

PADRÕES DE LINEAMENTOS E SUA RELAÇÃO COM A MORFOLOGIA FLUVIAL DO RIO DOCE (MG) E SEUS AFLUENTES

LINEAMENT PATTERNS AND THEIR RELATIONSHIP WITH FLUVIAL MORPHOLOGY OF DOCE RIVER (MG) AND ITS AFLUENTS

Juni CORDEIRO¹, Paulo Roberto Antunes ARANHA², Ricardo Diniz da COSTA², Priscilla Macedo MOURA³, Márcio Benedito BAPTISTA⁴

¹Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte (MG). E-mail: juni.scordeiro@gmail.com

²Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. Avenida Antônio Carlos, 6.627. Pampulha, Belo Horizonte – MG. E-mail: aranha@geol.igc.ufmg.br; biduufmg@gmail.com

³Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Avenida Antônio Carlos, 6.627. Pampulha, Belo Horizonte – MG. E-mail: priscilla.moura@ehr.ufmg.br

⁴Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte (MG). *In memoriam*

Introdução
Caracterização geológica da área
Materiais e métodos
Resultados e discussão
 Geologia local
Considerações finais
Referências

RESUMO - O rompimento da Barragem de Fundão (Mariana/MG) resultou no aporte significativo de sedimentos nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, alterando seus processos hidrogeomorfológicos. Assim, a caracterização geomorfológica e geológica-estrutural deste sistema fluvial mostra-se relevante para o prognóstico de um novo equilíbrio geomorfológico. Desse modo, objetivou-se analisar a orientação e distribuição de lineamentos associados às morfologias dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce e sua correlação com as atitudes de estruturas obtidas nos litotipos aflorantes. Para isso, foram utilizadas imagens de satélites anteriores ao rompimento para a caracterização dos padrões fluviais e identificação de lineamentos diversos. Notou-se que o sistema fluvial possuía características meandantes, com tendência de evolução para um padrão entrelaçado. Com relação à sinuosidade, o sistema fluvial era sinuoso (54 a 73% da extensão), contendo segmentos meandantes. Quanto à orientação dos lineamentos diversos e dos segmentos fluviais observou-se correspondência entre as direções N50°-59°W e N60°-69°W e os planos de fratura, e entre a direção N20°-29°W e os planos de foliação. Essa correspondência sugere um controle tectônico da morfologia fluvial, responsável pela direção principal dos canais e das áreas de deposição de sedimentos, os quais devem ser considerados nas ações implementadas visando a restauração do sistema fluvial.

Palavras-chave: Barragem de Fundão. Geomorfologia. Neotectônica. Padrão fluvial. Recuperação de áreas degradadas.

ABSTRACT - The rupture of the Fundão Dam (Mariana/MG) resulted in a significant inflow of sediments in the Gualaxo do Norte, Carmo and Doce rivers, altering their hydrogeomorphological processes. Thus, the geomorphological and geological-structural characterization of this fluvial system is relevant for the prognosis of their new geomorphological equilibrium. The objective of the present work was to analyze the orientation and distribution of lineaments associated with the morphologies of the Gualaxo do Norte, Carmo and Doce rivers and their correlation with the structural attitudes of the outcropping lithotypes. For that, satellite images prior to the rupture were used to characterize the river patterns and identify different lineaments. It was noted that the river system had meandering characteristics, with a tendency to evolve towards an interlaced pattern. Regarding sinuosity, the fluvial system is sinuous (54 to 73% of the extension), containing meandering segments. As for the orientation of the different lineaments and fluvial segments, a correspondence was observed between the strike N50°-59°W and N60°-69°W and the fracture planes, and between the strike N20°-29°W and the planes of foliation. This correspondence suggests a tectonic control of the fluvial morphology, responsible for the main strike of the channels and the sediment deposition areas, which must be considered when implementing actions aiming the restoration of the fluvial system.

Keywords: Fundão Dam. Geomorphology. Neotectonics. Fluvial pattern. Restoring degraded areas.

INTRODUÇÃO

Os lineamentos correspondem a feições mapeáveis retilíneas ou levemente curvas na superfície terrestre, distintas do padrão de características adjacentes, que, presumivelmente, refletem algum fenômeno em subsuperfície (O'Leary et al., 1976). Dentre as estruturas relacionadas aos lineamentos podem ser

destacadas as falhas e fraturas caracterizadas por deslocamentos, rupturas e características geomorfológicas lineares (Vassilas et al., 2002; Han et al., 2018).

Quando considerada a geomorfologia, a caracterização dos lineamentos, assim como a observação sistemática e análise de dados de

sensoriamento remoto, contribui para a identificação e delineamento rápido do relevo, características estruturais e do padrão de drenagem (Bhatt et al., 2007). Tais aspectos mostram-se relevantes, uma vez que a geomorfologia pode contribuir de forma significativa para o diagnóstico de uma área degradada e estabelecimento de metodologia para sua recuperação efetiva e duradoura, ao examinar as formas de relevo; sua origem e evolução, tanto no tempo quanto no espaço; os processos relacionados e os materiais constituintes envolvidos (Guerra & Marçal, 2015).

Em novembro de 2015 ocorreu o desastre ambiental decorrente do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, localizada em Mariana (MG). Como consequência, a liberação abrupta de cerca de 34 milhões de metros cúbicos (Mm^3) de rejeitos (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, 2015) causou um aumento substancial nas cargas suspensas de sedimentos (até 33.000 mg L^{-1}), além de grandes depósitos de resíduos ao longo da

Bacia Hidrográfica do Doce (Hatje et al., 2017), impactando o sistema fluvial a jusante e alcançando o Oceano Atlântico. Estima-se que 20 Mm^3 de rejeitos foram depositados no fundo e junto às margens dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, compondo um segmento com 119,2 km de extensão entre a Barragem de Fundão e o reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Candonga (Santos et al., 2019).

Uma vez que os sedimentos provenientes da ruptura da Barragem de Fundão encontraram condições diferenciadas, a caracterização geomorfológica e geológica-estrutural deste sistema fluvial mostra-se fundamental para a compreensão da dinâmica referente ao fenômeno e o prognóstico acerca do estabelecimento de um novo equilíbrio geomorfológico. Dessa forma, esta pesquisa visa analisar os padrões de orientação, comprimento e distribuição de lineamentos associados à morfologia dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, contribuindo para a compreensão do condicionamento morfotectônico desse sistema fluvial.

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA ÁREA

No trecho em estudo, entre a Barragem do Fundão e a UHE Candonga (Figura 1), afloram rochas granulíticas de composição enderbítica a granítica associadas ao Complexo Acaiaca (Arqueano a Paleoproterozoico); ortognaisses bandados do tipo TTG, relacionados aos complexos Santa Bárbara (Arqueano) e Mantiqueira (Paleoproterozoico); metassedimentos e rochas metaultramáficas/metamáficas pertencentes ao Supergrupos Rio das Velhas (Arqueano); xistos e filitos associados ao Supergrupo Minas (Paleoproterozoico); ortogneisse sienítico alcalino pertencente à Suíte Alcalina da Mantiqueira (Paleoproterozoico), além de xistos aluminosos e rochas metaultramáficas, de idade neoproterozoica, correlacionadas ao Grupo Dom Silvério (Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2014).

O Complexo Acaiaca (Jordt-Evangelista, 1985; Medeiros Júnior, 2009; Medeiros Júnior & Jordt-Evangelista, 2010) é composto, predominantemente, por granulitos félsicos, máficos e ultramáficos, além de granulitos aluminosos. De acordo com Medeiros Júnior & Jordt-Evangelista (2010), os granulitos exibem, comumente, uma foliação milonítica com direção NNE-SSW e mergulhos que variam de 35° para ESE até

subverticalizados.

Os litotipos que compõem o Complexo Santa Bárbara são representados por gnaisses tonalíticos a trondhjemiticos, metagranitos, metadioritos e anfibolitos.

Os metagranitos ocorrem frequentemente como injeções nos gnaisses tonalíticos-trondhjemiticos, enquanto as rochas máficas se apresentam como relictos ou xenólitos nas rochas gnáissicas (Baltazar & Raposo, 1993).

