, formado por quartzitos fluviais proterozóicos; (vii) Bacias sedimentares

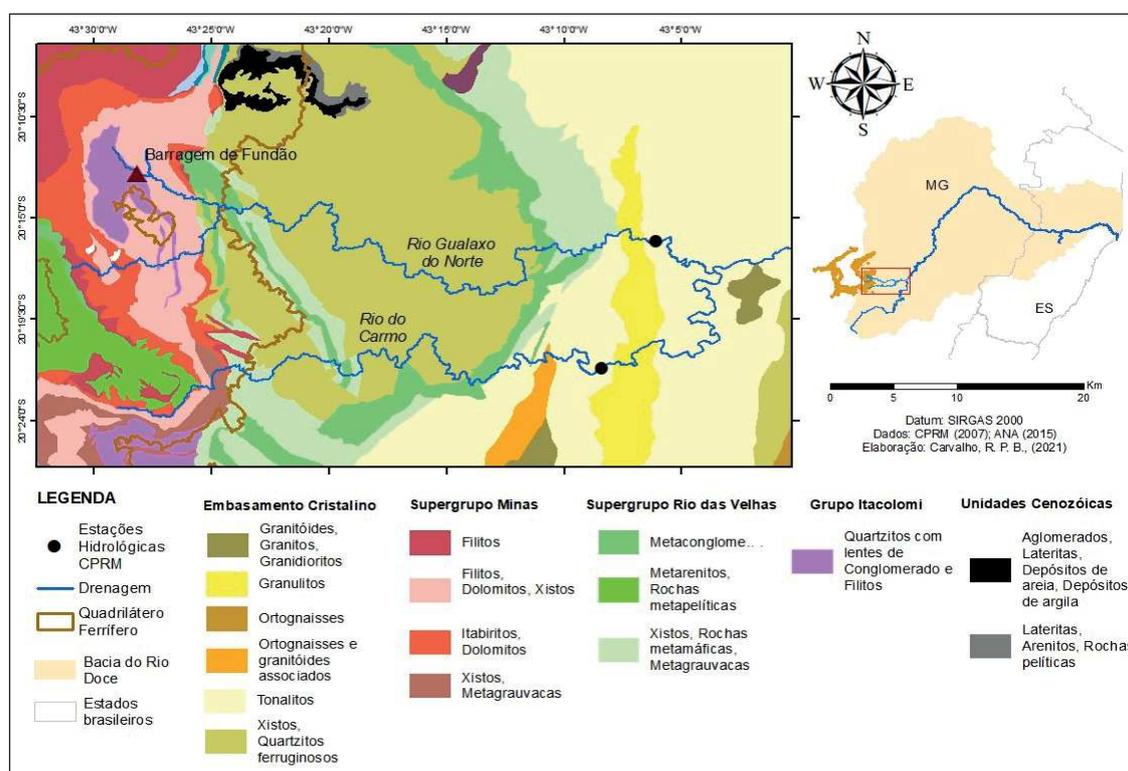




cenozóicas; (viii) Formações superficiais inconsolidadas que envolvem cangas e depósitos aluviais e coluviais quaternários (BARROS; MAGALHÃES JÚNIOR, 2020).

Conforme a Figura 2, pode-se observar que a drenagem do rio Gualaxo do Norte possui condicionamento litológico semelhante ao Rio do Carmo, o qual foi utilizado para fins de comparação dos dados hidrológicos. O Alto vale dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo assenta-se em litologias do Supergrupo Minas (filitos, dolomitos, itabiritos e xistos) e, parcialmente (a partir de tributários), quartzitos e filitos do Grupo Itacolomi, onde também está localizada a barragem de Fundão. A maior parte dos médio-baixos vales de ambos os rios atravessa as rochas proterozóicas do Embasamento Cristalino, basicamente xistos, quartzitos ferruginosos, tonalitos e granitóides. Em segmentos específicos, os vales são cortados por rochas do Supergrupo Rio das Velhas (xistos, conglomerados, filitos) e por granulitos do Embasamento Cristalino (CPRM, 2007).

Figura 2. Geologia regional.



Fonte: elaborado pelos autores, extraído do CPRM (2007) e ANA (2015).

A geologia regional exerce importante controle nos processos de dissecação do relevo, fato expresso no alinhamento de cristas, na morfologia das encostas e no encaixamento fluvial (IBGE, 2021). As áreas serranas, onde está a barragem de Fundão, são sustentadas por itabiritos e quartzitos mais resistentes à denudação, enquanto na maior parte do vale do Gualaxo do Norte o relevo ondulado de morros e colinas reflete a influência das rochas do embasamento cristalino (BARROS; MAGALHÃES JÚNIOR, 2013; SALGADO *et al.*, 2008).





A passagem da onda de rejeito pelo fundo do vale do Gualaxo do Norte afetou trechos de confluências com tributários a jusante, ora erodindo ora se acumulando ao longo das calhas fluviais (Fig. 3 e 4). Outra parte do fluxo continuou se deslocando e alcançou o rio Doce (CPRM/ANA, 2015a; 2015b; VERVLOET, 2016). No Gualaxo, a lama seguiu a direção preferencial da drenagem com elevada energia. Já nos tributários houve duas ondas de passagem: na primeira, os sedimentos lamosos invadiram as confluências em processos de fluxos remontantes, ocupando a maior parte dos leitos e reduzindo as seções disponíveis para a circulação da água; como consequência, os processos de inundação que se seguiram removeram parte dos depósitos gerados pela primeira onda, formando planícies de rejeito de minério de ferro (VERVLOET, 2016).

