

Artigo de Pesquisa

Análise geofísica regional do controle litoestrutural em voçorocas da porção centro-sul do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil

Regional geophysical analysis of litho-structural control in gullies in the south central portion of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil

Luiz Henrique Cardoso *¹, Luis de Almeida Prado Bacellar *², Ana Luísa Santos Martins *³ e Débora de Oliveira Bragioni *⁴

* Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, Brasil.

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1445-1665>

E-mail: luiz.cardoso@ufop.edu.br

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1670-9471>

E-mail: bacellar@ufop.edu.br

³ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7209-6107>

E-mail: analuisam.engcivil@gmail.com

⁴ ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1203-9503>

E-mail: deborabragioni21@gmail.com

Recebido: 12/11/2020; Aceito: 17/09/2021; Publicado: 06/04/2022

Resumo: No Complexo Bação, unidade do embasamento cristalino do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, há inúmeras ocorrências de voçorocas e o entendimento de seus mecanismos evolutivos é necessário, principalmente, para discutir medidas de controle, em prol da segurança de zonas urbanizadas ao entorno. O objetivo desta pesquisa foi preencher as lacunas no conhecimento sobre a influência de estruturas planares nas voçorocas do Complexo e, principalmente, no entorno a sul (unidade supracrustal – Formação Cercadinho). Para isso, integrou-se o processamento de dados de Gravimetria, Magnetometria e Radiometria, a outros dados remotos e de campo. Os resultados mostram estruturas planares remanescentes das rochas exercendo forte controle. O eixo maior das voçorocas associadas a gnaisses e granitoides, desenvolve-se, preferencialmente, na direção 50° a 70°NW e, subordinadamente, 40° a 50°NE e E-W, pelo condicionamento combinado da foliação e fraturas. As associadas a filitos são controladas por dobramentos, pela foliação, por falhas e fraturas (principalmente, N50°W / 70°NE e N45°E / 75°NW), por onde se desenvolvem sulcos de erosão, obliquamente e ao longo do eixo maior, e movimentos de massa, como rupturas em cunha. Acredita-se que esta pesquisa possa subsidiar campanhas de intervenções geotécnicas para o controle de voçorocas.

Palavras-chave: Feição Erosiva; Métodos Geofísicos Potenciais; Radiometria; Complexo Bação; Sinclinal Dom Bosco

Abstract: In the Bação Complex, a crystalline basement unit of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, there are numerous occurrences of gullies and the understanding of its evolutionary mechanisms is necessary mainly to discuss control measures in favor of housing security around. The objective of this research was to fill the gaps in knowledge about the influence of the planar structures in the Complex's gullies and mainly in the surroundings to the south (supracrustal unit – Cercadinho Formation). The data processing of Gravimetry, Magnetometry and Radiometry, other remote and field data was integrated.

The results show rock planar structures showing strong control. The major axis of gullies associated with gneisses and granitoids develops preferably in the 50° to 70°NW direction and subordinately 40° to 50°NE and E-W, due to the combined conditioning by foliation and fractures (N50°W / 70°NE and N45°E / 75°NW mainly). The ones associated with phyllites are controlled by folding, foliation, faults and fractures, through which erosion rills develop, obliquely and along the major axis, and mass movements, such as wedge sliding. It is believed that this research can support campaigns for geotechnical interventions to gullies control.

Keywords: Erosion Feature; Potential Geophysical Methods; Radiometry; Bação Complex; Dom Bosco Syncline

1. Introdução

Voçorocas são originadas a partir da formação e subsequente expansão de canais de erosão no solo como resultado do fluxo de água concentrado (POESEN et al., 2003). São consideradas um grande problema, visto os danos econômicos, sociais e ambientais que provocam (BACELLAR, 2000; VALENTIN et al., 2005), justificando o elevado número de trabalhos que abordam os processos de formação e desenvolvimento, e propostas de metodologias de prevenção e correção, em prol da segurança de zonas urbanizadas (IONITA, 2006; CARVALHO e SOBREIRA, 2015; XU et al., 2016; HAYA et al., 2017; BELAYNEH et al., 2020; CASTILLO et al., 2021).

As maiores densidades de voçorocas do mundo superam 100 ocorrências/km² e constata-se até 50 ocorrências/km² em regiões como o Centro-Oeste dos Estados Unidos, *Rift* Africano, Austrália e Sudeste do Brasil. Os padrões regionais são explicados, principalmente, pela topografia e clima em interação com a cobertura vegetal (VANMAERCKE et al., 2020). Nos municípios de Ouro Preto e Itabirito, Minas Gerais, há centenas de ocorrências associadas ao manto intempérico do embasamento cristalino do Quadrilátero Ferrífero (gnaisse e granitoides), na Unidade Complexo Bação. A sul, o contexto relaciona-se a rochas supracrustais, representadas pelos filitos da Formação Cercadinho, Supergrupo Minas. Os estudos sobre as voçorocas do Quadrilátero Ferrífero têm se concentrado no embasamento (BACELLAR et al., 2005; CAMPOS, 2006; DRUMMOND e BACELLAR, 2006; CARVALHO e SOBREIRA, 2015), investigando os condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de gênese e evolução do voçorocamento, da favorabilidade à urbanização, dentre outros. O desenvolvimento da maioria delas ocorre nas cabeceiras de drenagem (BACELLAR, 2000; MORAIS, 2003).

Com respeito aos condicionantes geológicos nas voçorocas do Complexo Bação, estudos locais evidenciam alguns aspectos: controle da erosão pela foliação remanescente no saprolito, orientada SE-NW, e por falhas e fraturas com orientações diversas (BACELLAR, 2000); influência de fraturas orientadas SE-NW (paralelas a lineamentos cenozoicos) e SW-NE, e de atividade neotectônica comprovada pela ocorrência de depósitos quaternários deformados fragilmente (CAMPOS, 2006). Estudos em outras regiões têm mostrado a relevância dos seguintes condicionantes geológicos: controle da erosão por fraturas, acamamento e foliação relictos no saprolito de rochas supracrustais do Quadrilátero Ferrífero (PIMENTEL et al., 2005; RIBEIRO, 2016); relação de atividade tectônica com feições lineares de erosão na região central da Europa (KRÁLIKOVÁ et al. 2010; BURIAN et al., 2017); influência de estruturas no solo residual de um granito no desenvolvimento de voçorocas no Sul da China (XIA et al., 2019).

Contudo, é limitado o conhecimento sobre a influência litoestrutural nos padrões regionais de desenvolvimento das voçorocas no Complexo Bação e entorno a sul. Para analisar detalhes geológicos encobertos pelos mantos intempéricos, como ocorre no Quadrilátero Ferrífero, uma técnica de investigação indireta, a Geofísica, tem mostrado eficiência em estudos locais em várias regiões. Os métodos mais utilizados têm sido os elétricos e eletromagnéticos que, segundo Kearey et al. (2002), permitem a investigação das propriedades elétricas e também magnéticas (no caso dos eletromagnéticos) dos corpos. Eles fornecem informações sobre a dinâmica hidrogeológica subterrânea, identificando as zonas preferenciais de fluxo, erosão por *piping* e a superfície freática; o arcabouço litoestrutural e o contato rocha/solo. Bacellar (2000), utilizando *Ground Penetration Radar* (GPR) e Eletrorresistividade, identificou falhas direcionais, sobretudo orientadas SE-NW, condicionando o desenvolvimento de voçorocas no Complexo Bação. Aranha (2002) interpretou seções de GPR, mostrando que paleoformas do relevo pretérito na região de Gouveia, MG, refletem no desenvolvimento atual das voçorocas. Desclotres et al. (2003), por meio de Eletrorresistividade, identificaram zonas preferenciais de fluxo que favorecem a erosão na região do Sahel, África. A correlação entre a erosão por *piping* e o desenvolvimento de voçorocas foi evidenciada utilizando-se GPR, Eletrorresistividade ou ambos integrados nas regiões de Gouveia, MG (AUGUSTIN e ARANHA, 2006), dos Cárpatos Orientais, Polônia (BERNATEK-JAKIEL e KONDRACKA,

2016) e de São Pedro, SP (CARRAZZA, 2016). Onu et al. (2012), realizando levantamentos azimutais de resistividade elétrica para investigar os aspectos estruturais do Cinturão de Erosão Okigwe-Umuahia, Sudeste da Nigéria, interpretaram que os eixos que caracterizam a anisotropia elétrica, implicam na resposta dos *trends* tectônicos na região, e coincidem com as orientações principais de lineamentos de drenagem superficial, o que reflete o condicionamento geológico das voçorocas no Cinturão.

Métodos geofísicos potenciais e radiometria também foram utilizados no estudo de voçorocas. A Magnetometria mede o campo magnético terrestre que apresenta variações devido às propriedades físicas das rochas. Anomalias no campo magnético podem ser geradas pela variação da litologia local. Analogamente, a variação da densidade entre rochas distintas pode gerar anomalias no campo gravitacional terrestre e o método de investigação utilizado é a Gravimetria. A Radiometria investiga a radiação emitida pelos corpos, por meio da medição das suas emissões de raios Gama (urânio ^{238}U ; tório ^{232}Th e potássio ^{40}K) (TELFORD et al., 1990; KEAREY et al., 2002). A argilosidade das rochas é proporcional a essas emissões (COSTA et al., 2008; ELLIS e SINGER, 2008; FERREIRA et al., 2010). Ribeiro (2016) utilizou aeromagnetometria e aeroradiometria para entender o controle litoestrutural de uma voçoroca no extremo sul do Quadrilátero Ferrífero e os resultados mostram que a sua direção principal de desenvolvimento coincide com um padrão estrutural regional das rochas.

Assim, esta pesquisa objetiva, por meio do processamento de dados de satélite (Gravimetria) e aéreos (Magnetometria e Radiometria), em duas escalas regionais (1:500.000 e 1:50.000), integrar seus produtos a dados de imagens de satélite, geológicos, drenagem e de elevação, e dados detalhados de campo, para investigar os condicionantes litoestruturais das voçorocas e suas relações com os padrões regionais de desenvolvimento.

2. Área de Estudo

A área de estudo, limitada pelas coordenadas UTM 632.000 m E, 7.741.000 m S e 641.000 m E, 7.750.000 m S (Datum Córrego Alegre / 23 S), situa-se em uma região que compreende parte da zona distrital oeste do município de Ouro Preto (Figura 1).