O Complexo Mantiqueira (Brandalise, 1991) é constituído por ortognaisses de composição granítica a tonalítica, contendo intercalações de anfibolitos e pequenos corpos de rochas granulíticas. O bandamento/foliação observado nos gnaisses é tipicamente de baixo ângulo com direção N-S e NNE-SSW (Noce et al., 2007). Idades U-Pb da cristalização magmática dos gnaisses pertencentes ao Complexo Mantiqueira obtidas por Silva et al. (2002) e Noce et al. (2007) variaram entre 2.180 e 2.041 Ma.

O Supergrupo Rio das Velhas corresponde a uma sequência do tipo *greenstone belt*, subdividido nos grupos Grupo Nova Lima, na base, e Grupo Maquiné, no topo (Dorr, 1969; Gair, 1962). Esta sequência é recoberta pelo

Supergrupo Minas, subdividido, da base para o topo, nos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira, Piracicaba, Sabará e Itacolomi (Dorr, 1969). Datação U-Pb em zircões detríticos indicam idade máxima de 2,6 Ga para a deposição dos sedimentos que formam os quartzitos do Grupo Caraça (Machado et al., 1996; Hartmann et al., 2006).

O Grupo Dom Silvério é constituído por xistos

de origem pelítica, quartzitos, mármore, gondito/queluzito, rochas calciossilicáticas, metamáficas e metaultramáficas (Jordt-Evangelista, 1992). Idades Sm-Nd obtidas por Brueckner et al. (2000) em granada xistos na região de Ponte Nova indicam metamorfismo no Brasiliano (idade granada – rocha total correspondendo a 570 Ma), além de protólito associado aos terrenos paleoproterozoicos.

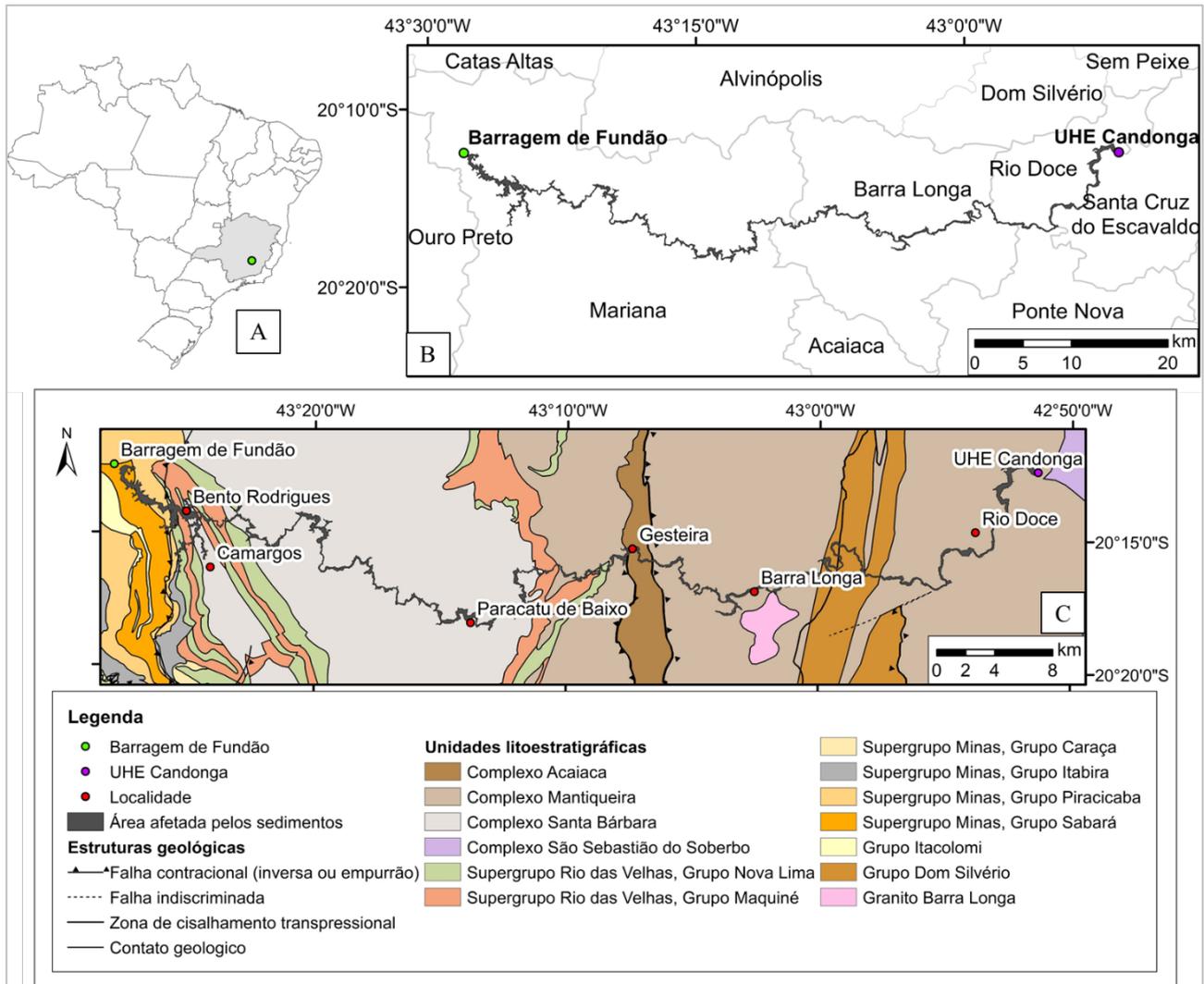


Figura 1 - A e B) Localização da Barragem de Fundão e do sistema fluvial analisado nessa pesquisa; (C) Unidades litoestratigráficas aflorantes entre a Barragem de Fundão e a UHE Candonga. Fonte: A e B) Modificado de IBGE (2010); C) Modificado de CPRM, 2014.

Baltazar & Raposo (1993) agruparam sob a denominação “Rochas Granitoides” corpos de rochas com composição variada, incluindo granitos alcalinos a tonalitos, resultantes de processos magmáticos/metassomáticos e anatéticos. Dentre esses corpos, destaca-se o Granito Barra Longa, predominantemente quartzo-feldspático, exibindo granulação grossa e foliação milonítica variando de incipiente a bem desenvolvida.

Com relação à geomorfologia, considerando as

diferenças altimétricas e critérios litoestruturais, podem ser individualizadas na porção mineira da Bacia Hidrográfica do Rio Doce quatro unidades geomorfológicas, representadas pela Serra do Espinhaço, Quadrilátero Ferrífero, Planaltos Dissecados do Centro-Sul e do Leste de Minas e Depressão do Rio Doce.

A área delimitada nesta pesquisa é caracterizada pelas unidades correspondentes ao Quadrilátero Ferrífero e aos Planaltos Dissecados do Centro Sul e Leste de Minas. O

Quadrilátero Ferrífero, situado na porção oeste da área, exibe altitudes médias entre 1.400 e 1.600 m, com ponto culminante na Serra do Caraça (2.064 m), sendo caracterizado por marcante controle estrutural. Já os Planaltos Dissecados do Centro Sul e Leste de Minas

compõem a maior parte da área, representando um domínio morfoestrutural com afloramentos de rochas cristalinas deformadas, submetidos a sucessivos estágios erosivos que resultaram em pacotes de alteração intempérica evoluídos (Souza et al., 2005).

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa, a análise da morfologia fluvial enfatiza o segmento compreendido entre a Barragem de Fundão e a UHE Candonga, com extensão de cerca de 119 km, onde ficou retida grande parte do rejeito e dos materiais movimentados pelo evento de ruptura (Santos et al., 2019). Para a caracterização dos padrões fluviais foram utilizadas imagens de satélites disponíveis no *software* Google Earth Pro anteriores ao evento, obtidas no mês de junho de 2015, com resolução espacial de 8 m.

A sinuosidade do sistema fluvial formado pelo Córrego Santarém e rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce foi analisada por meio da extensão Stream Gradient & Sinuosity para ArcGIS (Dilts & Yang, 2015). Para esta análise, o sistema fluvial foi subdividido em segmentos com extensões de 200 m, 300 m, 500 m, 1.000 m, 2.000 m e 5.000 m, selecionados por conveniência, considerando o seu comprimento total (cerca de 119 km) e a largura média dos canais, que variava entre aproximadamente 2 m no Córrego Santarém a aproximadamente 550 m no Rio Doce, nas proximidades da UHE Candonga.

