



Caracterização de Suscetibilidade ao Colapso por Análise Estrutural e Geofísica em Área Cárstica no Município de Sete Lagoas - MG
Characterization of Susceptibility to Collapse by Structural and Geophysical Analyses in Karst Area in Sete Lagoas Municipality - MG

Débora Vasconcelos de Oliveira¹; Luis de Almeida Prado Bacellar¹ & Paulo Roberto Antunes Aranha²

¹Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia na Escola de Minas, Campus Morro do Cruzeiro s/n, Bauxita, 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil.

²Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.
E-mails: deboravasconcelosdeoliveira@gmail.com; bacellar@ufop.edu.br; aranha1941@gmail.com

Recebido em: 13/11/2019 Aprovado em: 20/03/2020

DOI: http://doi.org/10.11137/2020_2_76_86

Resumo

Problemas geotécnicos, como colapsos, são comuns em ambientes cársticos e na cidade de Sete Lagoas (MG) inúmeros casos foram registrados nos últimos anos. Em consequência, estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de delimitar áreas de maior suscetibilidade a este fenômeno, que está geralmente vinculado a presença de condutos ou cavidades subterrâneas, de desenvolvimento controlado pela estrutural. Entre os diversos métodos de caracterização de cavidades, um dos mais eficazes é a geofísica de superfície, em especial a eletrorresistividade, com a técnica de caminhamento. Uma técnica alternativa, menos conhecida, mas tida como eficiente para a detecção de direções de fraturas subverticais, é a aquisição elétrica azimutal, que consiste em rotacionar algum arranjo (e.g. Wenner, Dipolo Equatorial, Quadrático) em torno de um ponto. O objetivo principal deste trabalho foi definir a suscetibilidade ao colapso de uma área adjacente a uma lagoa no município de Sete Lagoas/MG por análise estrutural e eletrorresistividade. Objetivou-se, secundariamente, averiguar a eficácia da técnica de aquisição azimutal na detecção de fraturas verticais. Foram traçados lineamentos estruturais em imagens de sensores remotos, além de medidas em campo as atitudes do acamamento e das fraturas. O levantamento geofísico consistiu de linhas de caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo e de levantamentos azimutais com diversos arranjos e espaçamentos intereletrodos. Foi possível identificar um antifome vazado na área e uma cavidade ampla e rasa, conectada à lagoa. Além de fraturas paralelas ao acamamento, foram reconhecidas quatro famílias de fraturas subverticais, N20E (F1), E-W (F2), N50-70E (F3) e N30-50W (F4). A família F2 é a mais frequente e a F4 mais aberta, classificada como cavernosa. Com estas informações concluiu-se que o terreno estudado apresenta alta suscetibilidade ao colapso. A técnica azimutal se apresentou útil como complemento para identificar fraturas subverticais, uma vez que os resultados obtidos foram coerentes com os dados estruturais.

Palavras-chave: Carste; eletrorresistividade; perfis azimutais

Abstract

Geotechnical problems, such as collapses, are common in karst environments and several cases have been recorded in the city of Sete Lagoas (MG). As a consequence, studies have been developed with the purpose of delimiting areas of greater susceptibility to this phenomenon, which is generally linked to subterranean conduits or cavities that are controlled by geological structures. One of the most efficient method of cavity characterization is the surface geophysics, in particular the electrical resistivity, with the techniques of electrical profiling and vertical electrical sounding. A less well-known alternative technique that is considered efficient for the detection of preferential directions of subvertical fractures is the azimuthal resistivity sounding, which consists of rotating some arrays (e.g. Wenner, Equatorial Dipole, Quadratic) around a point. The main objective of this work was to characterize the susceptibility to the collapse of an area adjacent to a lagoon in the municipality of Sete Lagoas/MG by structural analysis and electrical resistivity. The secondary objective was to investigate the efficacy of the azimuth sounding technique in the detection of vertical fractures associated with karstification. Structural lineaments were drawn in remote sensing images and structural planes (joint sets and bedding) were measured in the field. The geophysical survey consisted of electric profiles with dipole-dipole array and azimuthal soundings, with various arrays and spacings. It was possible to identify a breached anticline in the area and a wide and shallow cavity, connected to the lagoon. Four subvertical fracture sets were recognized (N20E - F1, E-W - F2, N50/70E - F3; N30/50W - F4) as well as a fracture set parallel to bedding. The F2 family is the most frequent and the F4 are more open, classified as cavernous. It is possible to conclude that the study area is highly susceptible to collapse. The azimuth technique proved to be useful as a complement to identify karstification controlled by subvertical fractures, since the results were consistent with the structural data.