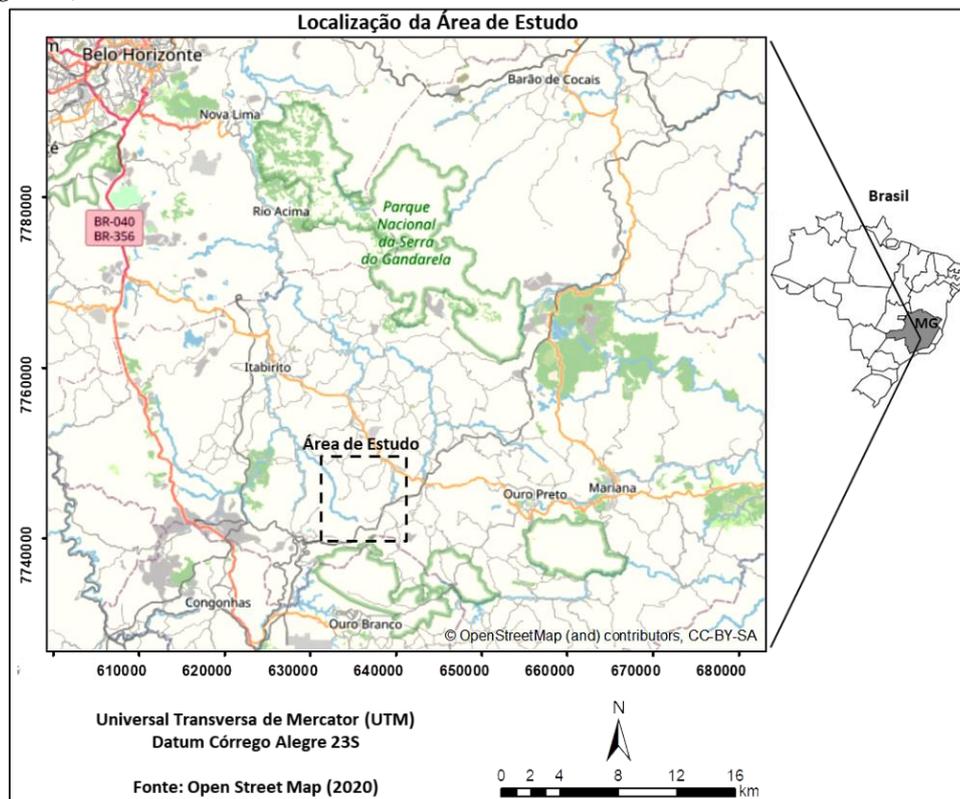


Figura 1. Localização da área de estudo que está delimitada pela linha descontínua negra.

A geologia da área relaciona-se ao Quadrilátero Ferrífero que está situado na porção central do estado de Minas Gerais e constitui uma região montanhosa que ocupa pouco mais de 7.000 km², com uma forma,

aproximadamente, retangular, definida pela orientação de serras ricas em minério de ferro. Estratigraficamente, o embasamento é constituído por rochas meta-ígneas intrusivas arqueanas e sobre ele estão assentadas três sucessões supracrustais. A primeira é do tipo *greenstone belt* de idade arqueana, e é denominada Supergrupo Rio das Velhas. A segunda (Supergrupo Minas) e a terceira (Grupo Itacolomi), ambas proterozoicas, apresentam rochas sobretudo metassedimentares (DORR, 1969; ALMEIDA e HASUI, 1984; MACHADO et al., 1996; ALKMIM e MARSHAK, 1998; CARNEIRO et al., 1998).

No arcabouço estrutural há o registro das diversas fases de deformação, representadas por dobras, fraturas e falhas, que controlam grandes feições de relevo como escarpas, serras e vales das regiões de Ouro Preto, Mariana, Itabirito, Santa Bárbara, Belo Horizonte e arredores (ENDO e FONSECA, 1992; NALINI Jr., 1993; ALKMIM e MARSHAK, 1998).

Varajão (1991) destaca o controle litoestrutural na evolução da paisagem do Quadrilátero Ferrífero pela erosão diferencial das rochas em função das diferenças de resistência e Salgado et al. (2008) apresentam as taxas de erosão para cada litotipo. Alguns autores (VALADÃO, 1998; LIPSKI, 2002; MAGALHÃES Jr., et al., 2011) evidenciam a influência de atividades neotectônicas no Cenozoico na modelação do relevo nesta região.

A área de estudo abrange parte do embasamento e parte das supracrustais a sul. A Figura 2 apresenta a estratigrafia e as grandes feições estruturais do Quadrilátero Ferrífero, bem como o mapa geológico da área, onde são discriminados os quatro domínios morfo-litológicos locais: DM1 – embasamento cristalino, situado na porção norte da área, constituído por gnaisses e granitoides do Complexo Bação com morfologia de mares-de-morros; DM2 – faixa delgada de xistos do Grupo Nova Lima / Supergrupo Rio das Velhas, encaixada na serra a sul, e em contato tectônico com o embasamento a norte; DM3 – serra alinhada na direção E-W (com uma inflexão principal orientada SW-NE), situada na porção central e sustentada por rochas do Supergrupo Minas - formações ferríferas (Formação Cauê), itabirito dolomítico e carbonatos (Formação Gandarela) e quartzitos (Formação Moeda); DM4 – filitos e intercalações de quartzitos ferruginosos (Formação Cercadinho / Supergrupo Minas), encaixados a sul da serra.

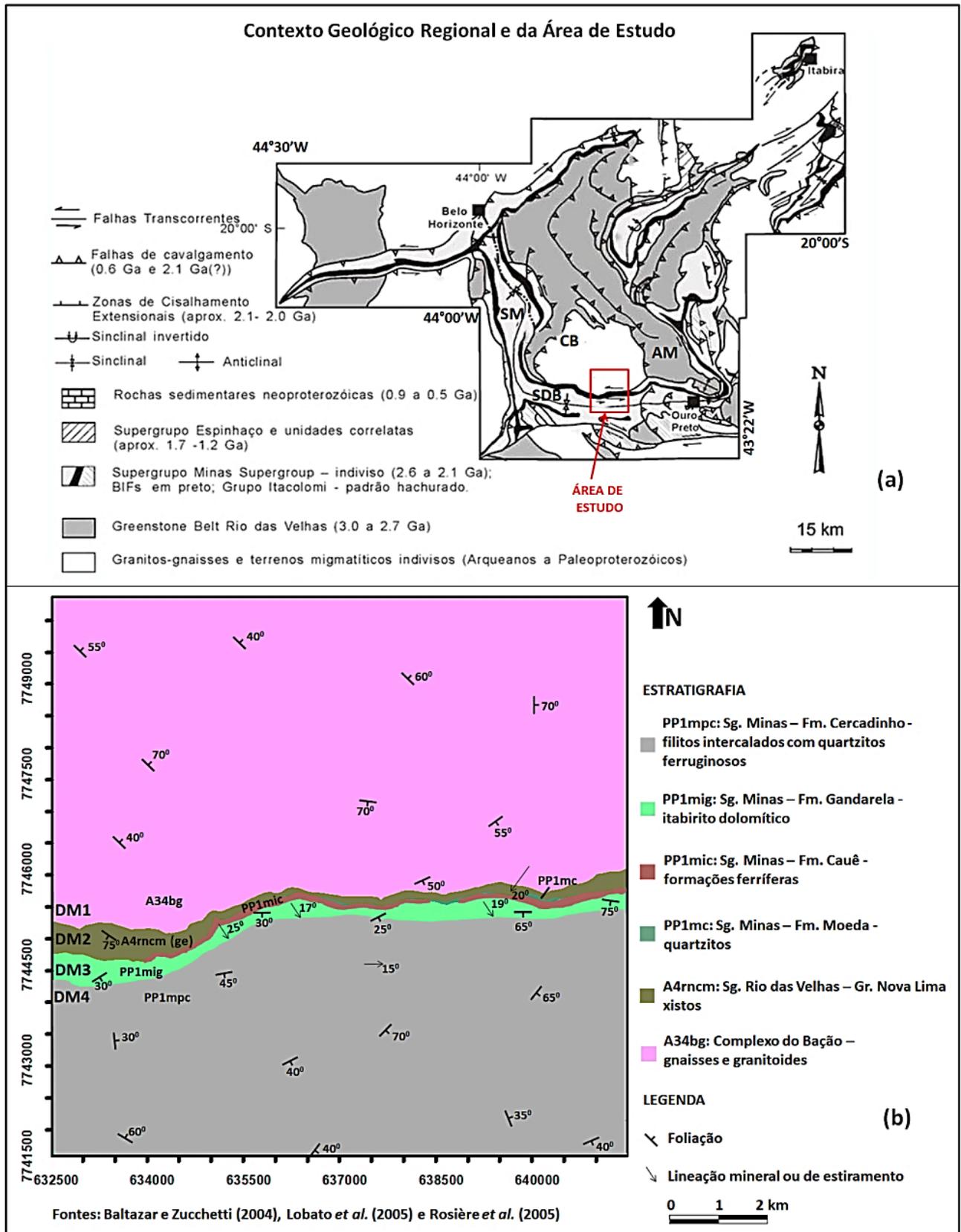


Figura 2. a) Estratigrafia simplificada e grandes feições estruturais do Quadrilátero Ferrífero. As feições mais próximas ao Complexo Bação (CB) são as estruturas nucleadas no Proterozoico: os sinclinais Moeda (SM) e Dom Bosco (SDB) e o Anticlinal de Mariana (AM). b) Mapa geológico simplificado da área de estudo com discriminação dos domínios morfo-litológicos (DM1, DM2, DM3 e DM4).

3. Materiais e Métodos

O desenvolvimento metodológico consistiu em: levantamento de feições erosivas (ordem de dezenas de metros) em imagem de satélite (GOOGLE EARTH, 2019); processamento de dados gravimétricos, magnéticos e radiométricos, discriminação de fácies geofísicas e identificação de feições indicativas de estruturas planares, replicando parcialmente a metodologia de Ribeiro (2016); investigação das orientações em comum entre os lineamentos geofísicos interpretados, as feições erosivas, os cursos de drenagem e os lineamentos da topografia; investigação dos detalhes de campo do arcabouço estrutural das rochas que condicionam as voçorocas.

Os dados de drenagem foram obtidos de Lobato et al. (2005) e os topográficos, do INPE (2021). O modelo digital de elevação foi construído por meio do *software Surfer 9.11.947* (GOLDEN, 2021). O *software* para o processamento dos dados geofísicos foi o *Oasis Montaj 9.8.1* (GEOSOFT / SEEQUENT, 2020). Os dados dos métodos potenciais foram processados no domínio da frequência. Os mapas gerados foram georreferenciados e os lineamentos interpretados tiveram suas direções medidas e, posteriormente, submetidas ao *software GeoRose 0.3.0* (YOUNG TECHNOLOGY INC., 2020), que gerou rosetas de lineamentos, de onde foi avaliada a distribuição estatística de frequência das direções e interpretados os *trends* principais dos lineamentos.

Primeiramente, foram processados dados de satélite de Gravimetria, em escala 1:500.000 (a âmbito do Quadrilátero Ferrífero), para a investigação de lineamentos maiores que passam pelo Complexo Bação e entorno. Os dados brutos (g_{obs}) foram obtidos do banco da Missão *Topex/Poseidon* da NASA, lançada em 1992. Posteriormente, foram submetidos às correções *Free Air* (com ajuste dos dados para o *World Geodetic System 1984 - WGS84*, para descontar a massa atmosférica da Terra) e *Bouguer* (incluindo as correções de terreno e da curvatura da Terra). Os dados corrigidos foram interpolados, através de mínima curvatura, em uma malha regular de 1000 m. Os mapas iniciais gerados foram *Free Air* e *Bouguer*. Como as resoluções das anomalias *Bouguer* tiveram melhores resultados que o *Free Air*, este foi descartado, prosseguindo-se com as filtragens (do tipo derivações) no *Bouguer* para avaliar as anomalias mais superficiais (gradientes verticais: dz e d^2z) e focar os lineamentos nas direções N-S e E-W, respectivamente, associadas aos gradientes horizontais dx e dy .