Visando correlacionar o padrão fluvial à estruturação geológica local foram traçados lineamentos diversos, relacionados à topografia local (topos de morro e vales), definidos de forma visual, utilizando o *software* ArcGIS versão 10.5 e as imagens de satélite na escala 1: 50.000. A análise desses lineamentos buscou a (i) determinação da direção principal; (ii)

determinação do comprimento médio; (iii) a representação em diagrama de rosetas; (iv) comparação com as estruturas geológicas obtidas em campo. Os itens (i) e (ii) foram obtidos com a utilização da extensão AzimuthFinder para ArcGIS (Queiroz et al., 2014).

Destaca-se que o comprimento médio está associado ao peso de cada lineamento, definido pelo número de vezes em que o comprimento do lineamento é maior que o menor valor observado (peso igual a 1). Os lineamentos com pesos maiores do que 1 são copiados um número de vezes igual ao seu peso, enfatizando assim as direções dos lineamentos de maior peso (Queiroz et al., 2014). Os diagramas de rosetas foram construídos utilizando o *software* Stereo32 (Roller & Trepmann, 2003). Simplificadamente, um diagrama de rosetas corresponde a um círculo principal dividido em setores, nos quais o número de medidas é representado pelo comprimento das pétalas (Fossen, 2012).

Para a caracterização estrutural da área em questão foram realizados levantamentos de campo entre os meses de outubro de 2017 e abril de 2019 e observadas a tipologia e as relações geométricas entre os planos de fratura, foliação, lineações de estiramento mineral e eixos de dobras nos diferentes litotipos identificados. As informações assim obtidas foram representadas em diagramas de pontos polares e contorno, também utilizando o *software* Stereo32.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tipos de canais fluviais relacionam-se às formas de padronização do arranjo espacial que o leito exibe ao longo do rio (Christofolletti, 1981). Essas formas, definidas como a configuração de um rio em planta, fornecem um resumo das características do canal, sendo que, normalmente, os padrões de fluxo e a natureza/distribuição de processos físicos nos diferentes tipos de canais são os principais determinantes do formato destes (Brierley & Fryirs, 2005).

A análise das imagens de satélites anteriores ao colapso da Barragem de Fundão permitiu constatar que, morfologicamente, o trecho fluvial possuía características meandantes, com tendência de evolução natural para uma geometria entrelaçada, evidenciada pela presença frequente de barras de sedimentos com dimensões variadas (Figura 2), comumente dos tipos central e lateral de soldadura. Essas barras de sedimentos, observadas a partir de Bento Rodrigues, tornam-se mais frequentes a jusante

do município de Barra Longa.

Há diversas classificações propostas para as barras, que se baseiam, dentre outros aspectos, na sua morfologia externa, tamanho, estabilidade da

sua forma, modo de ocorrência (isoladas ou em grupo), tipo de padrão de canal e em sua posição no canal (Santos et al., 1992; Stevaux & Latrubesse, 2017).

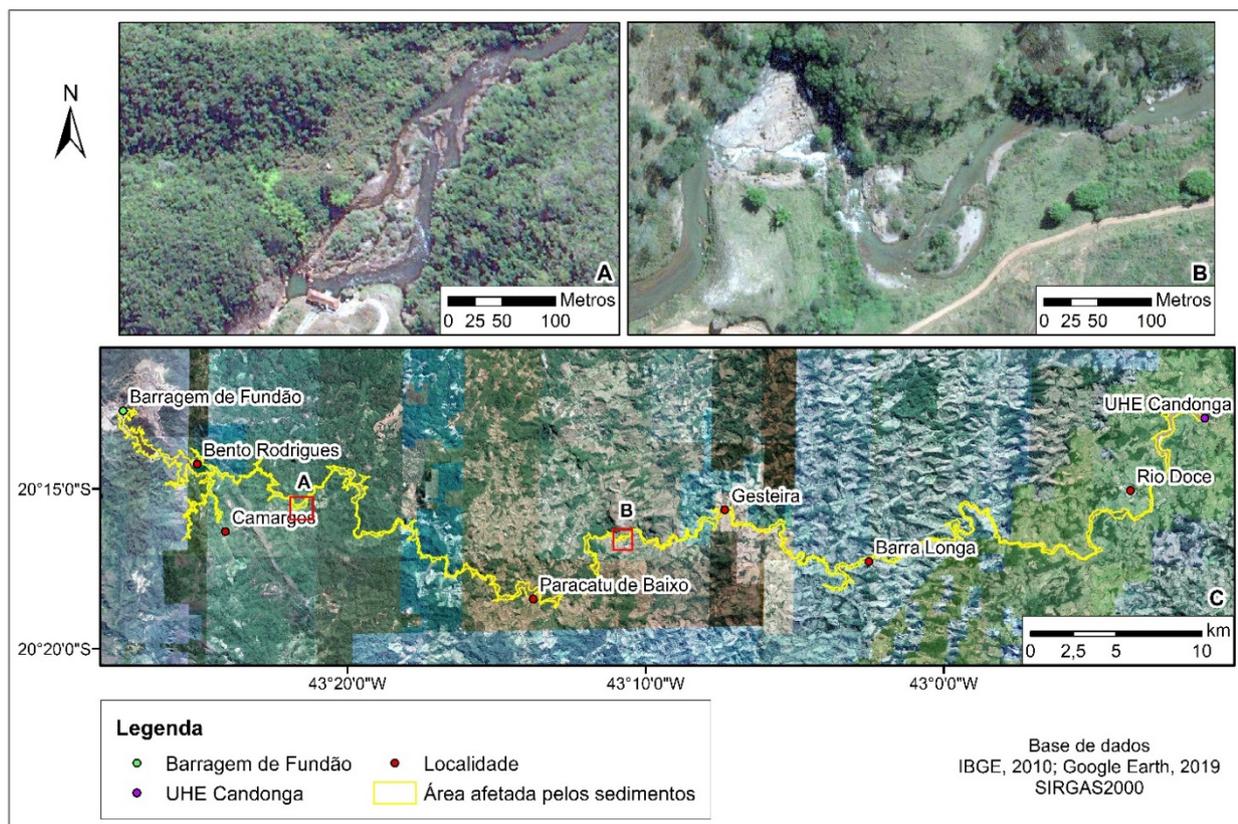


Figura 2 - A) Barras arenosas a jusante da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) de Bicas; B) Barras arenosas em segmento fluvial entre Paracatu de Baixo e Gesteira - imagens de satélite obtidas dia 10 de agosto de 2014; C) Localização das áreas analisadas. Fonte: Modificado de Google Earth (2019).

Uma classificação simplificada proposta por Santos et al. (1992) para o Rio Paraná compreende: i) barra central (ocorre na porção central do canal, isolada); ii) lateral (subdividida nos tipos alternada – formada em canais retilíneos; de enchente – observada em rios encaixados durante a cheia; de soldadura – presente em áreas de menor velocidade de fluxo, tende a se unir diretamente à margem); iii) de desembocadura (subdividida em barra de foz de distributário – o material é depositado quando ocorre a redução da velocidade de fluxo pela sua entrada em um corpo de água lântico; e barra de confluência – formada pela integração do fluxo de água de um tributário ao fluxo de água de um rio principal) e iv) de pontal (desenvolvida na margem convexa do canal em um meandro).

Além disso, no trecho compreendido entre os municípios de Barra Longa e Rio Doce são frequentes cristas rochosas no canal, formando pequenas corredeiras (Figura 3). Simplificadamente, as corredeiras podem ser originadas pela existência de pontos com aumento abrupto do gradiente (*knickpoints*), comumente associados à

um controle estrutural (tais como existência de falhas e deformações) ou litológico, neste último caso associado à uma erosão diferencial entre dois litotipos (Stevaux & Latrubesse, 2017).

Com relação à classificação de acordo com a sinuosidade, usualmente, canais com valores menores que 1,1 são descritos como retos, aqueles entre 1,1 e 1,5 são sinuosos, enquanto aqueles que apresentam uma sinuosidade maior que 1,5 são denominados meandantes (Charlton, 2008). A tabela 1 exibe a classificação de acordo com a divisão do sistema fluvial estudado em segmentos de 200 m, 300 m, 500 m, 1.000 m, 2.000 m e 5.000 m.

De acordo com esta classificação, nota-se que quando considerados os segmentos com pequena extensão (200 e 300 m) o sistema fluvial pode ser classificado como retilíneo. Já a divisão em segmentos de 500 m, 1.000 m e 2.000 m indicam que o sistema fluvial analisado era predominantemente sinuoso (54 a 73%), contendo trechos meandantes em 8 a 40% da sua extensão (Figura 4A).

