

Aplicação de Eletrorresistividade para Identificação de Zonas Saturadas em Área com Histórico de Instabilidade

Thayanne Barbosa Teixeira

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, thayanne.teixeira@aluno.edu.br

Luis de Almeida Prado Bacellar

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, bacellar@ufop.edu.br

RESUMO: O crescimento populacional e a ocupação desordenada do solo urbano intensificam os riscos geológico-geotécnicos, especialmente em áreas suscetíveis a movimentos de massa. Este trabalho tem como objetivo investigar o movimento de massa do tipo rastejo no distrito de Cachoeira do Brumado, em Mariana/MG, com foco na aplicação do método geofísico de eletrorresistividade. O rastejo caracteriza-se por um deslocamento lento, contínuo e imperceptível do solo ou detritos, tendo a presença de água como principal agente deflagrador. Para a investigação, foram realizados caminhamentos elétricos com arranjo Dipolo-Dipolo, utilizando o equipamento Lippmann 4point light 10W. As linhas foram posicionadas transversalmente e perpendicularmente ao sentido presumido do movimento. Os dados obtidos foram processados nos softwares Geotest e Res2DInv, que permitiram a construção de seções de resistividade elétrica. Os resultados indicaram padrões distintos de resistividade, com destaque para zonas de baixa resistividade associadas à presença de água e à direção do fluxo, sugerindo sua influência no movimento de rastejo. Para complementar os dados geofísicos e verificar a dinâmica do nível de água ao longo do tempo, foi instalado um piezômetro na porção central da área de estudo, cujas leituras indicaram a presença de um nível freático suspenso, corroborando a interpretação geofísica. Embora eficaz, a eletrorresistividade é um método indireto, sendo recomendada sua complementação com investigações diretas para maior detalhamento geotécnico.

PALAVRAS-CHAVE: Movimento de massa, Rastejo, Eletrorresistividade.

ABSTRACT: Population growth and disorderly urban land use intensify geological and geotechnical risks, especially in areas susceptible to mass movements. This study aims to investigate creeping mass movements in the Cachoeira do Brumado district of Mariana, Minas Gerais, focusing on the application of the geophysical method of electrical resistivity. Creeping is characterized by a slow, continuous, and imperceptible displacement of soil or debris, with the presence of water as the main trigger. For the investigation, electrical surveys were conducted with a dipole-dipole arrangement using a Lippmann 4point light 10W equipment. The lines were positioned transversely and perpendicularly to the presumed direction of movement. The data obtained were processed in Geotest and Res2DInv software, which allowed the construction of electrical resistivity cross-sections. The results indicated distinct resistivity patterns, with emphasis on low-resistivity zones associated with the presence of water and the flow direction, suggesting their influence on creeping movements. To complement the geophysical data and verify water level dynamics over time, a piezometer was installed in the central portion of the study area. Readings indicated the presence of a suspended water table, corroborating the geophysical interpretation. Although effective, electrical resistivity is an indirect method, and it is recommended that it be supplemented with direct investigations for greater geotechnical detail.

KEYWORDS: Mass movements, Creep, Electric resistivity.

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa consistem no deslocamento de solo, rocha e/ou detritos ao longo das encostas sob a ação direta da gravidade (Tominaga, 2015), sendo impulsionados por uma combinação de fatores geodinâmicos e ambientais. Condições naturais como a morfologia do terreno, o tipo de material que integra a massa envolvida e a intensidade das chuvas atuam como elementos desencadeadores, enquanto ações humanas — como o desmatamento, a ocupação desordenada e construções sem critérios técnicos —

contribuem para as modificações do terreno e afetam a estabilidade. Em áreas urbanas situadas em terrenos montanhosos ou acidentados, a ausência de planejamento geotécnico adequado agrava ainda mais a suscetibilidade aos movimentos de massa, comprometendo a segurança de edificações, vias e demais infraestruturas. Dentre os diferentes tipos de movimentos, o rastejo se destaca por ocorrer de forma lenta, contínua e quase imperceptível, envolvendo deformações progressivas em materiais superficiais (Augusto Filho, 1992).