Posteriormente, foram processados dados aéreos de Magnetometria e Radiometria, em escala 1:50.000, para detalhar as observações investigadas pela gravimetria. Os dados foram obtidos do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e compõem o banco do Bloco Leste da Área 2 (LASA, 2001). Na Magnetometria, aplicaram-se as correções referentes ao *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) e à variação diurna. Os dados corrigidos foram interpolados por meio de mínima curvatura, em uma malha regular de 350 m. Foi gerado o mapa de campo magnético total para posteriores filtragens, análogas às da Gravimetria, além do mapa de Amplitude do Sinal Analítico. Na Radiometria, foram gerados os mapas corrigidos da radiação cósmica de fundo e separados por canal de radioelementos - urânio ^{238}U ; tório ^{232}Th e potássio ^{40}K , e contagem total.

4. Resultados

4.1. Levantamento das Principais Feições Erosivas

Foram levantadas 77 feições erosivas no domínio morfo-litológico DM1 (Complexo Bação), e 51 feições no domínio DM4 (Formação Cercadinho). A Figura 3 discrimina as feições em imagem de satélite, por meio de lineamentos que representam seus eixos maiores de desenvolvimento e a distribuição estatística de suas orientações por domínio e da área total em estudo. Observa-se o *trend* mais forte nas direções 60°NW e 45°NW , referente a DM1 e DM4, respectivamente. Subordinadamente, são observados os *trends* 45°NE e E-W em DM1, e 45°NE em DM4. Considerando as orientações das voçorocas em DM1 e DM4, conjuntamente, a direção preferencial é 50° a 70°NW e, subordinadamente, 40° a 50°NE , E-W e N-S.

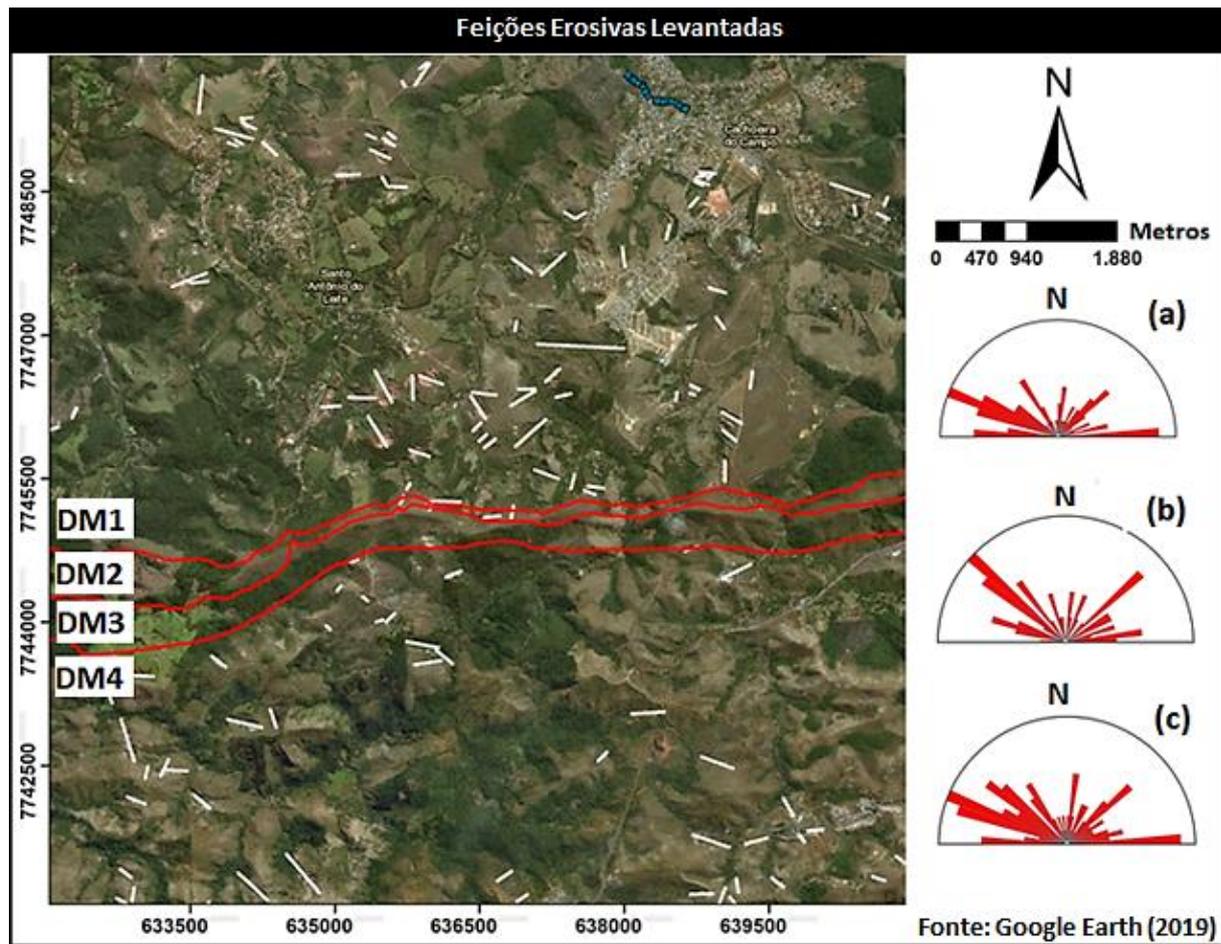


Figura 3. Apresentação dos lineamentos (brancos) que representam o eixo maior das feições erosivas levantadas e da distribuição de suas orientações sobrepostas à imagem de satélite. Os limites entre os domínios estão em vermelho e as rosetas de frequência de lineamentos relacionam-se aos domínios DM1 (a) e DM4 (b), e à distribuição total (c).

4.2. Anomalias Gravimétricas

Os mapas gravimétricos são apresentados na Figura 4. Observa-se que o mapa *Free Air* apresenta anomalias com menos detalhes em comparação aos outros mapas e, mesmo assim, mostra alguns *trends* nas direções SE-NW, E-W e N-S. Ressalta-se que as anomalias *Bouguer* na porção central do Quadrilátero Ferrífero permitem distinguir bem os limites do Complexo Bação em todos os mapas, ressaltando-se que os valores das anomalias variam entre $-1,4 \times 10^{-6}$ e $3,8 \times 10^{-6}$ mGal/m² no mapa com filtro d²z (Figura 4g), cujo nível de detalhe é o maior entre todos os gravimétricos. Adicionalmente, as grandes serras, sustentadas por formações ferríferas, quartzitos e carbonatos, são discriminadas por meio de anomalias com grandes comprimentos e amplitudes ($> 3,8 \times 10^{-6}$ mGal/m²). Por outro lado, anomalias com os mais baixos valores ($< -1,4 \times 10^{-6}$ mGal/m²) respondem à ocorrência dos xistos e filitos, principalmente nos fundos dos vales. As anomalias manifestam-se também como lineamentos de grande comprimento que ocorrem dentro da área do Complexo e se estendem para além de seus limites.

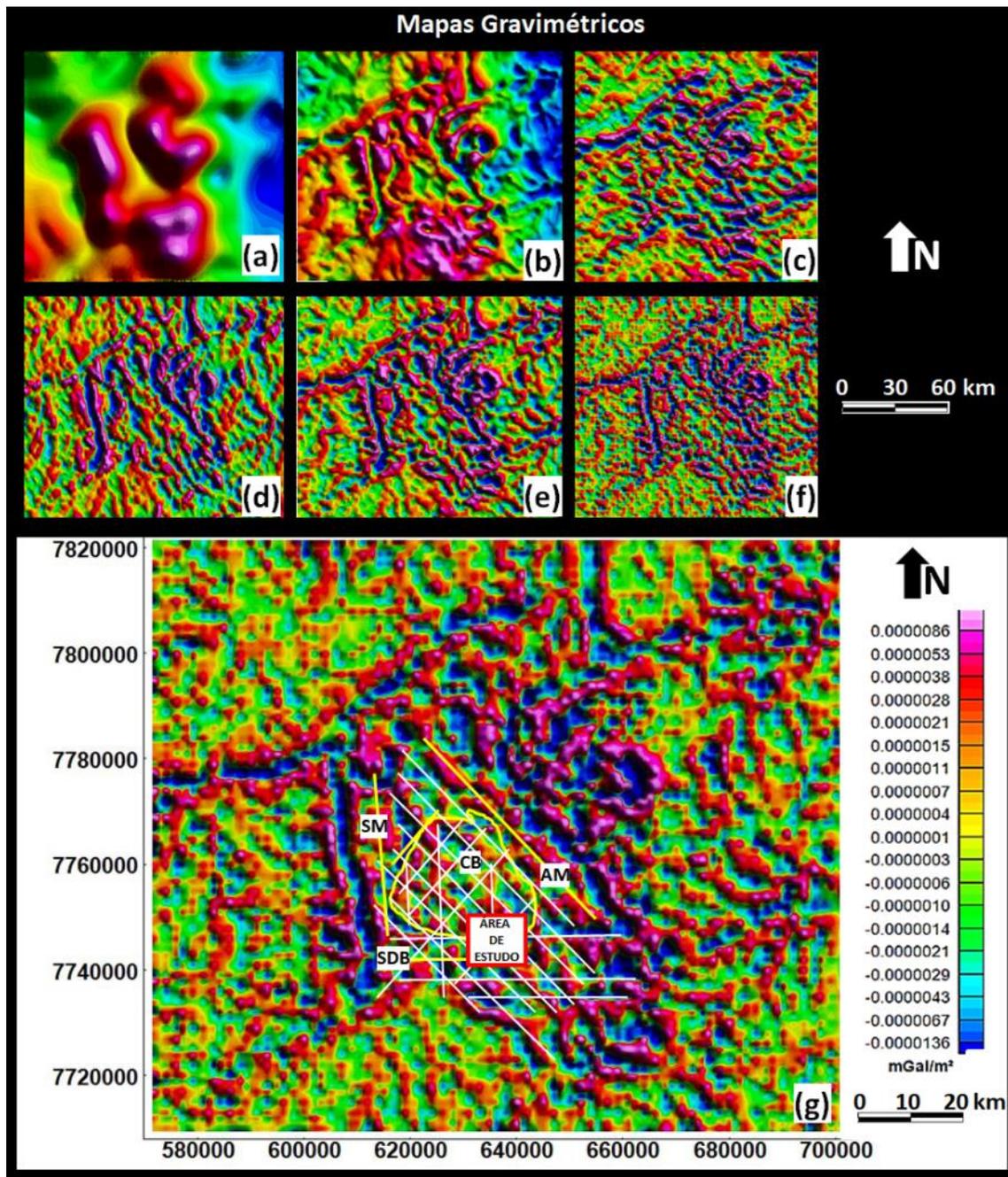


Figura 4. Mapas gravimétricos. *Free Air* (a); *Bouguer*: Campo Gravimétrico Anômalo (b), filtros - dy (c), dx (d), dz (e) e d^2z ou Residual (f). Em (g), estão os lineamentos interpretados (brancos e amarelos) e sobrepostos ao mapa residual, em que se observa paralelismo aos eixos dos sinclinais Moeda (SM) e Dom Bosco (SDB) e Anticlinal de Mariana (AM) e o contorno (em amarelo) do Complexo Bação (CB).