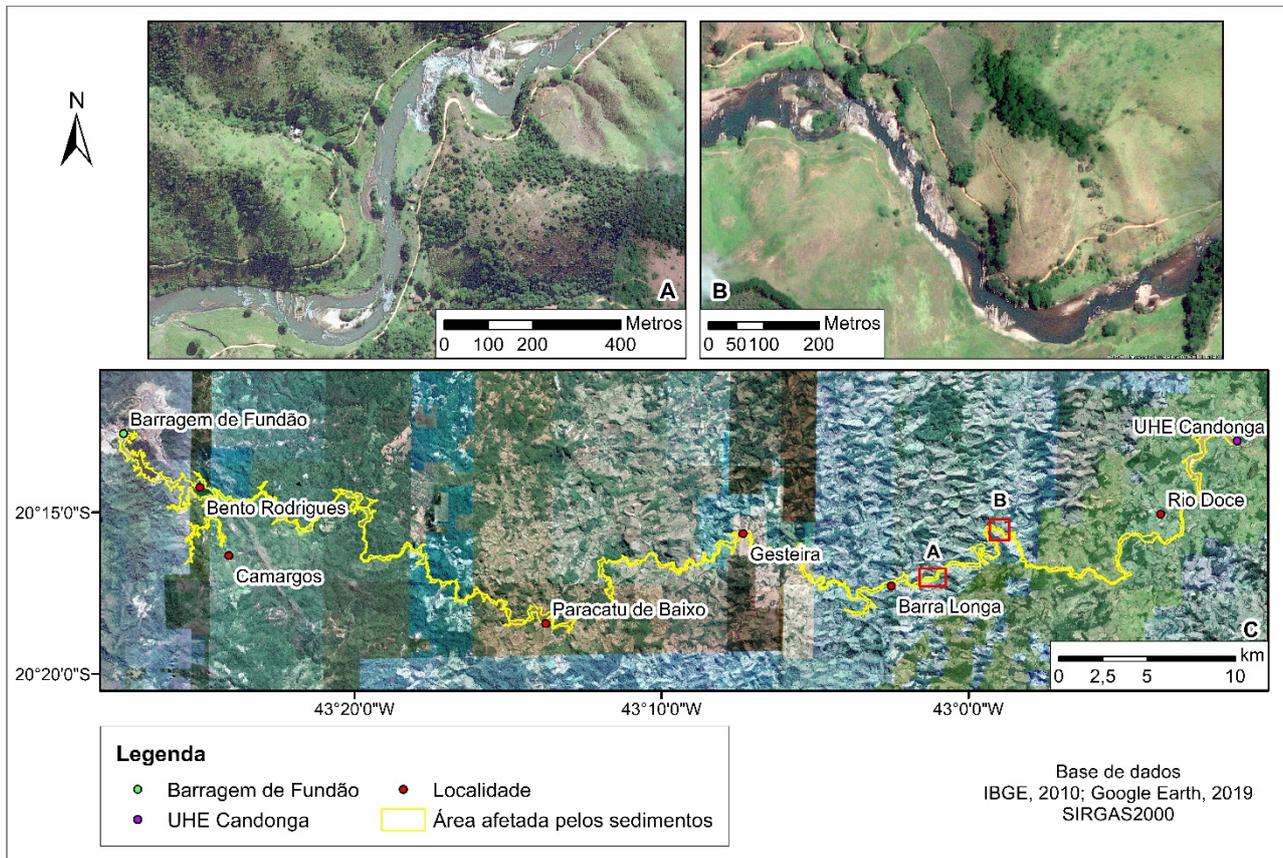


Figura 3 - A e B) Cristas rochosas no leito do Rio Doce, entre os municípios de Barra Longa e Rio Doce, imagens de satélite obtidas dia 10 de agosto de 2014; C) Localização das áreas analisadas. Fonte: Modificado de Google Earth (2019).

Tabela 1 - Classificação do sistema fluvial estudado de acordo com a sinuosidade dos segmentos.

Classificação de acordo com a sinuosidade	Porcentagem de acordo com a extensão dos segmentos (%)					
	200 m	300 m	500 m	1.000 m	2.000 m	5.000 m
retos (< 1,1)	75	63	38	10	-	-
sinuosos (1,1 - 1,5)	24	34	54	73	60	28
meandrantés (> 1,5)	1	3	8	17	40	72

De modo geral essa variação está associada à morfometria frequentemente irregular dos meandros, que apresentam diferentes formas e tamanhos. Assim, segmentos com pequena extensão, ao promoverem a divisão da curva de um meandro, fazem com que o comprimento do vale se aproxime do comprimento do canal, reduzindo a sua sinuosidade.

Observa-se a ausência de trechos com sinuosidade inferior a 1,1 quando considerados os segmentos com 2.000 e 5.000 m de extensão. Entretanto, nas imagens de satélite analisadas é possível identificar um segmento fluvial com características retilíneas (baixa sinuosidade – 1,01) e extensão de cerca de 0,9 km, situado 4,5 km a jusante de Bento Rodrigues (Figura 4B). Ressalta-se que nesse segmento a análise das imagens de satélite indica que a largura do canal variava, aproximadamente, de 8 a 30 m.

Os canais retilíneos podem ser associados à um controle de linhas tectônicas, tais como linhas de falha ou fraturas, situados em planícies de restingas, planícies deltaicas ou ainda controlados por cordões arenosos (Guerra & Cunha, 2015). Dessa forma, comumente, a extensão dos trechos retilíneos não ultrapassa dez vezes a largura do canal (Leopold et al., 1964).

Outro parâmetro alternativo aplicado às características dos canais e utilizado em estudos estatísticos de meandros naturais e simulados consiste na variação da direção dos lineamentos (Speight, 1965; Thakur & Scheidegger, 1970; Ferguson, 1977). Um canal reto tem direção constante, enquanto as curvas dos meandros podem ter direções diferentes daquela do eixo do vale, sendo que a variação de direção dos canais meandrantés tende a aumentar com a sinuosidade (Ferguson, 1977).