O rastejo é comumente associado a mudanças milimétricas contínuas ao longo do tempo, que, embora de baixa velocidade, podem gerar efeitos cumulativos significativos, como trincas em edificações, pavimentos deformados, muros tombados e postes inclinados. A principal condicionante para a ativação e manutenção desse tipo de processo é a presença de água no solo, que altera a resistência cisalhante dos materiais e favorece a concentração de esforços internos. Variações no nível freático e em zonas de saturação são, portanto, elementos-chave para a compreensão e o monitoramento de áreas suscetíveis ao rastejo.

Nesse contexto, o uso de métodos geofísicos tem sido indicado como uma alternativa promissora para investigar uma subsuperfície de forma rápida, não destrutiva e economicamente viável. Dentre eles, o método da eletrorresistividade permite a identificação de variações na umidade do solo, camadas geológicas contrastantes e zonas potencialmente instáveis, a partir da medição da resistividade elétrica dos materiais. A abrangência do método permite sua aplicação em diferentes contextos geotécnicos, especialmente em áreas urbanas onde métodos invasivos podem ser limitados.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a aplicação da eletrorresistividade em uma área com histórico de instabilidade no distrito de Cachoeira do Brumado, município de Mariana/MG, a fim de identificar zonas saturadas que possam estar associadas a processos de rastejo. A investigação visa contribuir para a caracterização do ambiente geotécnico local e apoiar futuras medidas de monitoramento e mitigação de riscos.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo localiza-se no distrito de Cachoeira do Brumado, no município de Mariana (Figura 1), na porção centro-sul do estado de Minas Gerais, na região limítrofe entre o Cráton São Francisco e o Órogênio Araçuaí (CPRM, 1993). A área está situada cerca de 25 km do distrito-sede de Mariana e aproximadamente 135 km da capital Belo Horizonte.

O talude em estudo localiza-se na área urbana do distrito de Cachoeira do Brumado, próximo à Rua Tombadouro, na altura do número 41. O acesso à área se dá, a partir da sede do município, por aproximadamente 25 km. O trajeto inclui, inicialmente, o sentido sul pelas rodovias MG-129; em seguida, o sentido leste pelas rodovias BR 356 e MG 262, até o trevo do distrito de Cachoeira do Brumado; depois, a direção sul – sudeste por aproximadamente 5 km; e, por fim, o sentido sudoeste na Rua Tombadouro, até o número 41.



Figura 1. Localização do talude no Distrito de Cachoeira do Brumado, Mariana. Fonte: Adaptado de CPRM (2006), SEMAD (2022) e Google Earth (2024).

2.1 GEOLOGIA

Em termos litológicos, a área de estudo está localizada na região sob rochas do Complexo Mantiqueira e da Suíte Santa Rita de Ouro Preto.

Segundo Rocha (2011), o Complexo Mantiqueira é constituído por ortognaisses migmatíticos e polimetamórficos, com diferentes gerações de leucossoma. Apresenta intercalações de rochas metabásicas de dimensões e composições variadas, na forma de enclaves máficos alongados e boudins. Conforme este mesmo autor, também ocorrem rochas charnockíticas associadas aos ortognaisses, aparentemente intrusivas nestes, que são comumente cortadas por injeções tonalíticas de dimensões variadas e rochas metabásicas associadas, tanto na forma de boudins ou enclaves máficos.

De acordo com Endo *et al.* (2019a, 2019b), a Suíte Santa Rita de Ouro Preto é caracterizada por um magmatismo ultramáfico intrusivo nas unidades metassedimentares paleoproterozóicas, representadas por um batólito na região de Santo Antônio do Pirapetinga, e vários stocks e enxames de diques de orientação NW – SE, com extensões que variam de 2 km a 15 km. Gonçalves *et al.* (2011) descrevem que esses corpos apresentam feições de metamorfismo da fácies xisto-verde, cuja paragênese característica é: clorita \pm serpentina \pm talco \pm tremolita \pm carbonato. As principais rochas metaultramáficas são o esteatito (pedra-sabão) e o serpentinito (Jordt-Evangelista & Silva, 2005).

Com a interpretação de sondagens à percussão SPT realizadas na área, pela Prefeitura de Mariana, Rodrigues (2024) elaborou o perfil estratigráfico da área de estudo, conforme Figura 1 e Figura 2.