Keywords: Karst; electro resistivity; azimuthal profiles

1 Introdução

Os terrenos carbonáticos naturalmente passam por processo de carstificação que podem levar a subsidência e colapso. No entanto, essas instabilidades no terreno podem ser aceleradas por atividades antrópicas, como construção civil, implantação de pedreiras, vibrações do terreno, etc (Albrecht 1998). Tais atividades podem reduzir os níveis de águas subterrâneas e alterar os padrões de escoamento (Hobbs & Gunn, 1998), induzindo colapsos catastróficos (Albrecht 1998). No Brasil, vários municípios enfrentaram problemas de colapsos, como Cajamar (SP), Sete Lagoas (MG), Almirante Tamandaré (PR) e Colombo (PR), sendo o mais estudado o de Cajamar (Vestena *et al.*, 2002). Na cidade de Sete Lagoas (MG) já foram registrados 17 casos de colapsos e/ou subsidências nas últimas décadas (Galvão *et al.*, 2015), o que despertou o interesse de estudos na região e o desenvolvimento de trabalhos de avaliação de risco geotécnico na área urbana do município (Silva, 1988; CPRM, 2010; Galvão, 2015).

A região de Sete Lagoas, na porção central de Minas Gerais, exibe uma sucessão estratigráfica neoproterozóica (Grupo Bambuí) pertencente à Bacia Intracratônica do São Francisco (Alkmim & Martins-Neto, 2001). Na parte basal deste grupo ocorre a Formação Sete Lagoas, subdividida em dois membros: um inferior, denominado Pedro Leopoldo, e um superior, Lagoa Santa (Scholl, 1976; Danderfer *et al.*, 1996; Tuller *et al.*, 2010). Em muitos trechos da região, assim como na área de estudo, aflora metacalcário puro e cinza escuro, pertencente ao membro Lagoa Santa. Esse membro é reconhecido pela maior capacidade de desenvolver estruturas cársticas em relação ao membro Pedro Leopoldo, por apresentar metacalcário com grau de pureza maior (Galvão, 2015; Salgado, 2016). Sendo assim, para se evitar risco geotécnico ao colapso é recomendável a caracterização desses terrenos antes da ocupação antrópica.

Na caracterização dos terrenos cársticos pode-se aplicar métodos diretos, como sondagens, e outros de investigação indireta, como a geofísica, destacando-se os métodos eletromagnéticos, GPR, microgravimetria e eletrorresistividade (Thomas &

Roth, 1999; Waltham *et al.*, 2005; Chandra, 2016). Na área do presente estudo, já foram empregados os métodos GPR e eletromagnético no domínio da frequência, mas estes não apresentaram bons resultados (Oliveira, 2018). O primeiro, possivelmente devido à cobertura de material inconsolidado, saturado e de composição argilosa. Já os dados do segundo possivelmente sofreram influência de feições antrópicas nas proximidades (cercas, postes e edificações). Neste trabalho são apresentados os resultados do método geofísico de eletrorresistividade, que se distingue pela facilidade de aquisição e de processamento de dados. Além de utilizar a técnica tradicional de caminhamento elétrico, optou-se também por empregar outra técnica menos conhecida, que é a de aquisição azimutal de dados de resistividade. Alguns pesquisadores a aplicaram na detecção de fraturas verticais, mostrando bons resultados (e.g.: Taylor & Fleming, 1988; Lane *et al.*, 1995). Contudo, na maior parte dos estudos publicados, aplicou-se a técnica em meios com predomínio de porosidade fissural e não em meios cársticos, e normalmente sem comparação simultânea com outras técnicas ou métodos geofísicos. Cabe destacar também que a técnica azimutal, raramente empregada no Brasil, pode ser aplicável em meios cársticos para o reconhecimento de dutos e direções preferenciais de fluxo, facilitando não só a análise de suscetibilidade a colapsos como até a locação de poços tubulares profundos. A técnica azimutal mostra-se particularmente útil nos casos em que o espaço superficial disponível é reduzido, como em zonas urbanas (Busby *et al.*, 2004), pois a profundidade de investigação é mais elevada, especialmente no arranjo quadrático (Lane *et al.*, 1995).