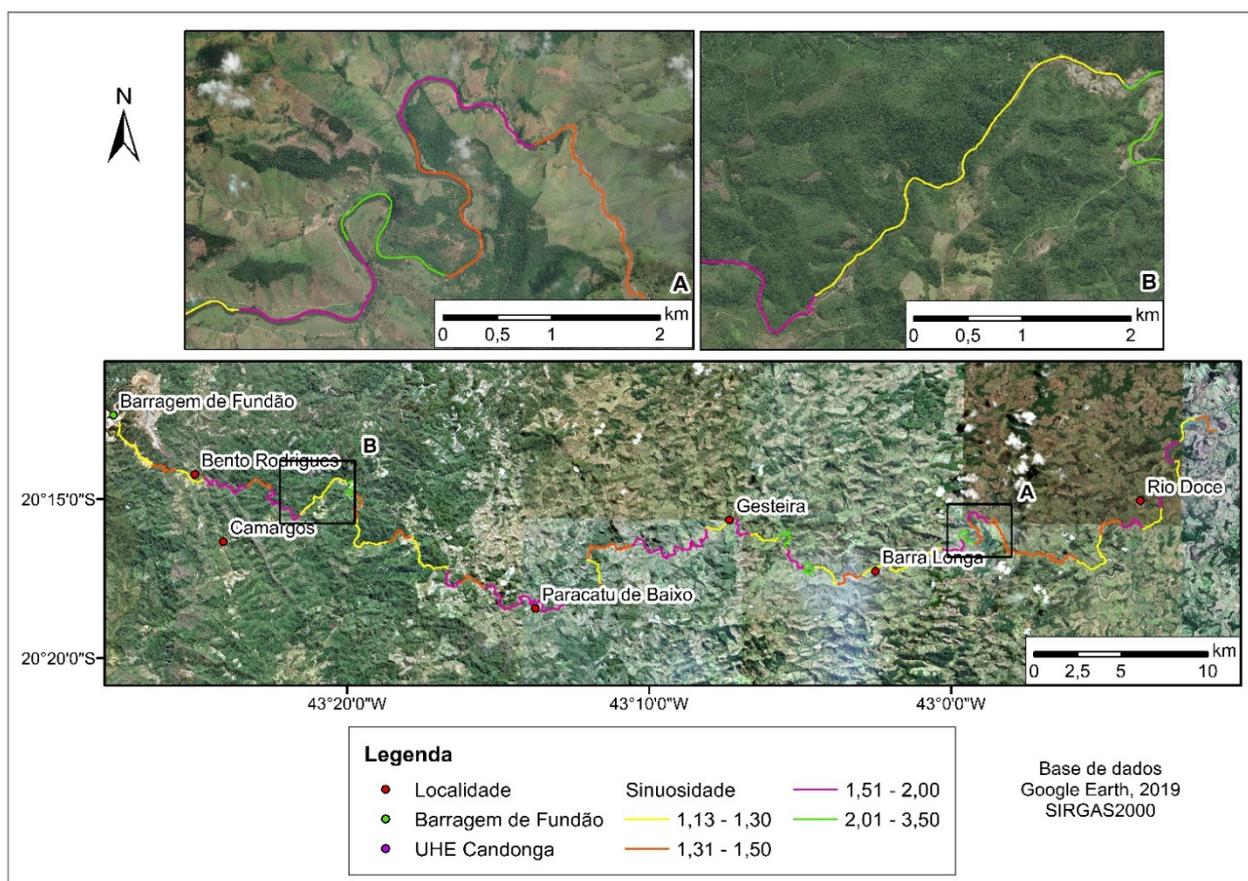


Figura 4 - Sinuosidade do sistema fluvial compreendido entre a Barragem de Fundão e a UHE Candonga considerando segmentos de 2.000 m: A) Segmento com características sinuosas e meandranças; B) Trecho com características retilíneas; C) Localização das áreas analisadas. Fonte: Modificado de Google Earth (2019).

Nota-se na Figura 5 que os lineamentos referentes aos segmentos com extensões de 200 m (A) e 300 m (B) não possuem uma direção principal relevante. Já os lineamentos associados aos segmentos de 500 m ($n = 246$) possuem um sutil predomínio da direção $N71^{\circ}-80^{\circ}E$, correspondendo a cerca de 9% dos lineamentos analisados (Figura 5C).

Os segmentos fluviais com extensão de 1.000 m ($n = 122$) exibem como orientação principal a direção $N61^{\circ}-70^{\circ}E$ (12% dos lineamentos), já 10% dos lineamentos possuem direção $N80^{\circ}-89^{\circ}W$; 9% correspondem à direção $N60^{\circ}-69^{\circ}W$; 7% apresentam direção $N50^{\circ}-59^{\circ}W$ e 6% possuem direção $N0^{\circ}-09^{\circ}W$ (Figura 5D).

Quando considerada a orientação dos segmentos fluviais com extensão de 2.000 m ($n = 62$) nota-se que 18% destes possuem direção $N70^{\circ}-79^{\circ}W$, 11% exibem direção $N80^{\circ}-89^{\circ}W$, enquanto 8% dos lineamentos correspondem às direções $N40^{\circ}-49^{\circ}W$, $N61^{\circ}-70^{\circ}E$ e $N71^{\circ}-80^{\circ}E$ (Figura 5E).

Já os segmentos fluviais com extensão de 5.000 m ($n = 25$) apresentam como direções principais $N71^{\circ}-80^{\circ}E$, $N60^{\circ}-69^{\circ}W$, $N70^{\circ}-79^{\circ}W$, cada uma correspondendo a 16% dos lineamentos, $N80^{\circ}-89^{\circ}W$, perfazendo 12% e

$N11^{\circ}-20^{\circ}E$, representando 8% dos lineamentos (Figura 5F).

A análise da direção dos lineamentos diversos ($n = 1.577$), que representam a topografia local, possibilita verificar que 22% destes apresentam direção $N80^{\circ}-89^{\circ}W$, enquanto as direções $N20^{\circ}-29^{\circ}W$; $N30^{\circ}-39^{\circ}W$; $N50^{\circ}-59^{\circ}W$; $N60^{\circ}-69^{\circ}W$; $N70^{\circ}-79^{\circ}W$; $N61^{\circ}-70^{\circ}E$; $N71^{\circ}-80^{\circ}E$ correspondem, cada uma, a 7% dos lineamentos (Figura 6A). Com relação ao comprimento médio dos lineamentos ($n = 11.482$), observa-se que 21% desses possuem direção $N80^{\circ}-89^{\circ}W$; 9% apresentam direção $N71^{\circ}-80^{\circ}E$; as direções $N60^{\circ}-69^{\circ}W$ e $N70^{\circ}-79^{\circ}W$ compõem, cada uma, 8% dos lineamentos; enquanto as direções $N20^{\circ}-29^{\circ}W$ e $N61^{\circ}-70^{\circ}E$ correspondem, cada uma, à 7% dos lineamentos (Figura 6B).

Uma comparação entre as direções dos lineamentos apresentadas nas figuras 5 e 6 permite constatar que as principais similitudes estão relacionadas às direções $N80^{\circ}-89^{\circ}W$ e $N71^{\circ}-80^{\circ}E$. Por outro lado, as direções $N11^{\circ}-20^{\circ}E$, $N09^{\circ}-10^{\circ}W$ e $N40^{\circ}-49^{\circ}W$, observadas na divisão dos segmentos fluviais (5.000 m, 1.000 m e 2.000 m, respectivamente), não possuem representatividade no conjunto de lineamentos diversos.

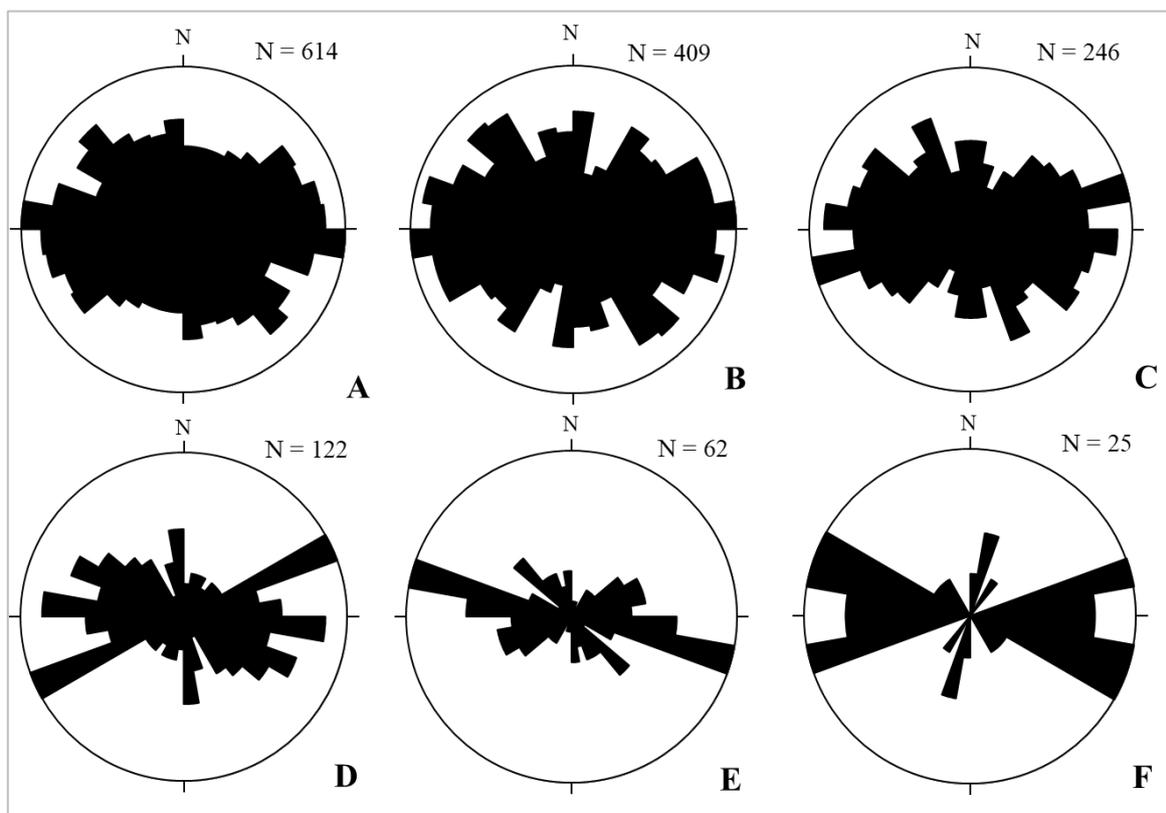


Figura 5 - Diagramas de roseta representando a direção principal dos segmentos fluviais com extensão de A) 200 m; B) 300 m; C) 500 m – maior pétala na direção N71°-80°E, correspondendo a 9% dos lineamentos; D) 1.000 m – maior pétala na direção N61°-70°E, correspondendo a 12% dos lineamentos; E) 2.000 m – maior pétala na direção N70°-79°W, correspondendo a 18% dos lineamentos; e F) 5.000 m – maiores pétalas nas direções N71°-80°E, N60°-69°W e N70°-79°W, cada uma correspondendo a 16% dos lineamentos.