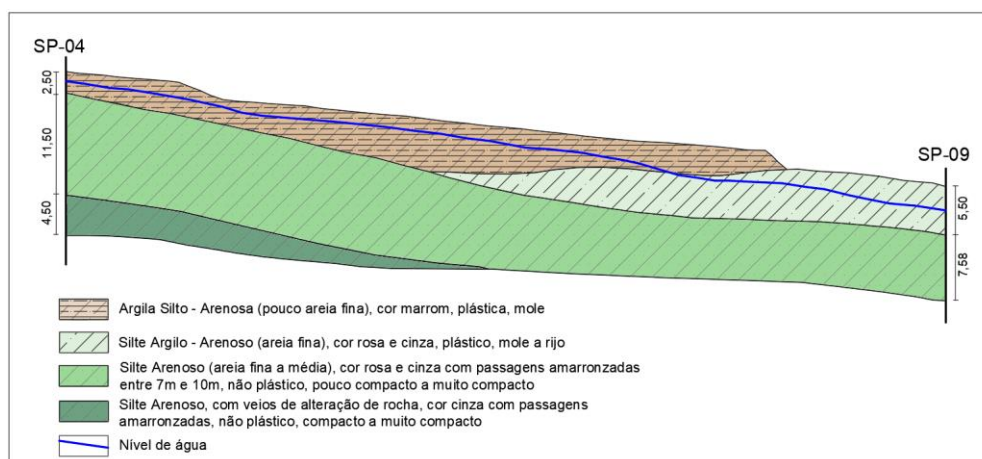


Figura 2. Perfil estratigráfico da área de estudo. Fonte: Modificado de Rodrigues (2024).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação geofísica foi conduzida com o objetivo de identificar zonas saturadas associadas ao movimento de rastejo na área de estudo, por meio da aplicação do método de eletrorresistividade. As investigações foram realizadas em julho de 2023 e abril de 2024.

Para a aquisição de dados, utilizou-se o resistímetro Lippmann 4point light 10W, equipamento portátil de alta sensibilidade. A instrumentação utilizada está representada na Figura 3, com destaque para o posicionamento dos cabos, eletrodos e resistímetro.



Figura 3. A) Seção teste realizada na UFOP; B) Seção realizada na área de estudo, paralela ao movimento.

Foi adotado o arranjo Dipolo-Dipolo, em que o espaçamento “x” entre os eletrodos de corrente (AB) é igual ao espaçamento entre os eletrodos de potencial (MN) (Braga, 2006). A profundidade de investigação cresce à medida que o par MN é deslocado ao longo da linha de investigação. O valor de resistividade elétrica aparente é medido em um ponto da subsuperfície situado na intersecção das retas que partem num ângulo de 45° do centro dos dipolos. O arranjo dipolo-dipolo apresenta boa resolução lateral e é amplamente utilizado em estudos geotécnicos, principalmente para identificação de zonas condutoras associadas à presença de água. Esse arranjo permite maior detalhamento horizontal das camadas e anomalias do subsolo, sendo apropriado para o reconhecimento de fluxos concentrados e discontinuidades em maciços. A distribuição teórica dos eletrodos nesse tipo de arranjo pode ser visualizada na Figura 4.

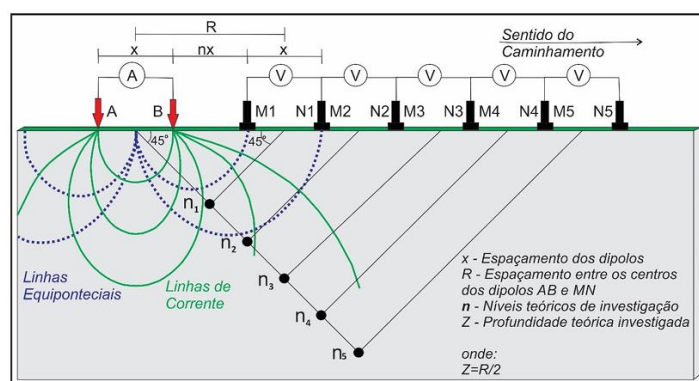


Figura 4. Técnica de Caminhamento Elétrico utilizando arranjo Dipolo-Dipolo. Fonte: Adaptado de Braga (2006).