Figura 3. Fundo do vale do rio Gualaxo do Norte em Barra Longa (A) e Ponte do Gama (B).



Fotos: Regina Carvalho (19/07/2018).

Figura 4. Deposição de rejeito nas margens (A) e leito (B) do rio Gualaxo do Norte.



Fotos: Diego Macedo (07/04/2018).

Procedimentos e técnicas

Foram analisados dados de duas estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas – ANA (2020), disponíveis na plataforma Hidroweb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb>). A estação 56335001, localizada no Rio do Carmo (latitude S 20° 21' 41.04"; longitude W 43° 8' 21.84") não foi atingida pelo rejeito e foi considerada como “referência”. A estação 56337000, localizada no rio Gualaxo do Norte (latitude S 20° 16' 1.92"; longitude W 43° 6' 2.88'), foi





impactada pelo rejeito. Foram utilizados dados de vazão, profundidade, largura do canal e velocidade do fluxo, antes (2011-2015) e após o rompimento (2016-2020). A base de dados foi dividida para que fosse utilizado o mesmo número de medições antes e após o rompimento em ambas as estações ($n=15$). A análise da dinâmica de ajustes do canal foi realizada através de elementos inter-relacionados da geometria hidráulica (LEOPOLD & MADDOCK, 1953), os quais podem ser expressos por relações matemáticas (Equações 1-3):

$$\text{Largura} \quad w = aQ^b \quad (1)$$

$$\text{Profundidade} \quad d = cQ^f \quad (2)$$

$$\text{Velocidade} \quad v = kQ^m \quad (3)$$

Sendo: Q = descarga ou vazão (velocidade x área); a , c , k os coeficientes; b , f , m os expoentes, onde $b + f + m = 1$.

Quando as equações 1, 2 e 3 são representadas graficamente em relação aos valores de vazão (Q), em escala logarítmica, os valores de b , f e m correspondem à inclinação da reta (β_1) em um modelo de regressão linear. Neste sentido, as equações de relação entre a vazão, largura, profundidade e velocidade foram calculadas nos momentos antes e após o rompimento da barragem de Fundão nos rios Gualaxo do Norte e do Carmo. As retas foram plotadas em diagramas de dispersão para análise visual, sendo que a semelhança estatística entre a inclinação das retas (β_1) e o intercepto (β_0) foram testadas entre os dois momentos, utilizando análise de covariância (ANCOVA). Foi testada a hipótese nula que os coeficientes β_1 e β_0 são iguais ao nível de significância de 5%. Adicionalmente, o erro-padrão dos ajustes das retas foram plotados no diagrama de dispersão, para auxiliar na interpretação dos ajustes das equações.

A pesquisa foi complementada por trabalhos de campo entre abril e julho de 2018, novembro de 2019, maio e novembro de 2020, e maio de 2021, nos quais foi realizado o reconhecimento da área e observações macroscópicas de possíveis mudanças na morfologia do canal.

■ RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados devem ser analisados sob a ótica de que a configuração morfológica dos cursos d'água resulta de complexos processos de ajustes em prol de um estado de equilíbrio (dinâmico) entre diferentes variáveis. Quando a dinâmica dos fluxos é alterada, principalmente em situações de impactos intensos, os choques referentes aos *inputs* de matéria e energia exigem um grau de resiliência que dificilmente é alcançado pelos sistemas fluviais para manter a sua configuração original. Os ajustes são, portanto, particularmente





necessários no tocante à geometria dos canais fluviais, mas os mesmos ocorrem e se estabelecem em função de um conjunto de fatores físicos e do grau de interferência antrópica (GREGORY, 2006; DEY, 2014).