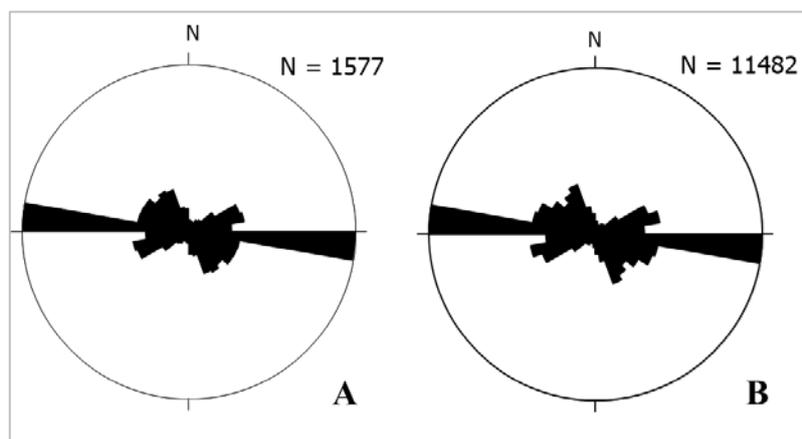


Figura 6 - Diagramas de roseta representando: A) direção principal dos lineamentos diversos - maior pétala na direção N80°-89°W (22% dos lineamentos) e B) direção principal dos lineamentos diversos considerando o comprimento médio - maior pétala na direção N80°-89°W (21% dos lineamentos).

Geologia Local

Ao longo do sistema fluvial analisado foram observados afloramentos de anfibolito e gnaiss correlacionados ao Complexo Santa Bárbara, quartzo-muscovita xisto e gnaiss associados ao Complexo Mantiqueira e quartzo xisto pertencentes ao Grupo Maquiné (Supergrupo Rio das Velhas). Destaca-se que tais litotipos foram caracterizados apenas macroscopicamente quanto à mineralogia e estruturas, sendo correlacionados às unidades litoestratigráficas

mapeadas pela CPRM (2014).

A análise conjunta dos planos de foliação obtidos nos diferentes litotipos, representados na forma de pontos polares, permitiu identificar um máximo principal em N7°W/9°NE, correspondendo a cerca de 56% das medidas investigadas (Figuras 7A, 7B). Além disso, a distribuição dos pontos polares forma uma guirlanda de atitude N83°W/subvertical, que pode ser associada ao plano ac de uma dobra com eixo em N07°E/sub-horizontal.

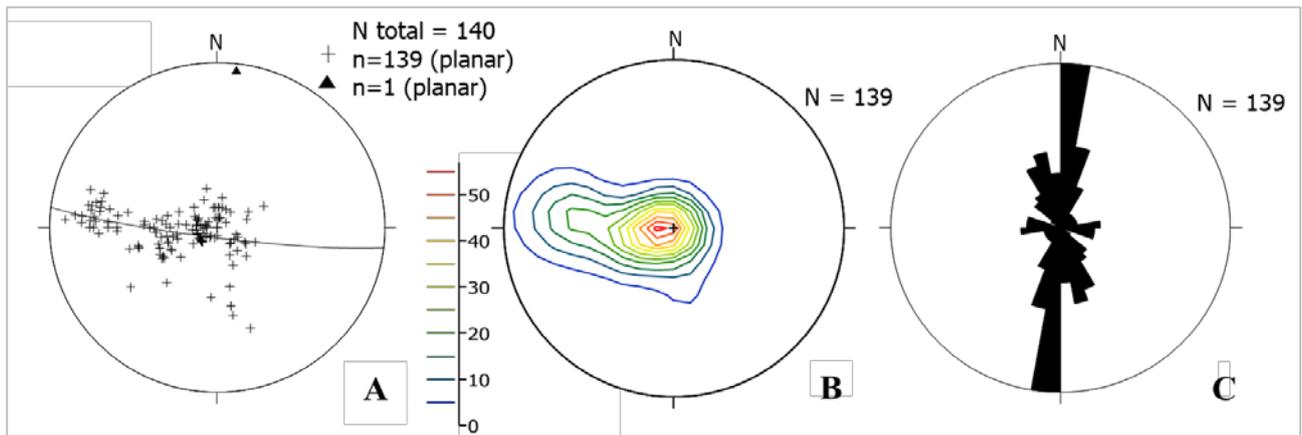


Figura 7 - A) Diagrama de igual área, hemisfério inferior, de pontos polares dos planos de foliação; B) Diagrama de contorno dos mesmos pontos polares (isolinhas em 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 e 55%); C) Diagramas de roseta representando a direção principal dos planos de foliação - maior pétala na direção N01°-10°E, correspondendo a 22% das medidas.

Quando essas atitudes são analisadas no diagrama de rosetas (Figura 7C), nota-se que 22% dos planos de foliação possuem direção N01°-10°E; 11% exibem direção N11°-20°E; 10% apresentam direção N10°-19°W; 9% correspondem à direção N20°-29°W e 8% têm direção N00°-09°W. Os diagramas construídos a partir dos planos de fratura, representados na forma de pontos polares, indicam a presença de máximos de fraturamento em N70°W/subvertical e N54°E/subvertical (Figuras 8A e 8B).

No diagrama de rosetas representado na figura

8C, verifica-se que 13% das medidas exibem direção N60°-69°W; 12% possuem direção N51°-60°E; 9% correspondem à direção N50°-59°W; enquanto 8% apresentam as direções N41°-50°E e N81°-90°E.

A comparação entre as direções principais dos lineamentos fluviais e diversos com as atitudes das estruturas observadas nos litotipos, permitiu notar correspondência entre as direções N50°-59°W e N60°-69°W. Com relação aos planos de foliação, apenas a direção N20°-29°W pode ser observada nos lineamentos diversos.

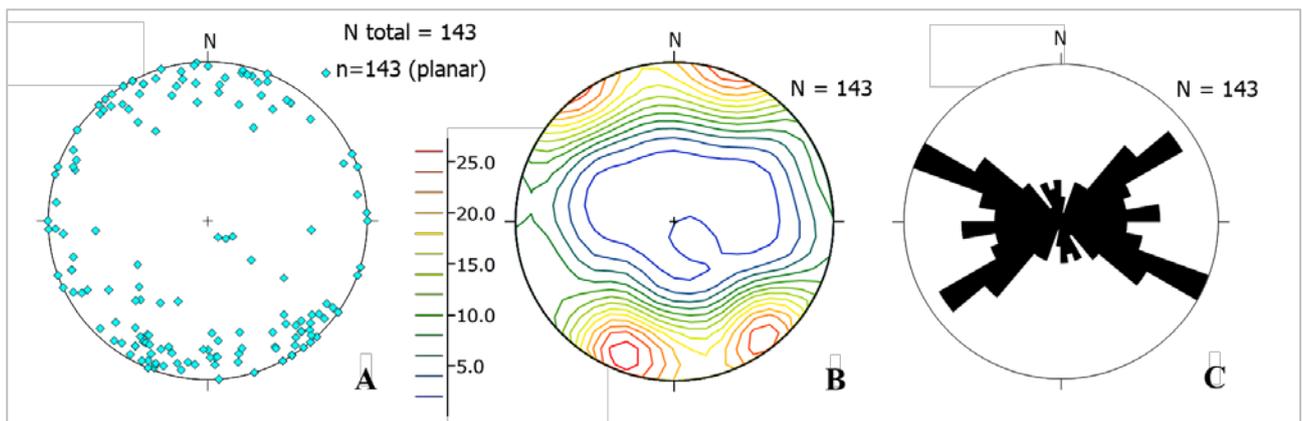


Figura 8 - A) Diagrama de igual área, hemisfério inferior, de pontos polares dos planos de fratura; B) Diagrama de contorno dos mesmos pontos polares (isolinhas em 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24 e 26%); C) Diagramas de roseta representando a direção principal dos planos de fratura - maior pétala na direção N60°-69°W, correspondendo a 13% das medidas.