Este trabalho tem como objetivo principal definir a suscetibilidade ao colapso de uma área adjacente a uma lagoa no município de Sete Lagoas com caracterização envolvendo análise estrutural e levantamentos de eletrorresistividade. Objetivou-se, secundariamente, averiguar a eficácia da técnica azimutal na detecção de fraturas subverticais hidraulicamente mais condutivas em meios carstificados.

2 Materiais e Métodos

Procurou-se selecionar uma área de estudos afastada de benfeitorias de natureza antrópica, como

tubulações enterradas e fiações elétricas, para evitar interferências nas respostas dos sinais. A área deveria contar com dados de subsuperfície (poços) e de afloramentos nas proximidades para possibilitar levantamento geológico e estrutural. O manto de intemperismo deveria ser delgado e o nível d'água raso, características que facilitam o colapso em áreas cársticas (Waltham *et al.*, 2005), além de melhorarem a resposta do próprio levantamento. A área selecionada apresenta cerca de 10.000 m² e é adjacente a uma lagoa, na Fazenda Capão Grande, a noroeste da cidade de Sete Lagoas (Figura 1).

Para melhor compreensão do sistema de fraturas, traçaram-se lineamentos morfoestruturais em fotos aéreas (1:30.000), em imagem da banda pancromática do satélite LANDSAT (escala 1:10.000), imagem de radar SRTM (Miranda, 2005). Estes lineamentos foram comparados com lineamentos aeromagnetométricos identificados na região (CPRM, 2010). Em campo, foram medidas as atitudes dos planos de acamamento e das fraturas, juntamente com suas aberturas. Posteriormente, os dados foram tratados no *software* OpenStereo (Grohmann *et al.*,

2011). Os dados de fraturas foram organizados em diferentes famílias e classificados quanto a sua frequência e abertura (ISRM, 1983), uma vez que tais parâmetros são relevantes para a detecção de descontinuidades por eletrorresistividade (Demirel *et al.*, 2018).

Empregaram-se dois resistivímetros para a aquisição de dados de resistividade aparente, um da ABEM, modelo SAS 1000, e outro da Autoenergia, modelo X5. Foram levantadas três linhas de cerca de 90m de caminhamento elétrico, com arranjo dipolo-dipolo, de direção SW-NE (RES1, RES2 e RES3), com espaçamento entre eletrodos de 0,75m, sete níveis de investigação (n=7) e espaçadas entre si de 12m (Figura 2A). Os dados de resistividade aparente foram invertidos com o programa Res2DInv (Geotomo, 2011), para produzir seções de resistividade. Os dados invertidos foram interpolados na horizontal com o programa Surfer (Golder, 2002), gerando mapas de resistividade subparalelos à superfície. A conceituação teórica do método de eletrorresistividade pode ser obtida em textos clássicos (Orellana, 1972; Telford *et al.*, 1990).