4.3. Anomalias Magnéticas

Em todos os mapas magnéticos da área de estudo, observam-se, no mínimo, três regiões com valores de magnetização distintos (Figura 5). Como o mapa com filtro d^2z (residual) apresenta as anomalias mais superficiais, nele são discriminadas três magnetofácies distintas (M1, M2 e M3) e, sobrepostos, os lineamentos interpretados em todos os mapas magnéticos e demais feições (Figura 5g). As direções preferenciais dos lineamentos magnéticos é 35° a 55° NW e, subordinadamente, 35° a 55° NE, E-W e N-S.

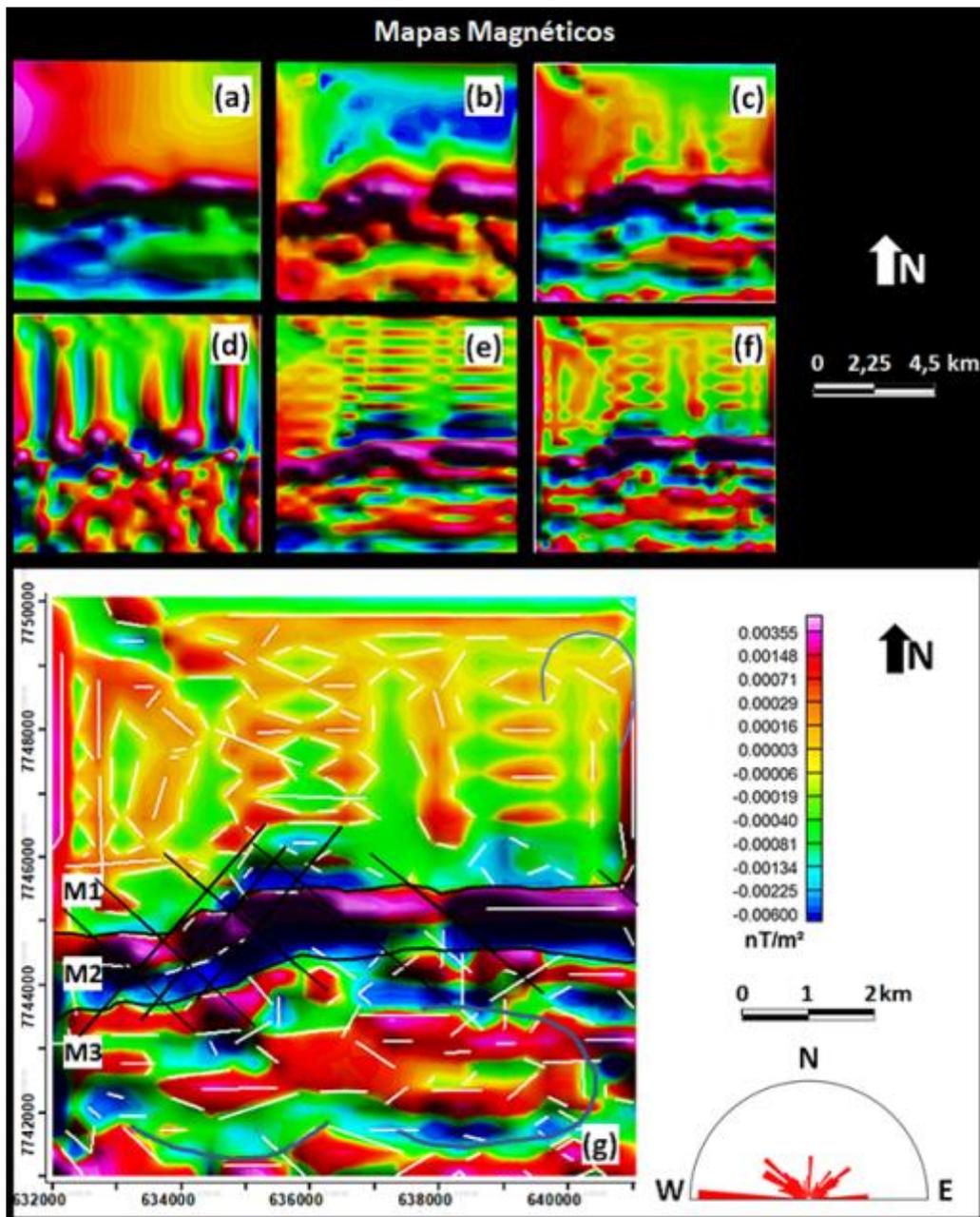


Figura 5. Mapas magnéticos. a) Campo Magnético Total; b) Amplitude do Sinal Analítico; c) Filtro dz; d) Filtro dx; e) Filtro dy; f) Residual (d^2z); g) Magnetofácies (delimitadas por linha negra) e lineamentos interpretados (brancos) e sobrepostos ao mapa residual. Na magnetofácies M2 são verificadas inflexões, indicadas pelos lineamentos negros, nas direções SE-NW e SW-NE. Feições em azul foram interpretadas como dobramentos.

4.4. Anomalias Radiométricas

Analogamente à Magnetometria, fácies geofísicas também foram discriminadas por meio da Radiometria, em mapas no canal de Potássio ^{40}K (Figura 6a), Urânio ^{238}U (Figura 6b), Tório ^{232}Th (Figura 6c) e de contagem total (Figura 6d). A Figura 6e apresenta os lineamentos radiométricos interpretados de todos os mapas, sobrepostos ao do canal de Tório ^{232}Th , pois é o radioelemento com a menor mobilidade, o que melhor possibilita a interpretação das estruturas e a assinatura radiométrica. Em conformidade com direções preferenciais dos lineamentos magnéticos, observa-se na roseta de lineamentos radiométricos, um resultado semelhante. As discontinuidades orientadas na direção SE-NW interpretadas anteriormente, também são bem pronunciáveis em todos os mapas radiométricos, principalmente na radiofácies R1. Nesse caso, suas extensões por toda a área de estudo, são mais

perceptíveis, comparativamente às análises dos mapas magnéticos. As direções principais dos lineamentos radiométricos é 40° a 50°NW e E-W e, subordinadamente, N-S e 45° a 60°NE.

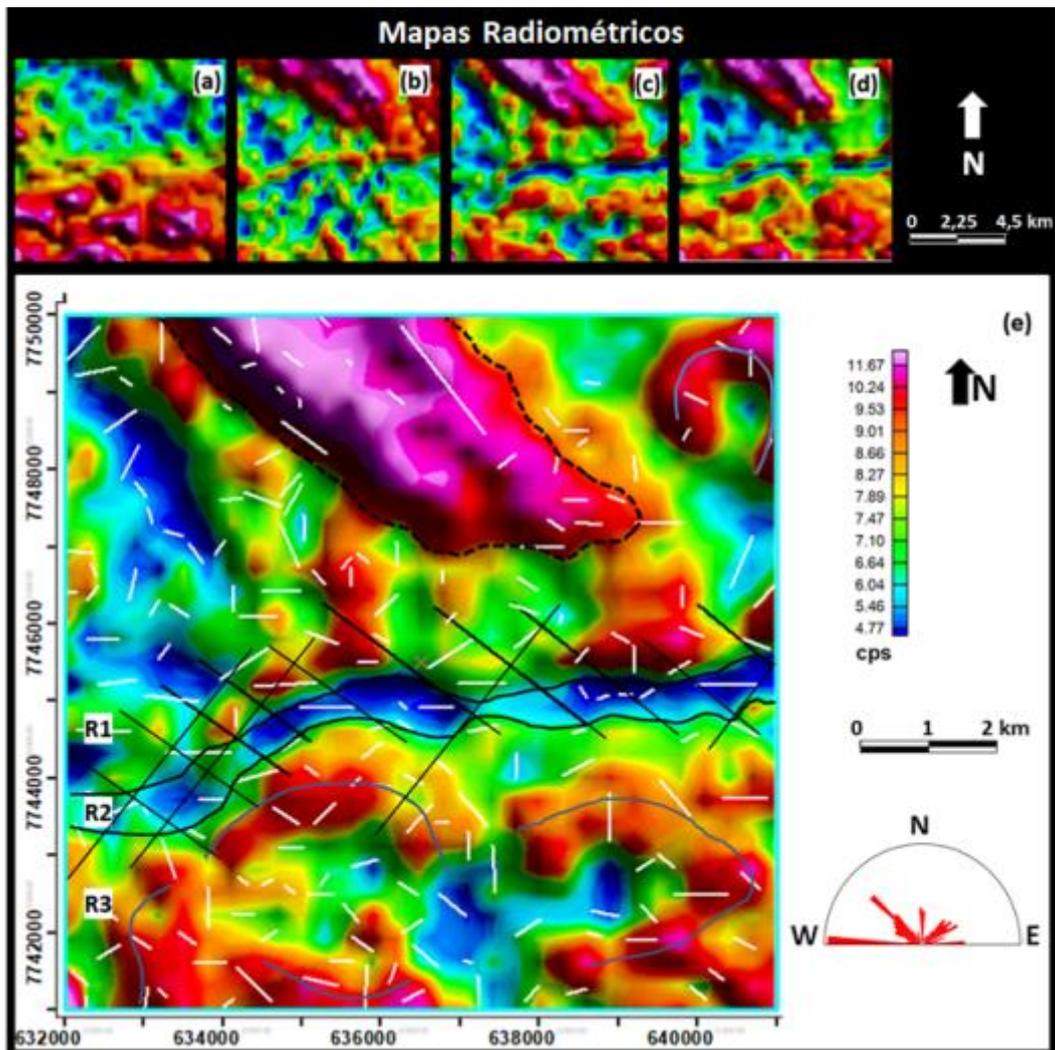


Figura 6. Mapas radiométricos: a) Canal de Potássio ^{40}K ; b) Canal de Urânio ^{238}U ; c) Canal de Tório ^{232}Th ; d) Contagem total; e) Radiofácies (delineamentos negros) e lineamentos radiométricos interpretados (brancos) e sobrepostos ao mapa Canal de Tório ^{232}Th . Verificam-se inflexões (lineamentos pretos) orientadas SE-NW e SW-NE, na radiofácies R2. Ressalta-se uma anomalia (traço descontínuo) de grande comprimento e largura, com valores superiores a 9,53 cps, orientada SE-NW, dentro da área abrangida pela radiofácies R1. São interpretados dobramentos (traços em azul) na área abrangida pela radiofácies R3.

4.5. Aspectos Quantitativos das Fácies Geofísicas

Radiofácies e magnetofácies de mesmo índice (1, 2 e 3), relacionam-se aos mesmos domínios morfo-litológicos (Tabela 1). Constata-se que os lineamentos discriminados nos métodos associados a estas fácies, orientam-se em direções similares e em conformidade aos produtos da Gravimetria, bem como, os dobramentos interpretados por meio da Magnetometria, são verificados com maior nitidez nos mapas radiométricos.