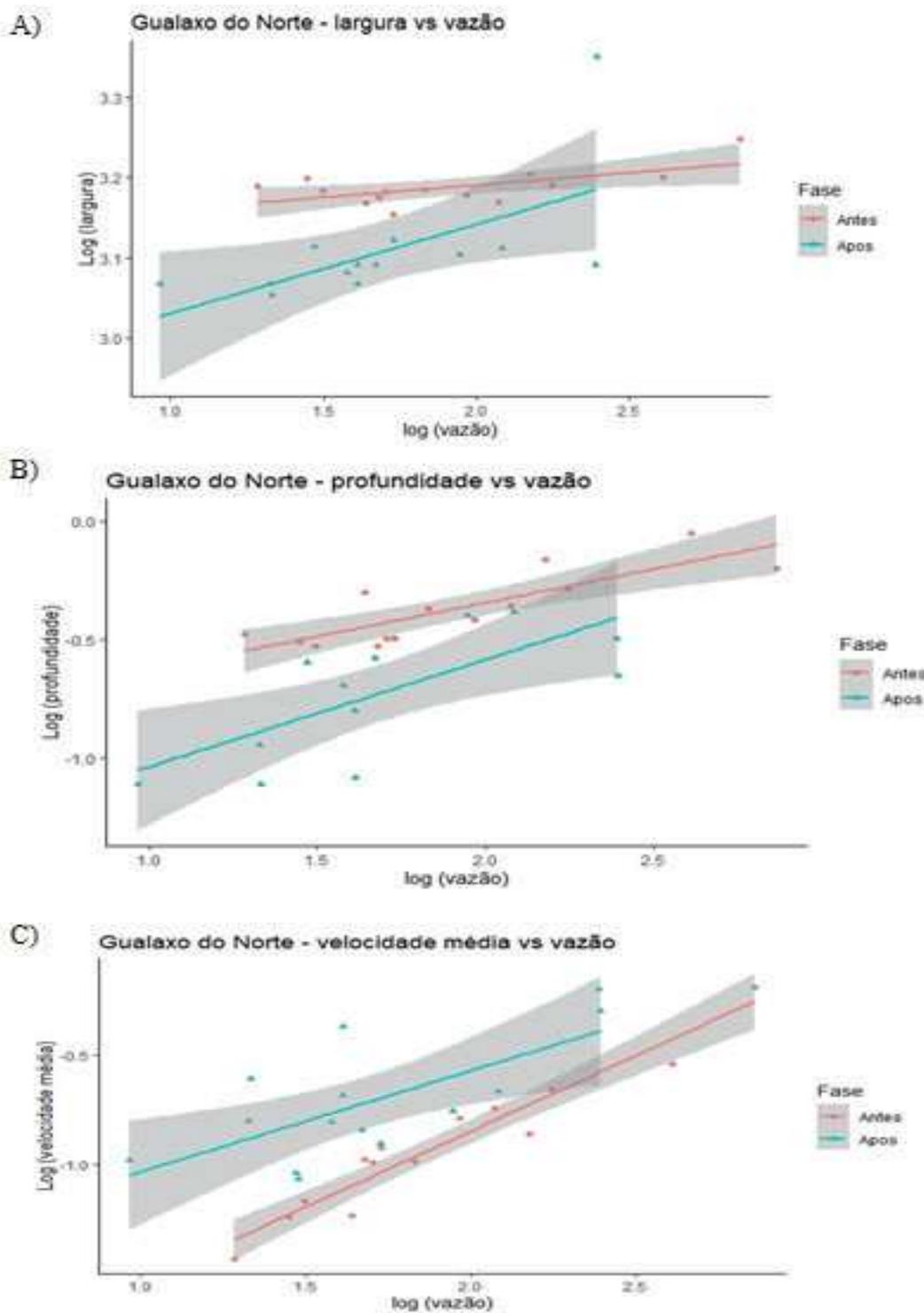
A Figura 5 mostra a dinâmica de ajuste do Gualaxo do Norte após o rompimento da barragem em 2015. Os resultados indicam que o rio teve a largura, profundidade e velocidade da água alterados (representado pelo valor do intercepto ou β_0), no entanto a inclinação das retas são similares (coeficiente β_1). Além disso, o momento após o rompimento possui um maior erro-padrão, ou seja, o ajuste da equação possui um maior erro em relação ao valor médio estimado.

A redução da largura e a diminuição da profundidade do canal do rio Gualaxo do Norte (estreitamento da seção fluvial) condicionaram o aumento da velocidade do fluxo no trecho estudado, mostrando ajustes característicos de trechos fluviais de porções superiores das bacias, onde há a tendência de maiores declividades e energia de transporte (STEVAUX; LATRUBESSE, 2017; MAGALHÃES JÚNIOR *et al.*, 2020). Por outro lado, o canal do Rio do Carmo não apresentou modificações significativas, conforme o esperado, pois os depósitos de rejeitos ficaram restritos à zona de confluência com o Gualaxo do Norte (fluxos remontantes) – Fig. 6.





Figura 5. Relações entre variáveis geométricas do rio Gualaxo do Norte nos períodos pré (2011-2015) e pós-rompimento (2016-2020). O sombreado indica o erro-padrão relativo ao ajuste das retas de regressão.