Quando considerada a distribuição dos lineamentos diversos (Figura 9), verificou-se uma maior densidade desses nas porções associadas ao Complexo Mantiqueira (55%). Na maioria das unidades litoestratigráficas (exceto o Grupo Dom Silvério) é possível observar nos diagramas de roseta que a maior frequência corresponde à direção N80°-89°W, análoga àquela observada nos segmentos fluviais.

Destaca-se que cerca de 15% dos lineamentos (n = 152) associados ao Grupo Dom Silvério apresentam como direção principal N70°-79°W enquanto 13% desses exibem a direção N80°-89°W.

Um padrão semelhante quanto às direções principais dos lineamentos (fluviais e diversos) foi observado por Bricalli & Mello (2013) na área abrangida pelo Estado do Espírito Santo.

Nessa região, esses autores notaram o predomínio das orientações N40°-60°E, N0°-10°E, N80°-90°E e N80°-90°W e as direções

principais N40°-70°E e N10°-20°W quando considerados os lineamentos de maior comprimento médio

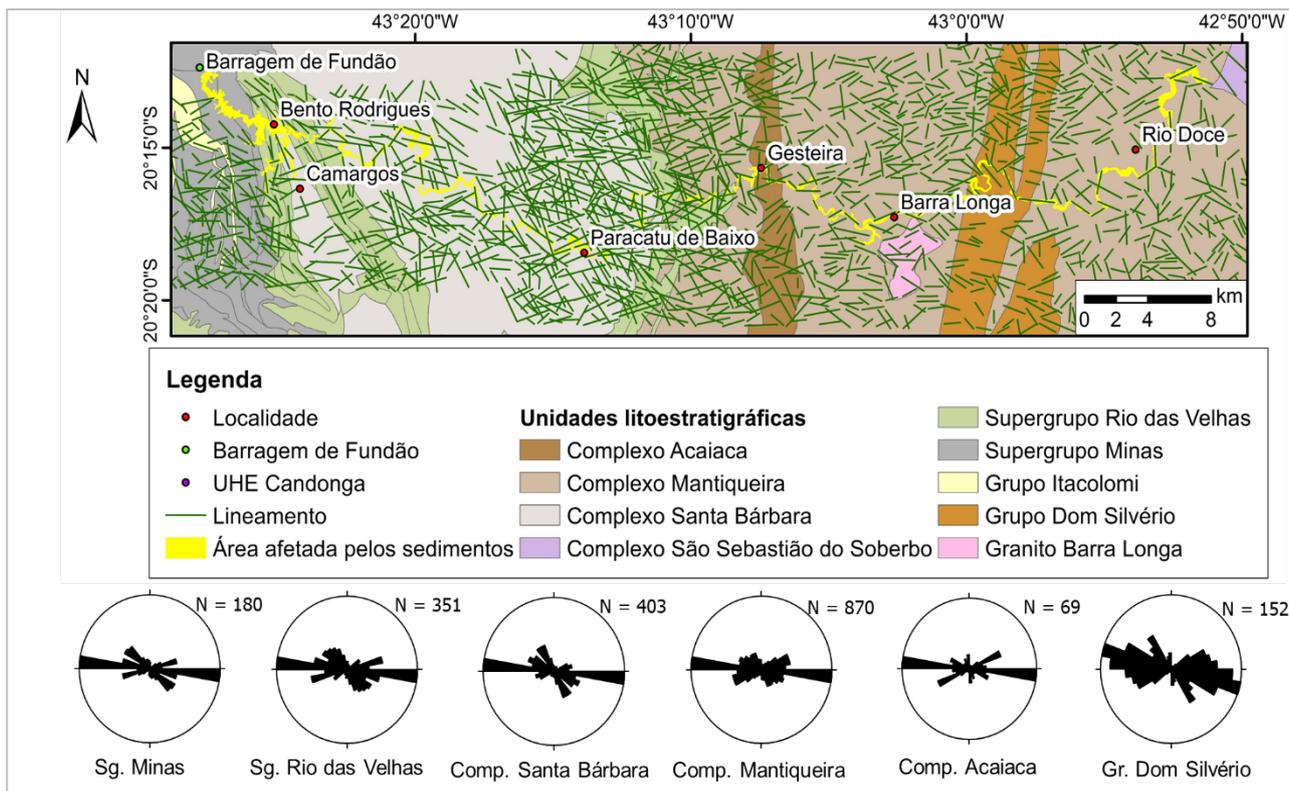


Figura 9 - Distribuição dos lineamentos por unidades litoestratigráficas entre a Barragem de Fundão e a UHE Candonga. Diagramas de roseta – maiores pétalas (exceto Grupo Dom Silvério) na direção N80°-89°W (Sg. Minas – 26% dos lineamentos; Sg. Rio das Velhas – 20%; Comp. Santa Bárbara – 24%; Comp. Mantiqueira – 21%; Comp. Acaiaca – 29%). Gr. Dom Silvério – maior pétala na direção N70°-79°W, correspondendo a 15% dos lineamentos. (Obs.: Sg. – Supergrupo; Comp. – Complexo; Gr. – Grupo).

De acordo com Bricalli & Mello (2013), os padrões de lineamentos observados podem ser relacionados aos conjuntos de estruturas rúpteis gerados em três diferentes regimes tectônicos, correlacionáveis a eventos descritos no sudeste do Brasil, associados: (i) à transcorrência sinistral E-W (de idade possivelmente neogênica), (ii) à transcorrência dextral E-W (pleistocênica a holocênica) e (iii) a uma distensão NW-SE (holocênica).

Na porção norte do Quadrilátero Ferrífero, Sartorato (1998) identificou como orientações preferenciais de lineamentos NE-SW, NW-SE e E-W, as quais associou, respectivamente, ao acamamento litológico, tectônica de caráter dúctil e ao Ciclo Brasileiro. Na região do Médio

Vale do Rio Doce, Mello (1997) identificou a atuação de quatro fases tectônicas durante a sua evolução no Cenozoico: i) regime tectônico transcorrente sinistral E-W; ii) regime tectônico transcorrente dextral E-W; iii) regime tectônico de extensão NW-SE e iv) regime tectônico de compressão E-W, que corresponde ao regime de esforços tectônicos atual.

Essa correspondência sugere um controle neotectônico da morfologia fluvial, que seria responsável pela direção principal dos canais e, conseqüentemente, das áreas de deposição de sedimentos, os quais devem ser considerados nas ações implementadas visando a restauração do sistema fluvial afetado pelo rompimento da Barragem de Fundão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da orientação, comprimento e distribuição de lineamentos diversos permitiu verificar o predomínio da direção N80°-89°W, que também pode ser observada nos lineamentos relacionados à direção dos segmentos (extensão

de 1.000 m, 2.000 m e 5.000 m) dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce.

Quando considerados os diferentes lineamentos e as atitudes das estruturas observadas nos litotipos, observa-se similitude entre as direções

N50°-59°W e N60°-69°W e os planos de fratura e entre a direção N20°-29°W e os planos de foliação.

Essa correspondência sugere um controle tectônico da morfologia fluvial, que seria

responsável pela direção principal dos canais e, conseqüentemente, das áreas de deposição de sedimentos, os quais devem ser considerados nas ações implementadas visando a restauração do sistema fluvial.