Tabela 1. Caracterização quantitativa das magnetofácies (com base na filtragem d^2z) e das radiofácies e relação com os domínios morfo-litológicos.

Magnetofácies ($\times 10^{-3}$ nT/m ²)	M1	M2	M3
	> -0,81 e < 0,71	< -6,00 e > 1,48	> -6,00 e < 1,48
Radiofácies	R1	R2	R3
²³² Th (cps)	> 7,47 e < 6,04	< 6,64	> 6,64 e < 10,24
²³⁸ U (cps)	> 3,00	> 2,14 e < 3,00	< 2,14
⁴⁰ K (cps)	< 0,32	> 0,38 e < 1,38	> 1,00
Contagem total (cps)	> 12,89 e < 10,37	< 10,89	> 10,89 e < 17,51
Porção da área de estudo	Norte	Central	Sul
Domínio morfo-litológico	DM1 e DM2	DM3	DM4

4.6. Aspectos sobre Drenagem e Elevação

Sobre o mapa de drenagem (Figura 7), foram traçados os lineamentos que representam os seus cursos. Observa-se o forte *trend* na direção 40° a 55°NW e, subordinadamente, 35° a 50°NE, E-W e N-S. Ressalta-se que no domínio DM4, é verificado o alinhamento de alguns cursos ao longo de dobramentos interpretados por meio da geofísica. Esses resultados são semelhantes aos *trends* no mapa de elevação.

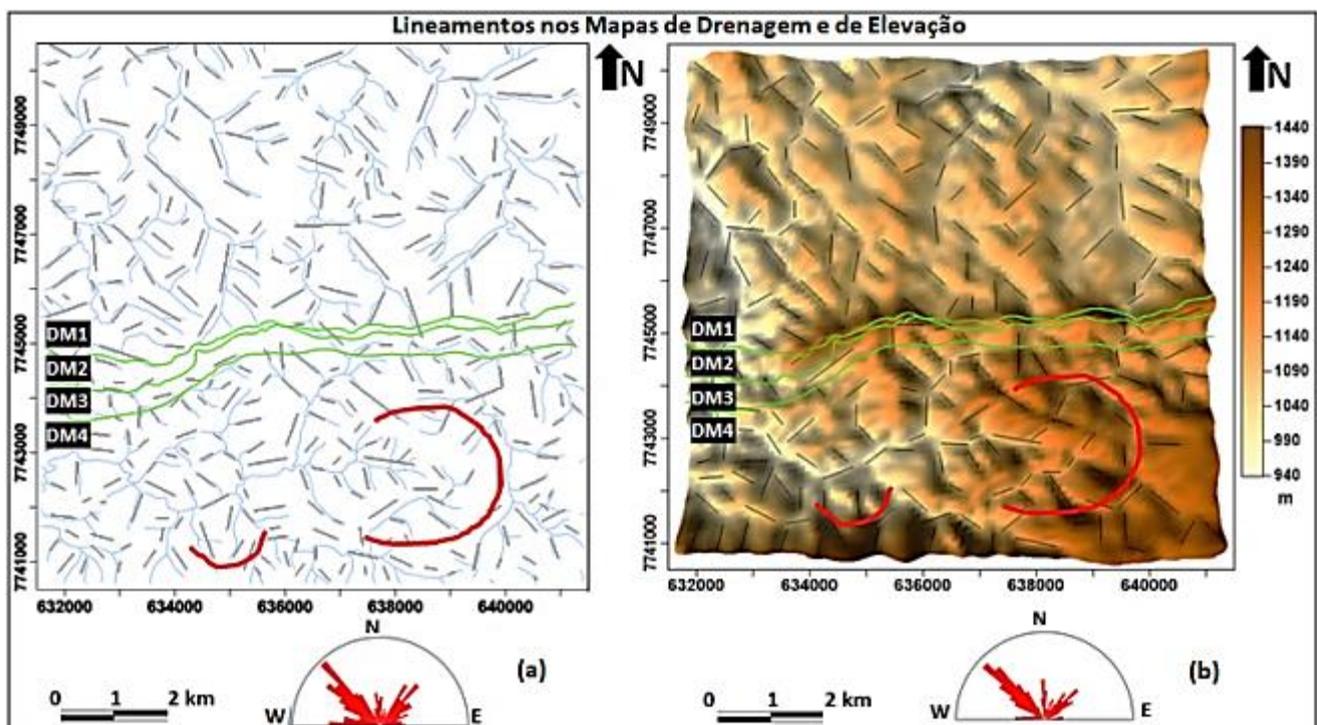


Figura 7. a) Discriminação de lineamentos que representam os cursos de drenagem superficial. Notam-se no domínio DM4, alguns cursos orientados ao longo de alguns dobramentos (vermelhos) interpretados por geofísica. b) Discriminação de lineamentos no modelo digital de elevação e indicação dos dobramentos (vermelhos).

4.7. Análises de Campo

Foram aferidas nos domínios DM1 e DM4, no total, 390 direções da foliação dominante (xistosidade ou bandamento gnáissico) e 289 de fraturas, sendo apresentadas em diagramas de rosetas na Figura 8.



Figura 8. Diagramas de rosetas com distribuição das direções das principais estruturas planares (foliações e fraturas) na área de estudo: a) foliações no domínio DM1; b) foliações em DM4; c) fraturas em DM1; d) fraturas em DM4.

As distribuições das fraturas dos domínios DM1 e DM4 são similares e, em conjunto, orientam-se, preferencialmente, nas direções 45° a 60°NW e 45° a 60°NE e, subordinadamente, E-W e N-S. Portanto, há confirmação em campo das respostas e interpretações geofísicas relacionadas a essas estruturas, e são discriminadas na Tabela 2, as características de seis famílias principais: J1, J2, J3, J4 e J5.

Tabela 2. Características das principais famílias de fraturas levantadas em campo.

Família	Atitude	Espaçamento médio (m)	Abertura média (mm)	Observações
J1	N45°E / 75°NW	0,80	> 5	Preenchimento com material argiloso
J2	N50°W / 70°NE	0,70	> 5	Preenchimento com material argiloso
J3	E-W / 30°N	0,50	≤ 3	Faces rugosas
J4	N55°W / 60°SW	0,70	≤ 2	Faces rugosas
J5	N-S / 55°W	0,04	Fechada	Associada, principalmente, a dobramentos

A direção preferencial da foliação das rochas do domínio DM1 segue a orientação preferencial 50° a 60°NW. Por outro lado, a direção das foliações no domínio DM4 varia muito, não exibindo orientação preferencial regional. Isto é explicado pela ocorrência de dobramentos nos filitos, que atingem quilômetros, como observado nas anomalias magnéticas e radiométricas (em M3 e R3) na Figura 9, onde se constata feições erosivas distribuídas ao longo deles. Observam-se também, as distribuições dos lineamentos geofísicos e das feições erosivas, bem como afloramentos com as feições estruturais (fraturas, falhas e dobras). As distribuições das direções dos lineamentos geofísicos e das feições erosivas são similares, abrangendo uma faixa de 45° a 60°NW. Dentro desta faixa, ressalta-se o *trend* mais forte na direção 45°NW dos lineamentos magnéticos.

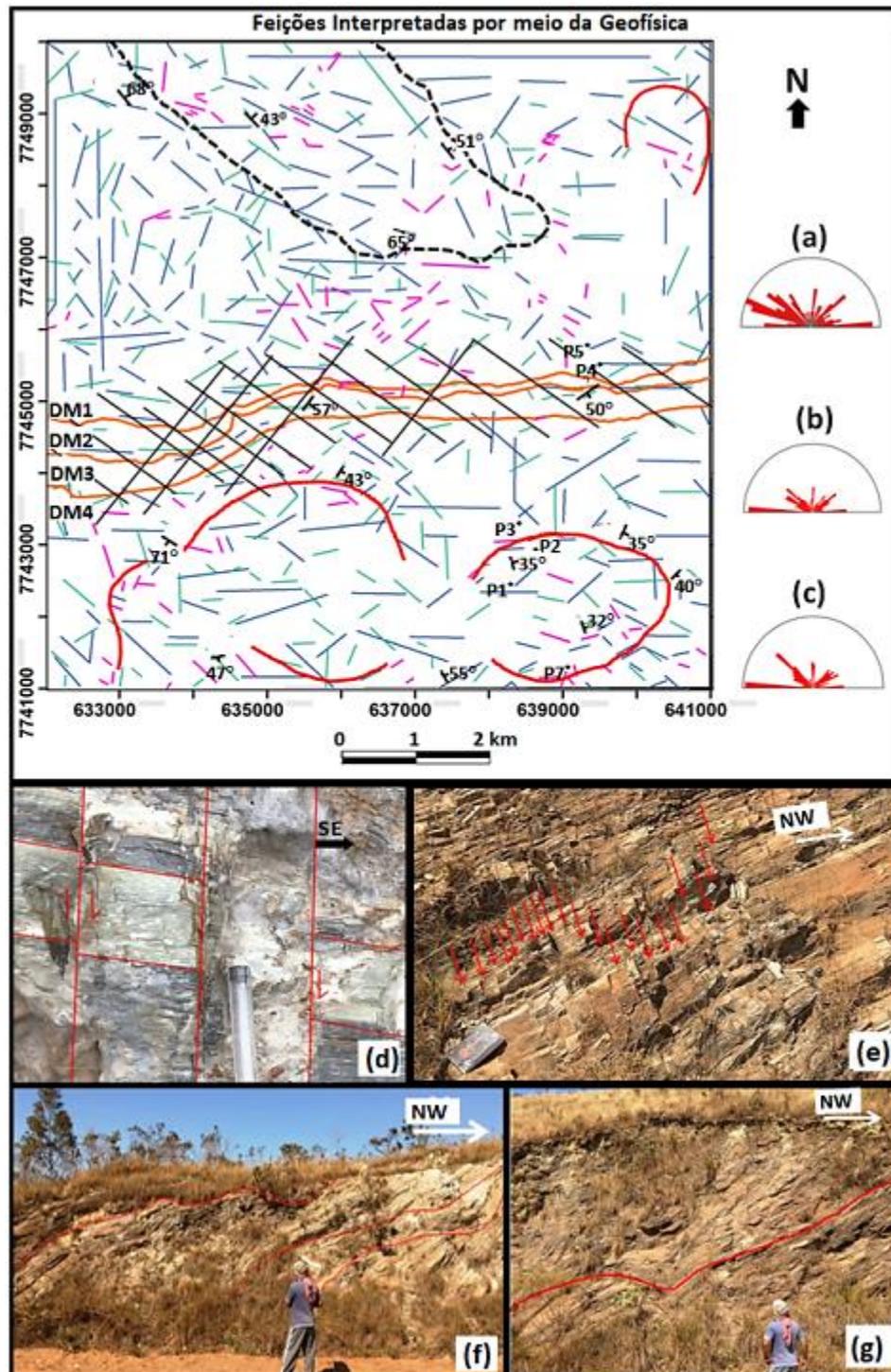


Figura 9. Mapa com as feições geofísicas interpretadas - lineamentos magnéticos (azul) e radiométricos (verde), falhas (negro), indicação de dobramentos (vermelho) e anomalia radiométrica (delineamento descontínuo); lineamentos que representam as feições erosivas (púrpura); domínios morfo-litológicos e pontos (P1, P2, P3, P4 e P5) onde foram registrados os detalhes litoestruturais. Diagramas de rosetas com distribuição da frequência dos lineamentos - feições erosivas (a), lineamentos magnéticos (b) e radiométricos (c), e afloramentos de filito com falhas de rejeito direcional e movimentação dextral em P1 (d) e fraturas em P3 (e), caracterizando as falhas interpretadas, e com dobramentos em P3 (f e g).