Ao todo, este estudo apresenta 4 perfis geofísicos, dos quais dois foram realizados por Rodrigues (2024). Os perfis apresentados por Rodrigues (2024), foram realizados em julho de 2023, onde L1V apresenta espaçamento entre eletrodos de 2,5 m e comprimento total do perfil de 47,5 m e L3V, espaçamento entre eletrodos de 5 m e comprimento total do perfil de 60 m. A campanha para aquisição dos perfis deste estudo foi realizada em abril de 2024. Os perfis L2 e L3 possuem espaçamento entre eletrodos de 2,5 m e comprimento total do perfil de 47,5 m.

Os caminhamentos foram realizados em duas direções principais:

- Perpendicularmente ao sentido predominante do movimento de massa, com o objetivo de captar as variações laterais da resistividade;
- Paralelamente ao movimento, buscando detectar zonas de concentração de umidade e eventuais discontinuidades internas do maciço.

A disposição esquemática dos perfis na área de estudo pode ser observada na Figura 5.



Figura 5. Disposição das seções geofísicas na área de estudo. Fonte: Adaptado de Google Earth (2024).

Para a aquisição dos dados em campo, utilizou-se o software Geotest onde os valores de resistividade aparente foram organizados e verificados, o que permitiu a filtragem de dados inconsistentes. Em seguida, os dados foram processados no software Res2DInv, que emprega o método dos mínimos quadrados para obter modelos por inversão numérica, resultando em seções bidimensionais de resistividade verdadeira (Loke, 1999).

As seções geradas permitem a visualização e a interpretação do subsolo de forma contínua, destacando zonas com diferentes faixas de resistividade elétrica. Foram adotados critérios interpretativos baseados na literatura, como Loke (1999), considerando que:

- Resistividade $< 100 \Omega.m$: indica zona saturada;
- Resistividade entre 100 e 1000 $\Omega.m$: sugere solo parcialmente saturado;
- Resistividade $> 1000 \Omega.m$: representa material seco ou altamente resistivo.

Exemplo de seção gerada após a inversão dos dados pode ser visualizado na Figura 6.

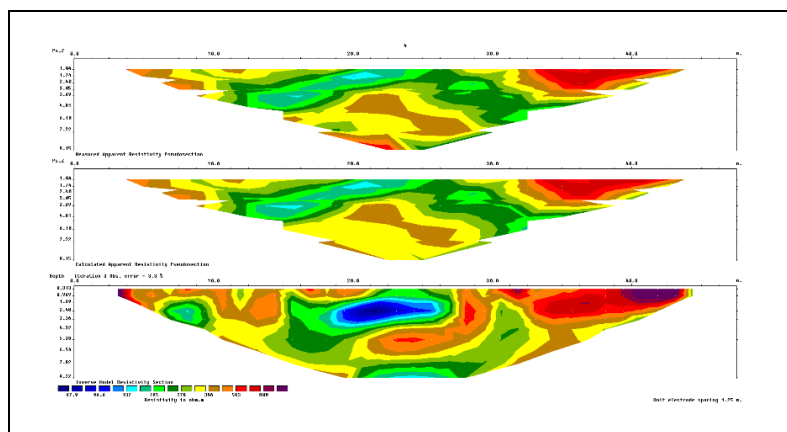


Figura 6. Exemplo de seção medida, calculada e interpretada.

Como forma de complementar os dados indiretos obtidos por eletrorresistividade, foi realizado o monitoramento semanal do nível freático por meio de um piezômetro instalado na porção central da encosta,

conforme indicado na Figura 5 e Figura 7. As leituras foram realizadas entre dezembro de 2023 e maio de 2024, visando verificar a dinâmica do nível de água e sua possível correlação com os padrões de resistividade identificados nas seções. Os dados piezométricos forneceram uma referência direta sobre a flutuação do lençol freático, auxiliando na validação da interpretação geofísica.



Figura 7. A) Tampa para proteção do poço instalado; B) Medição do nível de água com medidor elétrico.