REFERÊNCIAS

- BALTAZAR, O.F. & RAPOSO, F.O. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. **Folha Mariana (SF.23-X-B-I)**. Estado de Minas Gerais. Escala: 1: 100.000. Brasília, DNPM/CPRM, 183p, 1993.
- BHATT, C.M.; CHOPRA, R.; SHARMA, P.K. Morphotectonic analysis in Anandpur Sahib area, Punjab (India) using remote sensing and GIS approach. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 35, n. 2, p. 129 - 139, 2007.
- BRANDALISE, L.A. Programa Levantamentos Geológicos Básicos Do Brasil. **Folha Ponte Nova (SF.23-X-B-II)**. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000. Brasília, DNPM/CPRM, 194 p., 1991.
- BRICALLI, L.L. & MELLO, C.L. Padrões de lineamentos relacionados à litoestrutura e ao fraturamento neotectônico (Estado do Espírito Santo, SE do Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 3, p. 301 - 311, 2013.
- BRIERLEY, G.J. & FRYIRS, K.A. **Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework**. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 398 p., 2005.
- BRUECKNER, H.; CUNNINGHAM, W.D.; ALKIMIM, F.F.; MARSHAK, S. Tectonic Implications of Precambrian Sm-Nd dates from the southern São Francisco craton and adjacent Araçuaí and Ribeira belts, Brazil. **Prec. Res.**, v. 99, p. 255 - 269, 2000.
- CHARLTON, R. **Fundamentals of fluvial geomorphology**. London: Routledge, 234 p., 2008.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 313 p., 1981.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Base de dados litológicos e de geodiversidade do Estado de Minas Gerais**. Escala 1: 1.000.000. Brasília, 2014. CD-ROM.
- DILTS, T. & YANG, J. **Stream Gradient and Sinuosity Toolbox for ArcGIS 10.1**. Great Basin Landscape Ecology Lab. University of Nevada Reno, 2015.
- DORR, J.V.N. **Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. U.S. Geological Survey Professional Paper, 641-A. U.S. Geological Survey. p. 1-110, 1969.
- FERGUSON, R.I. Meander irrigation: Equilibrium and change. In: **River Channel Changes** (Ed. Gregory, K. J.) Wiley, England, Chapter 15, p. 234 - 248, 1977.
- FOSSEN, H. **Geologia estrutural**. São Paulo: Oficina dos Textos, 610 p., 2012.
- GAIR, J.E. **Geology and ore deposit of the Nova Lima and Rio Acima Quadrangles, Minas Gerais, Brazil**. U. S. Geological Survey Professional Paper, 341-A, 67 p., 1962.
- GOOGLE. GOOGLE EARTH. Versão 7.1.5.1557. 2017. **Nota (Córregos Santarém e Camargo, rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce - MG)**. Disp. em: <http://www.google.com/earth/download/ge/agree.html>. Acessado em: 29dez2019.
- GUERRA, A.J.T. & CUNHA, S.B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Org. Antônio José Teixeira Guerra e Sandra Baptista da Cunha. 13ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 474 p., 2015.
- GUERRA, A.J.T. & MARÇAL, M.S. **Geomorfologia Ambiental**. 7ª Ed. Rio De Janeiro: Bertrand Brasil, 190 p., 2015.
- HAN, L.; LIU, Z.; NING, Y.; ZHAO, Z. Extraction and analysis of geological lineaments combining a DEM and remote sensing images from the northern Baoji loess area. **Advances in Space Research**, v. 62, p. 2480 - 2493, 2018.
- HARTMANN, L.A.; ENDO, I.; SUITA, M.T. F.; SANTOS, J.O.S.; FRANTZ, J.C.; CARNEIRO, M.A.; NAUGHTON, N. J.; BARLEY, M.E. Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon UPb isotopes. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 20, p. 273 - 285, 2006.
- HATJE, V.; PEDREIRA, R.M.A.; REZENDE, C.E.; SCHETTINI, F.; SOUZA, G.C.; MARIN, D.C.; HACKSPACHER, P.C. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, v. 7, 10706, 2017.
- IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. IBAMA: Brasília, 38 p., 2015.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Carta Internacional ao Milionésimo**. 2010. Disp. em: <http://mapas.ibge.gov.br/interativos/servicos/wms-do-arcgis>. Acessado em: 10jun2020.
- JORDT-EVANGELISTA, H. O Grupo Dom Silvério, SE de Minas Gerais: petrografia, metamorfismo, geoquímica e geologia econômica. **Revista Escola de Minas**, v. 45, n. 1 - 2, p. 140 - 142, 1992.
- JORDT-EVANGELISTA, H. Petrologia de fases, geotermometria e geobarometria do Complexo Granulítico de Acaiaca, Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 3. Belo Horizonte, 1985. **Anais...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 1985, p. 165 - 178.
- LEOPOLD, L.B.; WOLMAN, M.G.; MILLER, J.P. **Fluvial process in geomorphology**. Freeman, São Francisco e Londres, 522 p., 1964.
- MACHADO, N.; SCHRANK, A.; NOCE, C.M.; GAUTHIER, G. Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: implications for greenstone belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 141, p. 259 - 276, 1996.
- MEDEIROS JÚNIOR, E.B. & JORDT-EVANGELISTA, H. Petrografia e geoquímica dos granulitos do Complexo Acaiaca, região Centro-Sudeste de Minas Gerais. **R. Esc. Minas**, v. 63, n. 2, p. 219 - 228, 2010.
- MEDEIROS JÚNIOR, E.B. **Petrogênese do Complexo Acaiaca, MG**. Ouro Preto, 101 p., 2009. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto.
- MELLO, C.L. **Sedimentação e tectônica cenozóicas no médio vale do Rio Doce (MG, sudeste do Brasil) e suas implicações na evolução de um sistema de lagos**. São Paulo, 275 p., 1997. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- NOCE, C.M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; SILVA, L.C.; ALKIMIM, F.F. O embasamento arqueano e paleoproterozóico do orógeno Araçuaí. **Geonomos**, v. 15, n. 1, p. 17 - 23, 2007.
- O'LEARY, D.W.; FRIEDMAN, J.D.; POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. **Geological Society of America Bulletin**, v. 87, p. 1463 - 1469, 1976.
- QUEIROZ, G.L.; SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E.R. AzimuthFinder: ferramenta para a extração de dados e apoio na análise estrutural. **Revista Geologia USP, Série Científica**, v.

- 14, n. 1, p. 69-80, 2014.
- ROLLER, K. & TREPMMANN, C.A. **Stereo32 1.0.3**. Institut für Geologie - Ruhr University Bochum: Bochum, DE. 2003.
- SANTOS, M.L.; FERNANDES, O.V.Q.; STEVAUX, J.C. Aspectos morfogênicos das barras de cabal do Rio Paraná, trecho de Porto Rico, PR. **Boletim de Geografia**, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, v. 1, n. 1, p. 11 – 24, 1992.
- SANTOS, O.S.H.; AVELLAR, F.C.; ALVES, M.; TRINDADE, R.C.; MENEZES, M.B.; FERREIRA, M.C.; FRANÇA, G.S.; CORDEIRO, J., SOBREIRA, F.G.; YOSHIDA, I.M.; MOURA, P.M.; BAPTISTA, M.B.; SCOTTI, M.R. Understanding the Environmental Impact of a Mine Dam Rupture in Brazil: Prospects for Remediation. **J. Environ. Qual.**, v. 48, p. 439 – 449, 2019.
- SARTORATO, G.B. **Análise estatística de lineamentos extraídos de imagem Landsat-TM na porção norte do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Campinas, 76 p., 1998. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Geociências, Área de Metalogênese e Geoquímica. Universidade Estadual de Campinas.
- SILVA, L.C.; ARMSTRONG, R.; NOCE, C.M.; CARNEIRO, M. A.; PIMENTEL, M.M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; LEITE, C.A.; VIEIRA, V.S.; SILVA, M.A.; PAES, V.J.C.; CARDOSO-FILHO, J.M. Reavaliação da evolução geológica em terrenos pré-cambrianos brasileiros com base em novos dados U-Pb SHRIMP, parte II: Orógeno Araçuai, Cinturão Mineiro e Cráton São Francisco Meridional. **Revista Brasileira Geociências**, v. 32, p. 513 - 528, 2002.
- SOUZA, L.A.; SOBREIRA, F.G.; PRADO FILHO, J.F. Cartografia e diagnóstico geoambiental aplicados ao ordenamento territorial do município de Mariana-MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 3, p. 189 - 203, 2005.
- SPEIGHT, J.G. Meander spectra of the Angabunga River. **Journal of Hydrology**, v. 3, p. 1 - 15, 1965.
- STEVAUX, J.C. & LATRUBESSE, E.M. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Oficina de Textos, 336 p., 2017.
- THAKUR, T.R. & SCHEIDEGGER, A.E. A chain model of river meander. **Journal of Hydrology**, v. 12, p. 25 - 47, 1970.
- VASSILAS, N.; PERANTONIS, S.; CHAROU, E.; TSENOGLOU, T.; STEFOULI, M.; VAROUFAKIS, S. Delineation of lineaments from satellite data based on efficient neural network and pattern recognition techniques. In: PROCEEDINGS OF 2ND HELLENIC CONF. ON AI, SETN-2002, 2002, Thessaloniki, Greece. 2002. **Anais...**Thessaloniki: 2002, p. 355 – 366.

*Submetido em 18 de agosto de 2020
Aceito para publicação em 7 de janeiro de 2021*