Em afloramentos de gnaisses e granitoides, as famílias de fraturas são bem visíveis, mas há dificuldades em observá-las nas voçorocas associadas a essas rochas. Por outro lado, nas voçorocas associadas aos filitos, todo o arcabouço estrutural é bem visível. A família de fraturas mais observada é a J1 e suas características (Tabela 2),

contribuem para instabilizar os maciços. Quando interceptada por outras famílias como J2, propicia rupturas em cunha, o que é verificado em vários locais. Ressalta-se que a família J5, embora menos espaçada, influencia pouco isoladamente, pois suas fraturas são fechadas, bem como, são observadas em poucos afloramentos. A análise integrada de imagens de satélite e dados estruturais de campo possibilitou identificar características particulares das voçorocas que se desenvolvem nos filitos da Formação Cercadinho (DM4) daquelas que ocorrem no Complexo Bação (DM1) (Figuras 10 e 11). O controle estrutural é muito mais pronunciável nas voçorocas que ocorrem no manto intempérico dos filitos. Os planos de fraturas são bem visíveis até mesmo nas porções em que se observam níveis mais avançados de alteração. São bem visíveis nos sulcos de erosão, os planos de fratura pelos quais eles avançam.



Figura 10. Comparação entre os tipos de voçorocas de acordo com a litologia: a) voçoroca típica associada a gnaisses e granitoides do Complexo Bação (localização: 636490 m E, 7746100 m S), caracterizada por coloração rósea, direção do eixo maior coincidindo com a direção da foliação (F) e inúmeros sulcos de erosão, alguns paralelos (setas laranjas) ao eixo maior (seta azul) e outros em outras direções (setas brancas) implicando no avanço lateral da erosão. b) voçoroca típica associada aos filitos da Formação Cercadinho (localização: 639060 m E, 7744500 m S), caracterizada por coloração cinza / prateada, direção do eixo maior coincidindo com o mergulho da foliação (F) e inúmeros sulcos de erosão laterais controlados por famílias de fraturas, sobretudo, nas direções SE-NW (setas vermelhas) e SW-NE (brancas).

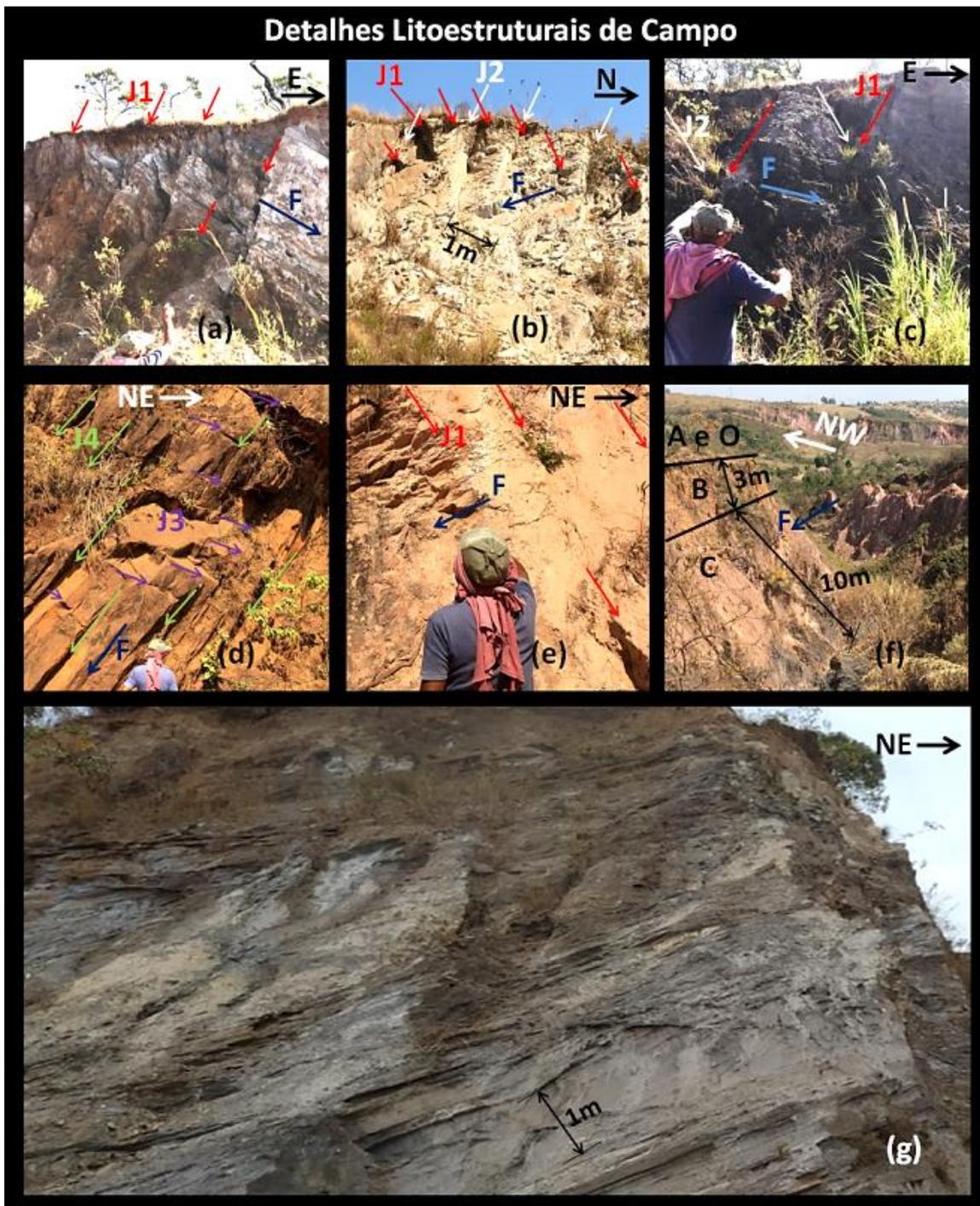


Figura 11. Apresentação de fraturas observadas no campo e comparação entre as voçorocas. As setas azuis, vermelhas, brancas, roxas e verdes representam, respectivamente, o plano de foliação (F) e o plano das fraturas J1, J2, J3 e J4. a) Ponto P1: J1 e F são bem visíveis no filito em estágio intermediário de intemperização, sendo observado o desenvolvimento em avanço dos sulcos de erosão. b) Ponto P3: observam-se rupturas em cunha pela interseção de J1, J2 e face do talude de filito, o que contribui ao avanço lateral da feição erosiva. c) Ponto P2: nível avançado de intemperização em filito, em que há dificuldade em discriminar F, mas é bem visível o avanço da erosão preferencialmente na direção de interseção entre J1 e J2. d) Ponto P4: gnaissse altamente fraturado situado à montante de uma voçoroca. Observa-se que, além da ocorrência de J3, J4 ocorre paralelamente a F. e) Ponto P5: gnaissse em estágio intermediário de intemperização, sendo possível identificar F e algumas fraturas J1 com dificuldade. f) Ponto P5: voçoroca em manto intempérico de gnaissse, onde se observa F com dificuldade no horizonte C (cor rosa), altamente erodível, e com sulcos de erosão paralelos entre si e oblíquos ao eixo maior, bem

como, o horizonte laterítico B (cor laranja) e os horizontes A não distinguível do orgânico (O) neste nível de escala.
g) Ponto P7: registro da erosão diferencial seguindo os planos de fraqueza no saprolito de filito.

5. Discussão

Os lineamentos gravimétricos alinhados na direção SE-NW paralelamente ao eixo axial do Anticlinal de Mariana são claramente visíveis com os filtros dz (Figura 4e) e dx (Figura 4d), e mais detalhados no mapa residual (Figuras 4f e 4g). Interpretam-se como resposta da foliação regional oriunda da evolução do Anticlinal. Em todos os mapas *Bouguer*, sobretudo no original (Figura 4b), é bem visível a estruturação do Sinclinal Moeda, e sua inflexão na direção SW-NE, fazendo limite com a porção oeste do Complexo. Interpreta-se que a inflexão, associada a falhas de cavalgamento, reflete a ocorrência dos lineamentos gravimétricos orientados nessa direção. Alguns lineamentos orientados N-S são interpretados como sendo a resposta da nucleação do Sinclinal. O filtro dy (Figura 4c) permite identificar lineamentos alinhados na direção E-W (paralelamente ao eixo axial do Sinclinal Dom Bosco), sobretudo nas proximidades do limite entre o embasamento e as supracrustais a sul. Interpreta-se que esses lineamentos representam a resposta da deformação rúptil nessa direção.

O destaque na Magnetometria são as anomalias de grande comprimento na porção central que apresenta os mais altos valores ($> 1,48 \times 10^{-3} \text{ nT/m}^2$) e os mais baixos também ($< 2,25 \times 10^{-3} \text{ nT/m}^2$) (Figura 5g). Além disso, ela está alinhada na direção E-W e são identificadas descontinuidades orientadas na direção SE-NW. Nos mapas de Amplitude do Sinal Analítico (Figuras 5b), dx (Figura 5d) e, subordinadamente, dz (Figura 5c), observa-se a extensão dessas descontinuidades para além dessa anomalia. Nesse sentido, as grandes extensões e os rejeitos aparentes sugerem falhas altamente pronunciáveis na serra de formações ferríferas (domínio DM3), relacionadas à magnetofácies M2 (Figura 5g), consistindo na resposta dipolar do campo magnético terrestre, uma vez que, mesmo que o mapa tenha sido filtrado, o mapa original, de campo total, tem natureza dipolar.

Como as rochas do Complexo Bação (gnaiesses e granitoides) não possuem conteúdo significativo de minerais com propriedades magnéticas em sua constituição, a resposta da magnetofácies M1 (Figura 5g), relaciona-se às estruturas, pois nelas ficam registradas as magnetizações deixadas pelos fluidos enriquecidos em ferro que as percolam. Os xistos do Supergrupo Rio das Velhas manifestam esta mesma resposta magnética. Por outro lado, a magnetofácies M3 (Figura 5g) reflete, além das estruturas no domínio DM4, as respostas das intercalações dos quartzitos ferruginosos. Ressalta-se, também, além de feições estruturais lineares, a interpretação de dobramentos de ordem quilométrica.