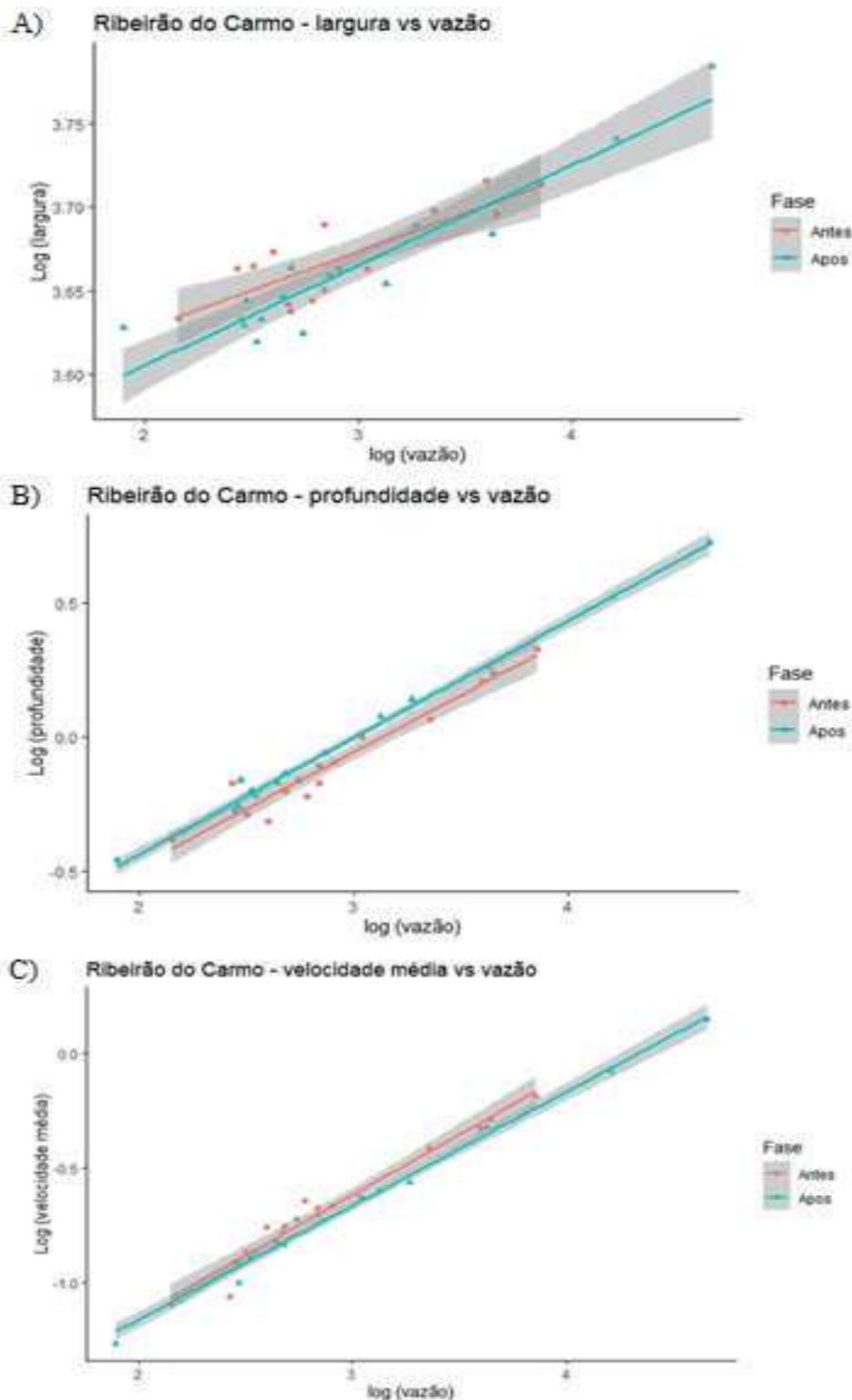


Fonte: elaborado pelos autores, extraído da ANA (2020).





Figura 6. Relações entre variáveis geométricas do Rio do Carmo nos períodos pré (2011-2015) e pós-rompimento (2016-2020). O sombreado indica o erro-padrão relativo ao ajuste das retas de regressão.



Fonte: elaborado pelos autores, extraído da ANA (2020).

A Tabela 1 permite aferir o comportamento dos expoentes b , f e m no rio Gualaxo do Norte e no Rio do Carmo, e as alterações das relações da geometria fluvial geradas pelo aporte de sedimentos. Enquanto há diferenças nos coeficientes β_0 - que indicam as alterações na profundidade, largura e velocidade, os expoentes b , f e m não são estatisticamente





diferentes ($p > 0,05$). No Rio do Carmo todas as relações continuam semelhantes no momento pós rompimento, explicitando que os ajustes no Gualaxo do Norte não são de origem natural/regional, como seria o caso de ajustes hidrogeomorfológicos em função de mudanças no regime fluvial (Tabela 1).

Tabela 1. Diferenças dos coeficientes β_1 e β_0 nas relações entre parâmetros hidráulicos no rio Gualaxo do Norte (* p-valor $< 0,05$ denota diferenças significativas) e Rio do Carmo (não há diferença entre os ajustes).

Trecho	Coeficientes	Largura vs Vazão		Profundidade vs Vazão		Velocidade vs Vazão	
		β_0	β_1 (b)	β_0	β_1 (f)	β_0	β_1 (m)
Rio Gualaxo do Norte	Antes	3,129	0,030	-0,91	0,28	-2,221	0,69
	Depois	2,92	0,11	-1,418	0,42	-1,490	0,46
	Teste-t (Ancova)	-0,208*	0,080	-0,574*	0,167	2,74*	-1,567
Rio do Carmo	Antes	3,554	0,040	-1,304	0,415	-2,242	-2,156
	Depois	3,485	0,060	-1,313	0,437	0,541	0,497
	Teste-t (Ancova)	-0,049	0,013	0,019	0,011	0,038	-0,028

Fonte: elaborado pelos autores, extraído da ANA (2020).

Diversos estudos no campo da geomorfologia fluvial mostram relações estreitas entre a granulometria da carga sedimentar e a relação entre largura (w) e profundidade (d) de cursos d'água (SCHUMM, 1963; 1977; GRAF, 1998; DODOV, B.; FOUFOULA-GEORGIU, 2004). Apesar dos coeficientes b , f , e m aparentemente não terem se alterado, o aumento do valor do erro-padrão nos ajustes após o rompimento (Fig. 5) indica a desorganização dessas relações, causada por distúrbio no sistema devido ao aporte da lama. Neste sentido, canais com maior proporção de lama tendem a ser mais estreitos e profundos em longo termo em função da coesão que as argilas oferecem aos leitos e margens, e provavelmente isso ocorrerá futuramente no Gualaxo do Norte. Entretanto, os resultados mostram que o canal ficou mais estreito e raso com o entulhamento, o que foi compensado com o aumento da velocidade do fluxo. Neste sentido, Stevaux & Latrubesse (2017) salientam que vários autores têm substituído o expoente m da fórmula da velocidade da água (apresentada acima) pela relação da carga suspensa e da carga de fundo, o que amplia as possibilidades analíticas de dados hidrológicos nos estudos de ajustes de canais. No entanto, são poucas as estações da rede nacional de monitoramento hidrológico que realizam a aferição de sedimentos (MACEDO *et al.*, 2018).