5 RESULTADOS

As seções geofísicas obtidas a partir do método de eletrorresistividade (Figura 8) permitiram identificar variações significativas de resistividade elétrica ao longo do maciço investigado. Foram analisados perfis levantados em campo (L2 e L3) e, de forma complementar, duas seções (L1V, L3V) incorporadas de um estudo anterior, realizado na mesma região, com metodologia e configuração compatíveis, permitindo integração e comparação dos dados. Essa integração possibilitou a validação de padrões recorrentes de resistividade, evidenciando consistência entre os dados obtidos em campanhas distintas.

As seções L3V e L1V revelam faixas com baixa resistividade elétrica nas cotas intermediárias, sugerindo a presença de um nível d'água suspenso e um padrão de fluxo paralelo ao movimento de massa. De forma compatível, as seções L2 e L3 apresentam baixa resistividade na porção central dos perfis, reforçando a existência de uma zona de saturação contínua associada à mesma dinâmica hídrica. Essa coerência entre diferentes seções indica regularidade na distribuição de água no interior do maciço, o que fornece subsídios importantes para a caracterização do talude.

Entre dezembro de 2023 e maio de 2024, os dados piezométricos indicaram flutuação do nível de água entre as cotas 654,64 m e 653,81 m, cotas compatíveis com a profundidade das zonas de baixa resistividade mapeadas nas seções. A sobreposição entre os dados diretos e indiretos sugere a existência de um nível freático suspenso no interior do maciço, evidenciando a importância de integrar diferentes métodos para uma interpretação mais robusta. Esses resultados estão de acordo com a literatura, que associa valores de resistividade abaixo de $100 \Omega \cdot m$ à presença de solo saturado (Loke, 1999; Braga, 2006), e com estudos que destacam a água como um fator importante no comportamento do maciço (Augusto Filho, 1992; Tominaga, 2015), sustentando a interpretação das observações obtidas.

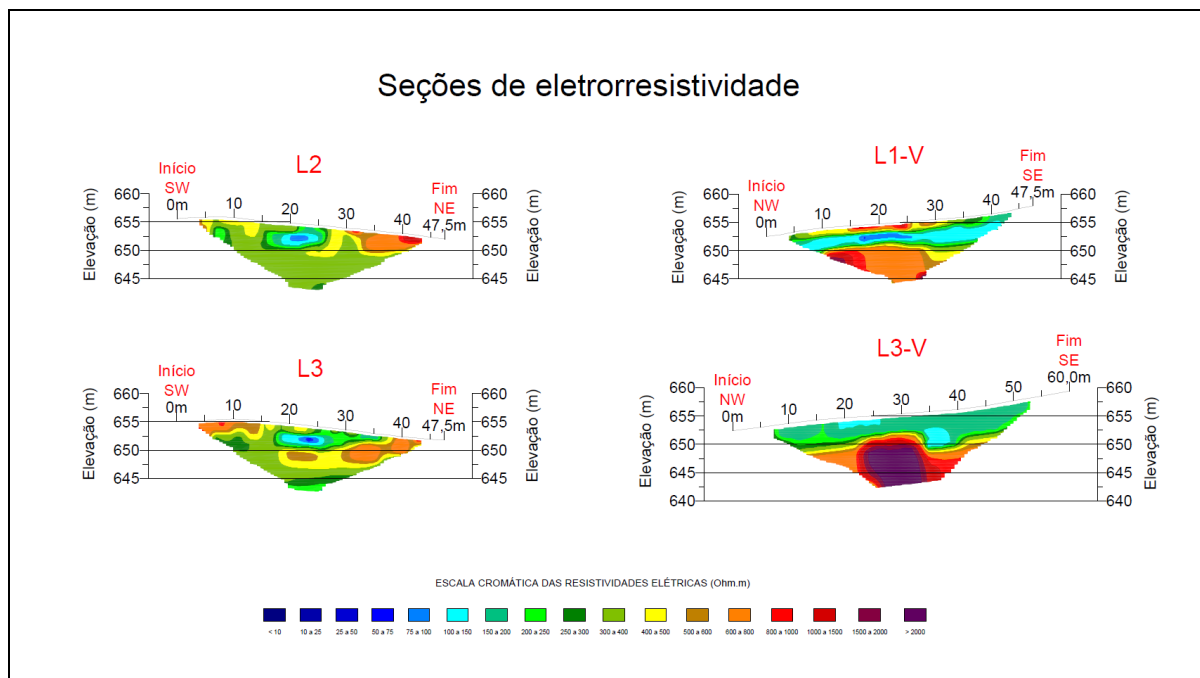


Figura 8. Seções geofísicas obtidas pelo método de eletrorresistividade.