Os mapas (Figuras 4 e 5) sem as filtragens dos gradientes verticais apresentam anomalias de várias profundidades e, após as filtragens dz e d²z para avaliar profundidades menores, suas orientações alteraram pouco, implicando que as estruturas geradoras das anomalias manifestam-se em rochas aflorantes e subaflorantes e suas raízes são profundas. Os contrastes entre os valores das anomalias nas radiofácies (Figura 6 e Tabela 1) implicam na variação da argilosidade (COSTA et al., 2008; ELLIS e SINGER, 2008; FERREIRA et al., 2010), refletindo a formação de argilo-minerais neoformados da alteração dos silicatos das rochas do embasamento e da sequência supracrustal, pelo conteúdo de argilo-minerais dos filitos e pela concentração desses minerais e dos radioelementos, principalmente nas maiores elevações (Figura 7b) onde os valores de emissão Gama dos três radioelementos em R3 são mais altos. Os altos estruturais dos dobramentos registram os altos valores. Por outro lado, as anomalias com valores altos em locais com elevações menores, o que é observado principalmente em R1, implicam na mobilização dos argilo-minerais para os entalhes de relevo e preenchimento de fraturas. Como as anomalias radiométricas manifestam os mesmos padrões de forma e de orientação das anomalias dos outros métodos, significa que as estruturas interpretadas nos últimos propagam-se pela rocha até o saprolito, preservando-se parcialmente nele, como confirmado em campo.

Ressalta-se que na radiofácies 1 (figura 6e), nos mapas canal de Urânio ²³⁸U e Tório ²³²Th e Contagem Total, observa-se uma anomalia alinhada na direção SE-NW, de grande comprimento e largura, apresentando altos valores (representados pelas cores vermelho forte e magenta). Interpreta-se que a baixa mobilidade desses radioelementos é devido à retenção por minerais de argila nos mantos intempéricos e o controle estrutural nesta direção influenciando a mobilidade, os concentraram na porção onde ocorre a anomalia. Ressalta-se também que nesta mesma porção ocorre uma anomalia gravimétrica (Figura 4) que realça o condicionamento estrutural.

Como a estrutura regional que contextualiza a área de estudo (Figura 2a), o Sinclinal Dom Bosco, tem eixo axial orientado E-W que também é a direção de falhas transcorrentes na região como o contato tectônico do

embasamento com as supracrustais, esperava-se que o padrão geomorfológico e estrutural regional se manifestasse preferencialmente nessa direção. Porém, os lineamentos interpretados com outras orientações são paralelos a estruturas adjacentes, Anticlinal de Mariana e Sinclinal Moeda, sendo identificados nos mapas gravimétricos e se repetindo em escala de detalhes 10 vezes maior nos outros mapas geofísicos. Sobre os lineamentos de *trend* SE-NW, paralelos ao Anticlinal de Mariana, de nucleação Proterozoica, interpreta-se como sendo estruturas antigas e que podem estar em processo de reativação, em análise às observações de Campos (2006) sobre neotectônica. Esse processo refletiria o padrão da rede de drenagem (Figura 7a) que também apresenta esse *trend* como o preferencial e, juntamente ao *trend* SW-NE, leva à interpretação de que ocorre forte controle litoestrutural nas orientações dos cursos principais de drenagem. Isto se relaciona diretamente ao desenvolvimento das voçorocas do Complexo Bação nas cabeceiras de drenagem, confirmando regionalmente os resultados dos estudos locais (BACELLAR, 2000; MORAIS, 2003; CAMPOS, 2006), bem como mostrando analogia às interpretações geofísicas de Onu et al. (2012).

O forte *trend* SE-NW observado nas distribuições de frequência dos lineamentos magnéticos (Figura 5g) e radiométricos (Figura 6e) e os registros de campo (Figuras 9d e 9e) confirmam as falhas previamente interpretadas por BACELLAR (2000). Os grandes dobramentos interpretados (Figuras 5g e 6e) e o desenvolvimento de voçorocas ao longo deles (Figura 9), bem como o condicionamento da drenagem (Figura 7a) e do relevo (7b) confirmariam as interpretações geofísicas sobre o condicionamento parcial por paleoformas de relevo (ARANHA, 2002). Ao passo que Ribeiro (2016) evidencia o condicionamento litoestrutural de apenas uma voçoroca no contexto geológico regional, nesta pesquisa são evidenciados os padrões de condicionamento estrutural regional de desenvolvimento de várias voçorocas, no contexto que envolve o arcabouço de todo Quadrilátero Ferrífero, utilizando a mesma metodologia de discriminação de fácies e de identificação de lineamentos.

O condicionamento estrutural nas voçorocas reflete na paisagem. As faces das encostas no domínio DM4 são modeladas pelos movimentos de massa como ruptura em cunha, tombamento e escorregamentos, o que também é observado em voçorocas associadas a rochas e áreas similares (PIMENTEL et al., 2005). Comparativamente às voçorocas de DM1, o controle estrutural nas de DM4 é mais pronunciável, pois além de influenciar a direção de desenvolvimento do eixo maior das últimas, também modela a forma delas (Figura 10). O intemperismo acentuado pelo clima tropical nas zonas de fraqueza (Figura 11) favorece as rupturas e a erosão dos sulcos e ravinas. Observa-se em campo que, pelo fato dos morros meia-laranja (DM1) e serras escarpadas (DM2, DM3 e DM4) serem controlados pelos mergulhos das rochas, as declividades das encostas ficam suscetíveis aos movimentos de massa, corroborando a influência do relevo nos padrões regionais (VANMAERCKE et al., 2020), bem como, suas considerações quanto à influência do clima, visto que na área de estudo o clima tropical favorece a alteração nos planos de fraqueza em função das respostas ao intemperismo dos gnaisses (DM1) e dos filitos (DM4), conferindo aos planos, ângulos de atrito relativamente baixos. A erosão diferencial modela as encostas das voçorocas em DM4 corroborando Varajão (1991). Ela ocorre em função das intercalações de quartzito ferruginoso com os filitos e segundo às variações das respostas ao intemperismo dos filitos e, inclusive, segue os planos da foliação metamórfica e da laminação sedimentar preservada (Figura 11).

Nas voçorocas associadas aos gnaisses e granitoides, as estruturas remanescentes das rochas matrizes são pouco visíveis no saprolito (Figuras 11e e 11f), pois a erosão as oblitera. Em algumas porções, os planos de foliação (bandamento) são observados com dificuldade. A hipótese é que, como se observam sulcos de erosão oblíquos ao eixo maior das voçorocas, certamente avançam aproveitando planos de fraturas, como verificado nas voçorocas associadas aos filitos e considerando também as interpretações de Bacellar (2000). Ressalta-se que a família J4 (Figura 11d) ocorre concordantemente ao bandamento dos gnaisses. Essa combinação acentua ainda mais o controle estrutural nas voçorocas, na direção SE-NW.

6. Conclusões

Por meio dos métodos geofísicos utilizados nesta pesquisa, alcançaram-se bons resultados e a confiabilidade das interpretações são comprovadas pela: fundamentação na literatura; validação de campo; análise dos contrastes nas propriedades físicas das rochas, como considerado em estudos geofísicos similares; replicação parcial da metodologia de discriminação de fácies e lineamentos geofísicos em estudo sobre condicionamento geológico de voçorocas.

Interpretações de anomalias gravimétricas mostram no arcabouço estrutural do Complexo Bação e adjacências a sul, a influência do Anticlinal de Mariana e do Sinclinal Dom Bosco nos *trends* SE-NW e E-W, respectivamente, e do Sinclinal Moeda, nos *trends* SW-NE e N-S. Tal influência reflete no condicionamento das voçorocas, sobretudo, na direção SE-NW.

Os lineamentos magnéticos e radiométricos interpretados concentram-se em direções bem definidas, sobretudo, na direção 45° a 60°NW, o que é similar à distribuição das direções preferenciais das feições erosivas levantadas e das estruturas aferidas em campo. Analogamente, há similaridade nas direções E-W e 45°NE, também. Em adição, uma anomalia alongada e orientada na direção E-W, que faz a interface do contato tectônico entre o embasamento cristalino e as supracrustais, apresenta inflexões orientadas nas direções SE-NW e SW-NE, que se estendem para outras porções da área de estudo e que são interpretadas como falhas. A geometria da rede de drenagem e da topografia reflete o arcabouço estrutural geral da área de estudo e, conseqüentemente, contribuem para a distribuição e direção de desenvolvimento das voçorocas.

O controle estrutural é mais pronunciável nas voçorocas que ocorrem no manto intempérico dos filitos. Os sulcos de erosão se desenvolvem na interseção e ao longo dos planos de fratura e de foliação. Dobramentos quilométricos fazem com que a direção das foliações varie muito, refletindo nas direções de desenvolvimento das voçorocas. O avanço da erosão obliquamente aos canais principais se dá seguindo o *trend*, sobretudo, de famílias de fraturas com direções SW-NE e SE-NW, e forte mergulho, respectivamente, para NW e NE.

Nas voçorocas associadas aos gnaisses e granitoides, as estruturas remanescentes das rochas matrizes são pouco visíveis no saprolito. A hipótese é que, como se observa a ocorrência de sulcos de erosão obliquamente ao eixo maior, certamente, eles avançam aproveitando os planos das fraturas, analogamente aos filitos. Por outro lado, famílias de fraturas são observadas nos afloramentos de rocha, o que inclui, além das mencionadas anteriormente, as de direção E-W e mergulho suave para norte, e as fraturas concordantes à foliação seguindo a direção SE-NW.

A análise multiescalar dos lineamentos estruturais comprova a existência de padrões estruturais regionais cujos *trends* se repetem em escalas locais, que controlam as orientações preferenciais de desenvolvimento das voçorocas. Portanto, acredita-se que esta pesquisa seja relevante para subsidiar estudos de intervenções e monitoramento geotécnico nas estruturas discriminadas e, considerando o histórico de problemas de voçorocamento no meio urbano que têm perdurado décadas na região, recomenda-se a integração de geofísica local para: levantar informações sobre a dinâmica hídrica e o contato da rocha e seu manto intempérico; mapear, localmente, os planos das fraturas, inclusive, sua persistência, e analisar a relação deles com os sulcos de erosão; realizar análises cinemáticas locais, uma vez que a direção e inclinação das encostas nos filitos variam muito, para predição de movimentos de massa em locais específicos que comprometam a segurança das moradias ao entorno.

Contribuições dos Autores: L.H.C. participou integralmente de todas as etapas deste artigo. L.A.P.B. participou da revisão geral e final e, parcialmente, da construção do corpo do artigo. A.L.S.M. participou do processamento de dados geofísicos e, parcialmente, da construção do corpo do artigo. D.O.B. contribuiu com o processamento de dados geofísicos.

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento externo.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e à sua Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPI) por ter propiciado a execução do projeto de iniciação científica (EDITAL PIVIC-1S/UFOP N° 11/2018) do qual se gerou o presente artigo. Eles agradecem também à empresa Seequent pela disponibilização gratuita do *software* de processamento de dados geofísicos, ao pai do primeiro autor pelo auxílio aos trabalhos de campo, e ao corpo de revisores e editorial desta revista pelas recomendações e correções que enriqueceram o trabalho.