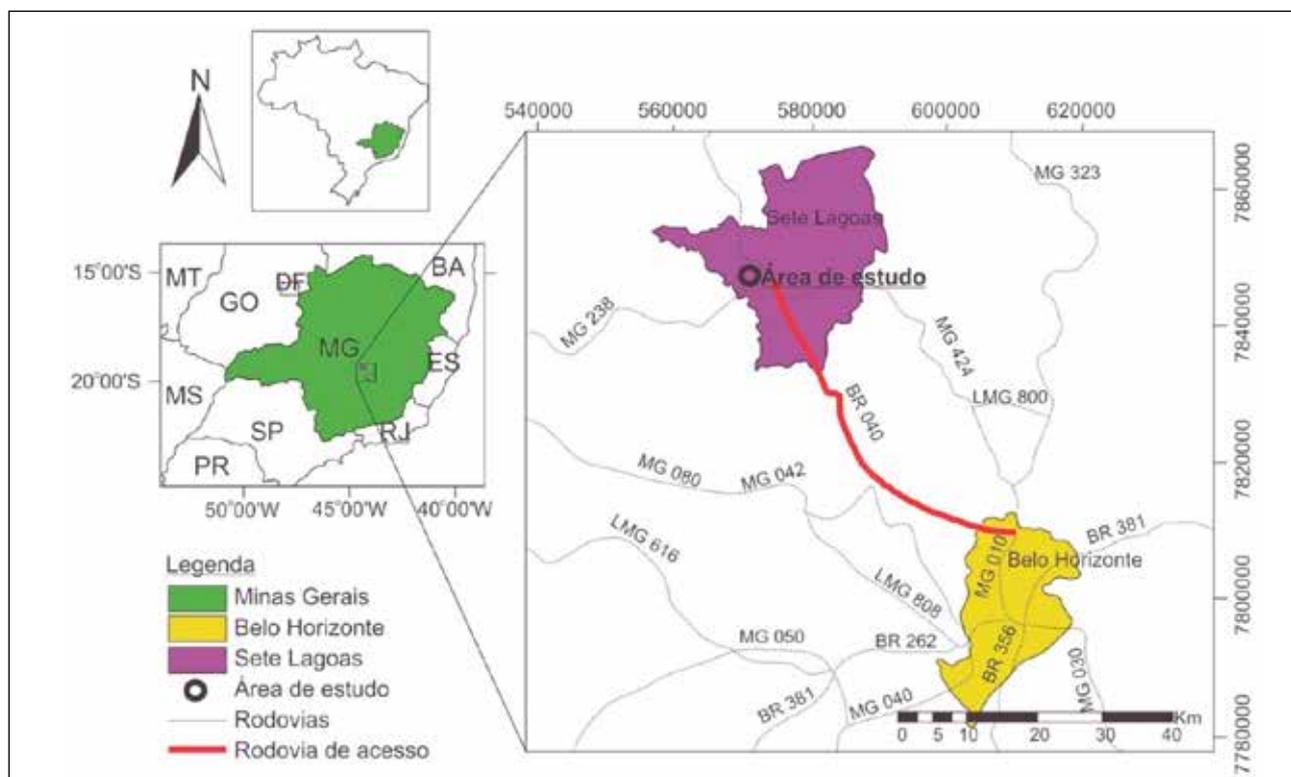


Figura 1 Localização e vias de acesso da área de estudo no município de Sete Lagoas. Fonte: Base cartográfica IBGE (2014) e MMA(2008).

Também foram adquiridos dados azimutais de resistividade com arranjos colineares (Schlumberger e Wenner) e não-colineares (Dipolo-Dipolo-Equatorial - DDE- e Quadrático), com diversos espaçamentos intereletrodos. Maiores informações sobre a técnica azimutal podem ser obtidas na literatura especializada (Habberjam, 1972; Taylor & Fleming, 1988). Os espaçamentos intereletrodos foram especificados conforme o tamanho da área superficial disponível e espessura de cobertura inconsolidada. As medidas de resistividade aparente foram obtidas com rotação com incrementos de 15° a partir do azimute zero (Norte) ao redor de um ponto central, tanto para os arranjos colineares como não colineares (Figura 2B). Conforme preconizam alguns autores (Lane *et al.*, 1995), as medidas entre os azimutes 00 e 165 foram repetidas para os azimutes 180 e 345, o que torna este tipo de levantamento extremamente rápido. Os dados azimutais não precisaram ser invertidos, motivo pelo qual eles foram apresentados em resistividade aparente. As profundidades medianas de investigação destes arranjos foram determinadas conforme recomendação de Edwards (1977) e Loke (2000).