Por outro lado, apesar do rejeito ter se comportado como material fluido durante o evento, e ser quimicamente rico em ferro, a sua coesão não se apresenta elevada quando o material está seco, fato favorecido pela textura do material (CPRM/ANA, 2015a; 2015b). Almeida *et al.* (2018) mostram que o rejeito é de textura silto-arenosa, formado por 47,5% de silte, 42% de areia e somente 10,6% de argila. Os autores também informam que predominam os minerais caulinita, illita, goethita e hematita, na fração argila, referentes a óxidos e filossilicatos, além de quartzo e mica. Na composição química do rejeito destacam-se





ferro, alumínio, manganês e cromo. Estas características conferem propriedades bastante diferentes ao material entre os estados úmido e seco no que se refere à plasticidade e à resistência à erosão. Sulcos erosivos na planície recoberta por rejeito mostram que, quando seco, o material silto-arenoso pode ser removido durante as chuvas e levado para a calha fluvial, o que ressalta a importância do monitoramento do rejeito ao longo do tempo (Figura 7).

Figura 7. Depósitos de rejeito remobilizado no rio Gualaxo do Norte.



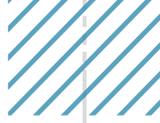
Fotos: Regina Carvalho (07/04/2018).

A mobilização expressiva de sedimentos da planície não confirmaria os resultados do trabalho de Estigoni *et al.* (2020), para os quais a maior parte dos sedimentos remobilizados do rejeito no vale do Gualaxo do Norte, nos últimos anos, provém do próprio leito fluvial, já que a remoção dos sedimentos na planície seria limitada pela insuficiente energia dos fluxos para atingir as áreas marginais durante as cheias.

A deposição do rejeito na planície deve ter modificado a resistência dos ambientes marginais aos processos de recuo e à migração lateral do Gualaxo do Norte. Porém, os dados da Figura 4 não mostram que os depósitos silto-arenosos tenham facilitado a abertura da seção transversal do canal pela erosão marginal ou pela desestabilização das margens (quedas, desbarrancamentos), já que o mesmo tornou-se mais estreito. Este fato pode estar associado à maior resistência conferida pelos demais materiais das margens, em relação ao rejeito (o qual é removido por processos predominantemente pluviais), a saber: o substrato rochoso e o antigo material aluvial da planície (areno-argiloso). Porém, é importante lembrar que o intervalo temporal de análise é relativamente curto para a confirmação destas hipóteses, exigindo um maior período de monitoramento.

Já o leito fluvial, por sua vez, foi assoreado, em grande parte, pelo rejeito quando do rompimento. Entretanto, a elevada energia dos fluxos nas cheias (associada ao aumento da velocidade) vem gradualmente removendo parte do mesmo, enquanto nos ambientes de baixa energia o rejeito vem sendo encoberto por aluviões arenosos e detríticos da dinâmica atual. Os processos de remoção sedimentar e incisão ainda não se refletiram em encaixamento do leito no substrato rochoso, com base nos resultados. Em trabalhos de campo pôde-se constatar que, atualmente, há segmentos com leito aluvial (clastos e areia) e outros





em substrato rochoso que, frequentemente, coincidem com corredeiras já existentes antes do rompimento (Figura 8).

Figura 8. Trecho do rio Gualaxo do Norte com corredeira em leito rochoso ao fundo e leito aluvial em primeiro plano (A) e trecho com leito rochoso (B).



Fotos: Jhonathan Magalhães (26/05/2021).

Como visto, os ajustes na seção fluvial nos trechos analisados não têm explicação aparente nas características físicas do rejeito presente na calha. Sendo predominantemente silto-arenoso, o material tende a ter baixa coesão e resistência, facilitando o recuo das margens. Outra hipótese a ser considerada nos ajustes da seção do canal envolve os impactos físicos do rompimento na remoção de materiais de leito que encobriam e protegiam um substrato aluvial e rochoso friável. A elevada energia do fluxo de rejeito pode ter atuado como um eficiente mecanismo de arraste da cobertura aluvial mais resistente que era pouco mobilizada pelos fluxos fluviais ordinários e formava um pavimento detrítico no leito. Esse fenômeno, entendido como encouraçamento na literatura, é comum em sistemas fluviais do Quadrilátero Ferrífero, seja sob forma de pavimentos de clastos, seja sob forma de couraças ferruginosas (COTA *et al.*, 2018; FIGUEIREDO FILHO *et al.*, 2019). Com a remoção desta barreira protetora, consolidada ao longo de um período geológico incerto, os fluxos podem passar a erodir as camadas inferiores mais friáveis, formadas por aluviões mais finos e/ou pouco coesos, além do próprio saprolito alterado, aumentando a incisão do canal com o tempo. A própria massa de rejeito deve ter removido significativa parte deste substrato aluvial friável na sua passagem. No caso do rio Gualaxo do Norte, a existência de encouraçamento e o seu papel na dinâmica fluvial devem ser futuramente investigados.