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

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**, v. 90, p. 29-58, 1998.
2. ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1984. 378p.

3. ARANHA, P. R. A. **Estudo das coberturas superficiais e sua dinâmica na região de Gouveia, serra do Espinhaço, MG: utilizando o radar de penetração no solo (GPR)**. Ouro Preto, Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Energéticos) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2002. 258p.
4. AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Piping em área de voçorocamento, noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, p. 9-18, 2006.
5. BACELLAR, L. A. P. **Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na Bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, M.G.** Tese (Doutorado em Ciências) - Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2000. 226p.
6. BACELLAR, L. A. P.; COELHO NETO, A. L.; LACERDA, W. A. Controlling factors of gulling in the Maracujá Cachment, Southeastern Brazil. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, p. 1369-1385, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1193>
7. BALTAZAR, O. F.; ZUCCHETTI, M. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits. **Ore Geology Reviews**, 2005. 62 p.
8. BELAYNEH, M.; YIRGU, T.; TSEGAYE, D. Current extent, temporal trends, and rates of gully erosion in the Gumara watershed, Northwestern Ethiopia. **Global Ecology and Conservation**, v. 24, e01255, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01255>
9. BERNATEK-JAKIEL, A.; KONDRACKA, M. Combining geomorphological mapping and near surface geophysics (GPR and ERT) to study piping systems. **Geomorphology**, v. 274, p. 193-209, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.09.018>
10. BURIAN, L.; ŠUJAN, M.; STANKOVIANSKY, M.; ŠILHAVÝ, J.; OKAI, A. Dependence of Gully Networks on Faults and Lineaments Networks, Case Study from Hronská Pahorkatina Hill Land. **Open Geosciences**, v. 9, p. 101-113, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1515/geo-2017-0008>
11. CAMPOS, M. I. B. **Caracterização da deformação frágil e sua relação com os processos de voçorocamento na porção sudeste do Complexo Metamórfico Bação – Quadrilátero Ferrífero, MG.** Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Energéticos) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2006. 153p.
12. CARNEIRO, M. A.; TEIXEIRA, W.; CARVALHO JÚNIOR, I. M.; FERNANDES R. A. Ensalic tectonic setting of the Archean Rio das Velhas Greenstone Belt: Nd and Pb isotopic evidence from the Bonfim Metamorphic Complex, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 2, p. 189-200, 1998. DOI: [10.25249/0375-7536.1998189200](https://doi.org/10.25249/0375-7536.1998189200)
13. CARRAZZA, L. P. **Identificação de cavidades em voçoroca por meio da aplicação do método geofísico da eletroresistividade.** Dissertação (Mestrado em Geociências) -. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2016. 64p.
14. CARVALHO, T. R. R. C.; SOBREIRA, F. G. Suscetibilidade a processos geodinâmicos e aptidão à urbanização na bacia do rio maracujá, Ouro Preto, MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 2, p. 373-389, 2015.
15. CASTILLO, C.; PÉREZ, R.; VALLEJO-ORTI, M. The impact of recent gully filling practices on wheat yield at the Campiña landscape in Southern Spain. **Soil and Tillage Research**, v. 212, 105041, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105041>
16. COSTA, A. C. S; TORINO, C. A; RAK, J. G. Capacidade de troca catiônica dos colóides orgânicos e inorgânicos de latossolos do Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 21, n. 3, p. 491-496, 2008. DOI: [10.4025/actasciagron.v21i0.4262](https://doi.org/10.4025/actasciagron.v21i0.4262)
17. DESCLOITRES, M.; RIBOLZI, O.; TROQUER, Y. Study of infiltration in a Sahelian gully erosion area using time-lapse resistivity mapping. **Catena**, v. 53, n. 3, p. 229-253, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00038-9).
18. DORR, J. V. N. **Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.** Washington: Geological Survey Professional Paper, 1969. 110p.

19. DRUMMOND, F. N.; BACELLAR, L. A. P. Caracterização hidrossedimentológica e dos processos evolutivos de voçoroca em área de rochas gnáissicas do Alto Rio Das Velhas (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano 7, n. 2. p. 87-96. 2006. DOI: 10.20502/rbg.v7i2.81
20. ELLIS, D. V.; SINGER, J. M. **Well Logging for Earth Scientists**. Second ed. The Netherlands: Springer, 2008. 692 p.
21. ENDO, I. **Regimes tectônicos do arqueano e proterozóico no interior da placa sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais**. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1997. 243p.
22. ENDO, I.; FONSECA, M. A. Sistema de cisalhamento Fundão-Cambotas no Quadrilátero Ferrífero, MG: geometria e cinemática. **Revista Escola de Minas**, v. 45, n. 1, p. 15-17, 1992.
23. FERREIRA, F. J. F.; CANDIDO, A. G.; ROSTIROLLA, S. P. Correlação gamaespectrométrica de afloramentos e poços: estudo de caso na Formação Ponta Grossa (Bacia do Paraná, Brasil). São Paulo. **Revista Brasileira Geofísica**, v. 28, n. 3, p. 371-396, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2010000300005>
24. GEOSOFT / SEEQUENT. **Oasis Montaj (versão 9.8.1)**. 2020.
25. GOLDEN. **Surfer (versão 9.11.947)**. 2021. Disponível em: <<https://www.goldensoftware.com/products/surfer/trial>>.
26. GOOGLE EARTH. 2019. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/place/Cachoeira+do+Campo,+Ouro+Preto+-+MG,+35400-000/@-20.3493745,-43.6811939,2796m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0xa407a544033999:0x8b24a102c66d50a5!8m2!3d-20.3493952!4d-43.6724391>>. Acesso em: 21 Jun/2019.
27. HAYAS, A.; VANWALLEGHEM, T.; LAGUNA, A.; ACEVEDO, A. P.; GIRÁLDEZ, J. V. Reconstructing long-term gully dynamics in mediterranean agricultural areas. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, p. 235–249, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-235-2017>
28. INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. 2021. <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>>. Acesso em: 05 Jul/2021.
29. IONITA, I. Gully development in the Moldavian Plateau of Romania. **Catena**, v. 68 n. 2–3, p. 133-140, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.008>
30. KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. Blackwell Science Publishing, 2002. 262 p.
31. KRÁLIKOVÁ, S.; HÓK, J.; VOJTKO, R. Stress change inferred from the morphostructures and faulting of the Pliocene sediments in the Hronská pahorkatina highlands (Western Carpathians). **Acta Geologica Slovaca**, v. 1, p. 17-22, 2010.
32. LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S.A. **Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos. Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais, Area 2 – Projeto Pitangui - São João del Rei - Ipatinga**. Secretaria de Estado de Minas e Energia – SEME – Governo de Minas Gerais, 2001. 81p.
33. LIPSKI, L. **Tectonismo Cenozoico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Energéticos) -. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2002. 171 p.
34. LOBATO, L. M.; BALTAZAR, O. F.; REIS, L. B.; ACHTSCHIN, A. B.; BAARS, F. J.; TIMBÓ, M. A.; BERNI, G. V.; MENDONÇA, B. R. V.; FERREIRA, D. V. 2005. **Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa**. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005. 268p.
35. 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, southeastern Brazil. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 141, n. 1, p. 259-276, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00054-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00054-4)

36. MAGALHÃES JR, A. P.; CHEREM, L. F.; BARROS, L. F. P.; SANTOS, G. B. OSL Dating of sediments from a mountainous river in southeaster Brazil: late Cenozoic tectonic and climatic implications. **Geomorphology**, v. 131, p. 132-155, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.05.008>
37. MORAIS, F. **Estudo dos processos erosivos subsuperficiais na bacia do rio Maracujá, MG**. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Energéticos) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2003. 98p.
38. NALINI JR, H. A. **Análise estrutural descritiva e cinemática do Flanco Sul e terminação periclinal do Anticlinal de Mariana e adjacências, região sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 1993. 132 p.
39. ONU, N.; OPARA, A. I.; EHIRIM, C. Delineation of Active Fractures in a Gully Erosion Area Using Geophysical Methods: Case study of the Okigwe-Umuahia Erosion Belt , Southeastern Nigeria. **International Journal of Science and Technology**, v. 2, p. 169-177, 2012.
40. OPEN STREET MAP (2020). Disponível em: <https://www.openstreetmap.org/search?query=cachoeira%20do%20campo#map=11/-20.2223/-43.6604>. Acesso em: 05 Jul/2020.
41. PIMENTEL, J.; ZAMPIER, C.; TEIXEIRA, F. M. S. **Projeto APA Sul RMBH: geotecnia, mapas geotécnicos escala 1:50.000**. SEMAD/CPRM, 2005. 111p.
42. POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, n. 2-4, p. 91-133, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)
43. RIBEIRO, E. C. S. **Análise geofísica aplicada a estudo da voçoroca na região da Chapada subdistrito de Ouro Preto, MG**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Geológica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2017. 85p.
44. ROSIÈRE, C. A.; RENGGER, F. E.; PIUZANA, D.; SPIER, C. A. Pico de Itabira, MG - Marco estrutural, histórico e geográfico do Quadrilátero Ferrífero. Disponível em: <http://sigep.cprm.gov.br/sitio042/sitio042.pdf>. Acesso em: 22 Set/2019.
45. SALGADO, A. A. R.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, C. A. C.; COLIN, F.; VARAJÃO, A. F. D. C.; NALINI JR., H. A. Relief evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil) by means of (¹⁰Be) cosmogenic nuclei. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 52, p. 317-323, 2008. DOI: 10.1127/0372-8854/2008/0052-0317
46. TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. Second ed. New York: Cambridge University Press, 1990. 774p.
47. TOPEX/POSEIDON. 1992. Disponível em: <http://topex.ucsd.edu>. Acesso em: 14 Jun/2019.
48. UHLEIN, A.; NOCE, C. M. Quadrilátero Ferrífero. In: HASUI Y.; CARNEIRO C. D. R; ALMEIDA F. F. de; BARTORELLI A. (org.) **Geologia do Brasil**. São Paulo: Editora Beca, 2012. p. 228-235.
49. VALADÃO, R. C. **Evolução de longo-termo do relevo do Brasil oriental (desnudação, superfícies de aplainamento e soerguimentos crustais)**. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1998. 243 p.
50. VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, p. 132-153, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
51. VANMAERCKE, M.; CHEN, Y.; GEETER, S.; POESEN, J.; CAMPFORTS, B. A first data-driven gully head density map of the world. A first data-driven gully head density map of the world, EGU General Assembly 2020, Online, EGU2020-9285. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9285>
52. VARAJÃO, C. A. C. A questão da correlação das superfícies de erosão do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 21, n. 2, p. 138-145, 1991.
53. XIA, J.; CAI, C.; WEI, Y.; WU, X. Granite residual soil properties in collapsing gullies of south China: spatial variations and effects on collapsing gully erosion. **Catena**, v. 174, p. 469-477, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.015>

54. XU, M.; LI, Q.; WILSON, G. Degradation of soil physicochemical quality by ephemeral gully erosion on sloping cropland of the hilly Loess Plateau, China. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 9-18. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.012>
55. YONG TECHNOLOGY INC. **GeoRose** (versão 0.3.0). 2020.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.