6 CONCLUSÕES

A aplicação do método de eletrorresistividade mostrou-se eficaz na identificação de zonas saturadas em área com histórico de instabilidade no distrito de Cachoeira do Brumado. As seções analisadas indicaram padrões consistentes de baixa resistividade associados à presença de zona saturada, o que sugere a existência de um nível freático suspenso e uma trajetória preferencial de fluxo hídrico no interior do maciço.

A integração com os dados piezométricos obtidos entre dezembro de 2023 e maio de 2024, que registraram variação do nível de água entre as cotas 654,64 m e 653,81 m, reforçou a interpretação das zonas com baixa resistividade nas seções geofísicas. A coincidência entre os domínios de baixa resistividade e as leituras do nível de água permite sustentar a interpretação de que a saturação parece ser um condicionante da deformação lenta na área de estudo, fortalecendo a hipótese de controle hídrico do movimento.

Dessa forma, a associação entre métodos indiretos (geofísica) e diretos (piezometria) mostra-se uma abordagem promissora para o monitoramento de áreas com instabilidade, permitindo melhor compreensão da dinâmica hídrica e seu papel na estabilidade de encostas.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio concedido por meio do Processo APQ-01613-22, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), pelo suporte acadêmico, científico e financeiro prestado ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Augusto Filho, O. 1992. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1, 1992, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABMS/ABGE. p. 721-733.



- Braga, A. C. de O. 2006. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. Universidade Estadual Paulista.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 1993. Levantamentos geológicos básicos do Brasil, Mariana – Folha SF.23-X-B-1. Estado de Minas Gerais, 1:100.000. Org. por Orivaldo Ferreira Baltazar e Frederico Ozanam Raposo. Brasília: DNPM/CPRM. 196p.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2006. Mapa geodiversidade do Brasil: escala 1:2.500.000, legenda. Brasília. 68 p.
- Endo, I. *et al.* 2019a. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000: Uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969). Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero. Available at: www.qfe2050.ufop.br.
- Endo, I. *et al.* 2019b. Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero. Disponível em: www.qfe2050.ufop.br.
- Gonçalves, L.E. da S., Costa, J.C.M. de O., Endo, I., & Roeser, H.M.P. 2011. Petrogênese, microestruturas e deformação de corpos ultramáficos metamorfizados da região de Santa Rita de Ouro Preto, MG, Brasil. *Geonomos*, 19(1), 10-17.
- JORDT-EVANGELISTA, Hanna; SILVA, Maria Elizabeth da. 2005. Rochas metaultamáficas de Lamim, sul do Quadrilátero Ferrífero, MG: contribuição ao conhecimento do protólito da pedra-sabão. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 58, p. 11-20.
- LOKE, M.H. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys.
- Rocha, B. C. da. 2011. Evolução metamórfica dos metassedimentos da Nappe Lima Duarte e rochas associadas do Complexo Mantiqueira, sul da Faixa Brasília (MG). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. doi:10.11606/D.44.2011.tde-27072011-180118. Acesso em: 2024-04-16.
- Rodrigues, Vinicius Eleuterio. 2024. Estudo de movimento de massa gravitacional do tipo rastejo na área urbana de Cachoeira do Brumado, Mariana/MG. Monografia. Repositório Institucional da Universidade Federal de Ouro Preto.
- SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Diretoria de Estratégias em Geotecnologias e Informação Geográfica (Dgeo). Rodovias estaduais e federais de Minas Gerais. Belo Horizonte: Semad, 2018.
- Tominaga, Lília Keiko; Santoro, Jair; Amaral, Rosangela do (Orgs). 2015. Desastres naturais: conhecer para prevenir. Livro. Instituto Geológico, São Paulo. 3ª ed.196 p.