■ CONCLUSÕES

O trabalho mostrou que o rompimento da barragem de Fundão provocou impactos na morfologia do rio Gualaxo do Norte, particularmente na largura (tornou-se mais estreito) e na profundidade (tornou-se mais raso) e conseqüentemente ocorreu o aumento da velocidade da água. O rejeito de textura fina e rico em ferro contribui para os processos de incisão fluvial





e, contrariamente ao que se poderia esperar, não apresenta elevada coesão e resistência aos processos erosivos. Este cenário é ilustrado pelos indicativos de erosão do rejeito nas planícies afetadas, com formação de sulcos ao longo dos quais os sedimentos são carreados pelas chuvas para o leito fluvial. Os ajustes são dinâmicos e a incisão do canal no substrato rochoso poderá ocorrer no futuro.

O comportamento dos parâmetros b , f e m em relação a Q , mostram a ocorrência de adaptações do canal após a liberação da elevada carga de rejeitos de minério de ferro. O Rio do Carmo, por sua vez, não apresenta alterações estatisticamente significativas em suas variáveis de ajuste do canal, o que permite concluir que não houve modificações de cunho natural/regional (p.ex. alteração no regime de vazões) que possam ter alterado a dinâmica do rio Gualaxo do Norte.

Falar em “equilíbrio fluvial” é complexo e pouco consensual, pois não há parâmetros claros sobre a definição de um estado de equilíbrio mensurável, como já salientavam Langbein e Leopold (1964) e Schumm (2005). Esta noção somente adquire sentido em uma avaliação temporal de relativa duração marcada por períodos com certos comportamentos fluviais específicos. Entretanto, em termos gerais, o rompimento da barragem pode ser considerado um evento de rompimento do estado de relativa estabilidade vigente à época, ou de um limiar de absorção dos impactos causados pelo acréscimo sedimentar exagerado, levando-o a adaptações em sua morfologia. Os resultados ilustram, portanto, o decisivo papel do homem como agente geomorfológico no Antropoceno, alterando a morfologia e a dinâmica fluvial no Planeta, como vem sendo abordado por diversos autores como Peloggia (1997), Hooke (2000), Rózsa (2010) e Steffen *et al.* (2015).

Os resultados podem ser complementados futuramente por outras possibilidades analíticas, considerando que as baseadas em imagens de satélite e modelos de terreno são limitadas, dado que não há informações pretéritas sobre o desastre em alta resolução espacial.

■ AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo financiamento da pesquisa (Projetos 402907/2016-7 e 407704/2018-3) e pelas bolsas de produtividade PQ-305175/2017-3 e PQ-309763-2020-7; à CAPES (código 001) pelo financiamento da pesquisa; ao grupo de pesquisa RIVUS - Geomorfologia e Recursos Hídricos.





■ REFERÊNCIAS

1. ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**. n.90, p.29–58. 1998.
2. ALMEIDA, C. A.; DE OLIVEIRA, A. F.; PACHECO, A. A.; LOPES, R. P.; NEVES, A. A.; QUEIROZ, M. E. L. R. Characterization and evaluation of sorption potential of the iron mine waste after Samarco dam disaster in Doce River basin–Brazil. **Chemosphere**, v. 209, p. 411-420, 2018.
3. ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidroweb - SNIRH**: Sistemas de informações hidrológicas, Série Histórica de Estações, [S.l], 2020. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf>. Acesso em 05 de março de 2021.
4. ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidroweb - SNIRH**: Sistemas de informações hidrológicas, *Mapa*, . [S.l], 2015. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>>. Acesso em 12 de julho de 2021.
5. ÁVILA, B.T.; MENDES, L. C. FELIPPE, M. F.; SILVA, M. B. Transformações na morfologia fluvial decorrentes do rompimento da Barragem de Fundão: estudos preliminares. In: PEREZ FILHO, A.; AMORIN, R. R. (org). Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento. Ebook do **XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**. Campinas, p. 3941-3952, 2017.
6. AZAM, S.; LI, Q. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. **Waste Geotechnical News**, v. 28, n. 4, p. 50-53, 2010.
7. BARROS, L. F. P.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Quaternary alluvial sedimentation in the Conceição river valley, southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, n. 3, p. 535-554, 2013. Disponível em: <<http://sbg.sitepessoal.com/bjg/memoria/indexOld.html>>. Acesso em 23/07/2021.
8. BARROS, L. F. P.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. O papel da bacia do rio Doce na configuração geomorfológica do Quadrilátero Ferrífero/MG. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 37, n. 1, p. 145-167, 2019.
9. BARROS, L. F. P.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Late quaternary landscape evolution in the Atlantic Plateau (Brazilian highlands): Tectonic and climatic implications of fluvial archives. **Earth-Science Reviews**, Elsevier, 207, 103228, 2020.
10. CARVALHO, R. P. B.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; BARROS, L. F. P. Implicações hidrogeomorfológicas do rompimento da barragem de rejeito da Mina do Córrego do Feijão – MG. **Caderno de Geografia**, v. 31, n. 65, p. 518-545, 2021.
11. CBH-DOCE - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (2019). **A Bacia**. [S.l]. Disponível em: <<http://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>>. Acesso em 10 de março de 2019.
12. CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 13 ed. São Paulo: E. Blucher, 2011. 188 p.
13. COTA, G. E. M.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; BARROS, L. F. P. Processos de Encouraçamento de Leitões Fluviais: sistematização de bases teóricas e estudo de caso na Serra do Espinhaço Meridional (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 4, p. 777-791, 2018.



14. CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **GeoSGB: Geodiversidades do Brasil**, [S.l.], escala 1: 2.500.000, 2007. Disponível em <<https://geosgb.cprm.gov.br/>> . Acesso em 12 de julho de 2021.
15. CPRM/ANA. **Monitoramento especial da bacia do Rio Doce**. Relatório 1-Acompanhamento da onda de cheia. CPRM, Belo Horizonte- MG, dezembro. 2015a. Disponível em <www.cprm.org.br> . Acesso em 12/07/2021.
16. CPRM/ANA. **Monitoramento especial da bacia do Rio Doce**. Relatório 2-Geoquímica. CPRM, Belo Horizonte-MG, Dezembro, 2015b. Disponível em <www.cprm.org.br> . Acesso em 12/07/2021.
17. DA CUNHA RICHARD, Eduardo et al. Influence of Fundão tailings dam breach on water quality in the Doce River Watershed. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 16, n. 5, p. 583-595, 2020.
18. DEY, S. *Fluvial Hydrodynamics: Hydrodynamic and sediment transport phenomena*. Geo-Planet: Earth and Planetary Sciences, Springer, book 3, 2014. 687 p.
19. DINGMAN, L. **Fluvial hydraulics**. Oxford University Press, 2009. 559 p.
20. DODOV, B.; FOUFOULA-GEORGIU, E. Generalized hydraulic geometry: Insights based on fluvial instability analysis and a physical model. *Water Resources Research*, **AGU - Advancing Earth and Space Science**, 40 (12), p. W-12201, 2004.
21. DORR, J. V. N. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. United States Geological Survey. 1969, 110 pp. (Professional Paper 641A).
22. ESTIGONI, M. V., NELSON, A. D., DUFFICY, A., TORREALBA, S. F., & DE LIMA, G. (2020). Sediment Transport Assessment for Rio Gualaxo Do Norte After the Fundão Dam Failure. **Integrated Environmental Assessment and Management**, 16(5), 572-582.
23. FELIPPE, M. F.; COSTA, A.; JÚNIOR, R. F.; MATOS, R. E. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Acabou-se o que era Doce: notas geográficas sobre a construção de um desastre ambiental. In: MILANEZ, B.; LOSEKANN, C. **Desastre no Vale do Rio Doce: antecedentes, impactos e ações sobre a destruição**. Rio de Janeiro: Folio Digital: Letra e Imagem, 2016.
24. FERNANDES, G. W., GOULART, F. F., RANIERI, B. D., COELHO, M. S., DALES, K., BOESCHE, N., ... & SOARES-FILHO, B. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza & Conservação**, v. 14, n. 2, p. 35-45, 2016.
25. FIGUEIREDO FILHO, W. F. A.; OLIVEIRA, F. S.; BARROS, L. F. P.; MACHADO, H. A.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. O papel da dinâmica do relevo na evolução de couraças no vale do Rio Conceição, Quadrilátero Ferrífero – MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 1, p. 201-216, 2019.
26. GRAF, W. H. **Fluvial Hydraulics: Flow and Transport Processes in Channels of Simple Geometry**. John Wiley & Sons, 1998. 692 p.
27. GREGORY, K. J. The human role in changing river channels. **Geomorphology**, Elsevier, 79, 172–191, 2006.
28. GRISON, F.; KOBAYAMA, M. Teoria e Aplicação da Geometria Hidráulica: Revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 2, p. 25-38, 2011.



29. HOOKE, R. L. On the history of humans as geomorphic agents. **Geology**, 28: 843–846, 2000.
30. IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE. Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. 2015.
31. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal de mapas do IBGE**: Divisão Territorial, Minas Gerais - Unidades da Federação, escala 1:250.000, [S.I.], 2014. Disponível em <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>>. Acesso em 02 de agosto de 2021.
32. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal de mapas do IBGE**: Informações Ambientais, Unidades de Relevo do Brasil, escala de 1:5.000.000, [S.I.], 2021. Disponível em <<https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>>. Acesso em 21 de julho de 2021.
33. LANA, C. E.; CASTRO, P. T. A. Variabilidade morfológica em níveis de base do rio Maracujá (Quadrilátero Ferrífero MG): influências litológicas, estruturais e de reativações cenozóicas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. 11, 21–30, 2010.
34. LANGBEIN, W. B.; LEOPOLD, L. B. Quasi-equilibrium states in channel morphology. **American Journal of Science**, 262 (6), p. 782-794; 1964.
35. LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. **Fluvial Processes in Geomorphology**. Freeman, San Francisco, 1964.
36. LEOPOLD, L. B.; MADDOCK, T. **The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications**. US Government Printing Office, Washington, DC, 1953.
37. MACEDO, D. R.; HUGHES, R. M.; KAUFMANN, P. R.; CALLISTO, M. Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. **Science of The Total Environment**. 635, 1267–1279, 2018.
38. MACEDO, D. R.; LOPES, F. W. A.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; BARROS, L. F. P. Noções de hidráulica e hidrometria fluvial. In **Hidrogeomorfologia - formas, processos e registros sedimentares fluviais**. Bertrand Brasil, p. 79-102, 2020.
39. MACEDO, D. R.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Restauração e reabilitação de cursos d'água. In **Hidrogeomorfologia - formas, processos e registros sedimentares fluviais**. Bertrand Brasil, p. 353-380, 2020.
40. MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; BARROS, L. **Hidrogeomorfologia - formas, processos e registros sedimentares fluviais**. Bertrand Brasil, 2020. 417 p.
41. MAGALHÃES JÚNIOR, A. P.; BARROS, L. F. P.; COTA, G. E. M. Morfodinâmica fluvial. In *Hidrogeomorfologia - formas, processos e registros sedimentares fluviais*. Bertrand Brasil, p. 121-162, 2020.
42. MAGALHÃES JR., A. P.; SAADI, A. Ritmos da dinâmica fluvial Neo-Cenozóica controlados por soerguimento regional e falhamento: o vale do rio das Velhas na Região de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. **Geonomos**. 2(1), 42–54, 1994.
43. MARSHALL, J. Rompimentos de barragens de rejeitos no Brasil e no Canadá: uma análise do comportamento corporativo. **Caderno Eletrônico de Ciências Sociais**, v. 5, n.1, p. 27-46, 2017.



44. MAXWELL, C. H. Geology and ore deposits of the Alegria district, Minas Gerais, Brazil. Washington/US, **Geol. Survey Prof. Paper.** 72p. 341J, 1972.
45. MENDES, L. C. **Alterações Geomorfológicas e Danos aos Produtores Rurais Atingidos pelo Rompimento da Barragem de Fundão na Bacia do Rio do Carmo - MG.** Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Juiz de Fora, 2018.
46. MENDES, L. C.; FELIPPE, M. F. Alterações geomorfológicas de fundo de vale na bacia do Rio do Carmo (MG) decorrentes do rompimento da Barragem de Fundão. **Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 69, p. 237–252-237–252, 2019.
47. MILANEZ, B.; LOSEKANN, C. (org.). **Desastre no Vale do Rio Doce: antecedentes, impactos e ações sobre a destruição.** Rio de Janeiro: Folio Digital: Letra e Imagem, 2016. p. 125-159.
48. PELOGGIA, A. U. G. A ação do homem enquanto ponto fundamental da geologia do Tecnógeno: proposição teórica básica e discussão acerca do caso do município de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 257-268, set. 1997.
49. REIS, M. O.; MOURA, A. C. M. B.; COTA, G. E. M.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Panorama dos rompimentos de barragens de rejeitos de minério no mundo. **Caderno de Geografia**, v.30, n.61, p. 368-390, 2020.
50. RÓZSA, P. Nature and Extent of Human Geomorphological Impact – A Review. **Anthropogenic Geomorphology**, Springer, pp 273-291, 2010.
51. RUCHKYS, U. A.; AMORIM, P. T.; MIRANDA, M. P. S.. **Mineração em Geossistemas Ferruginosos e Questões de Geoética: o Caso do Rompimento da Barragem de Córrego do Feijão, Minas Gerais, Brasil.** CONFINS (PARIS), v. 40, p. 1, 2019.
52. SALGADO, A. A. R.; SILVA, J. R. Mapeamento das unidades de relevo da região da Serra do Gandarela - Quadrilátero Ferrífero-/MG. **Geografias**, Belo Horizonte, v. 5, n.2, p. 107 – 125, 2009.
53. SALGADO, A. A. R.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, C. A. C.; COLIN, F.; VARAJÃO, A. F. D.; NALINI JUNIOR, H. A. Relief evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil) by means of (¹⁰Be) cosmogenic nuclei. **Zeitschrift für Geomorphologie**. 52, 317-323, 2008.
54. SANTANA, F. C., FRANCELINO, M. R., SCHAEFER, C. E., VELOSO, G. V., FERNANDES-FILHO, E. I., DE JP SANTANA, A., ... & ROSA, A. P.. Water quality of the Gualaxo do Norte and Carmo rivers after the Fundão dam collapse, Mariana, MG. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 232, n. 4, p. 1-13, 2021.
55. SCHUMM, S.A. **A tentative classification of alluvial river channels**". United States Geological Survey Circular 477, Washington, DC, 1963.
56. SCHUMM, S. A. **The Fluvial System.** New York: John Wiley and Sons, 1977.
57. SCHUMM, S. **River Variability and Complexity.** Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 236 p.
58. SEDRU - SECRETARIA DE ESTADO DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL, POLÍTICA URBANA E GESTÃO METROPOLITANA (2016). **Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG.** Governo do Estado Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.



59. STEFFEN, W.; BROADGATE, W.; DEUTSH, L. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. **Anthropocene Review**, 2(1): 81–98, 2015.
60. STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. (2017). **Geomorfologia Fluvial**. Oficina de Textos, São Paulo.
61. SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. (1990). **Ambientes fluviais**. Ed. UFSC, Florianópolis, 183 p, 2ª ed.
62. VARAJÃO, C. A. A questão da ocorrência das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**. 21, 131–145, 1991.
63. VERVLOET, R. J. H. M. A geomorfologia da região do rompimento da barragem da Samarco: a originalidade da paisagem à paisagem da mineração. In: MILANEZ, B.; LOSEKANN, C. (org.). **Desastre no Vale do Rio Doce: antecedentes, impactos e ações sobre a destruição**. Rio de Janeiro: Folio Digital: Letra e Imagem, 2016. p. 91-121.