3 Resultados e Discussões

A área de estudo apresenta relevo plano e está limitada a nordeste e a sudoeste por dois afloramen-

tos de metacalcários negros, de granulometria média, similares àqueles atribuídos ao membro Lagoa Santa da Formação Sete Lagoas.

A unidade carbonática é muito espessa na área, como registra um poço tubular profundo nas proximidades, onde foram descritos 68 m de rochas carbonáticas (CPRM/SIAGAS, 2018). A superfície freática na área é rasa, pois uma lagoa ocorre a sul (Figura 3) com um desnível de 1,5m em relação à área central. Esta lagoa pode ser interpretada como uma dolina, assim como outras do município (Galvão 2015), e seus limites mostram nitidamente um forte controle estrutural, limitada principalmente por lineamentos de direção NW (Figura 3).

Os lineamentos identificados na área em fotos aéreas e imagens de satélite prevalecem na direção N30-50W, secundados por pequena proporção de orientação NE (Figura 4A). Imagens de escala mais regional de radar (SRTM, Figura 4B) e de aeromagnetometria (CPRM, 2010) também ilustram que no entorno da área predominam lineamentos de orientação NW e de direção EW, estes menos frequentes, mas mais persistentes.

Identificou-se em campo que os dois afloramentos de metacalcários (Figura 3), representam flancos de um antifórme vazado, erodido na zona de charneira, onde atualmente ocorre material inconsol-

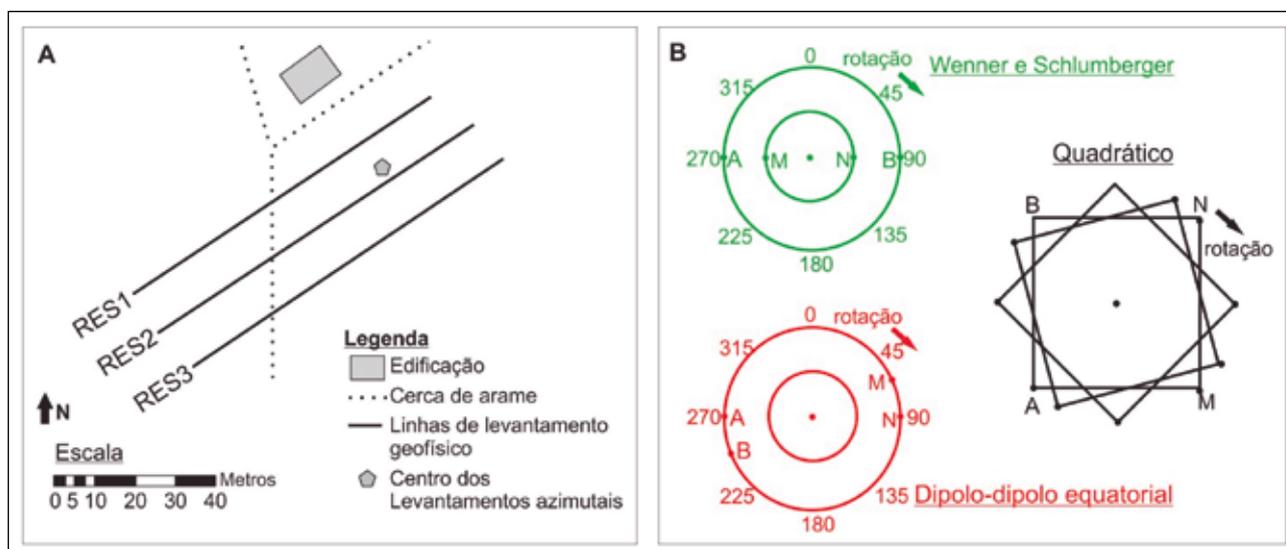


Figura 2 A) Croqui com o posicionamento dos levantamentos geofísicos e B) Esquema de rotação dos levantamentos azimutais em torno do ponto central, em que A e B representam os eletrodos de corrente e M e N os eletrodos de potencial.

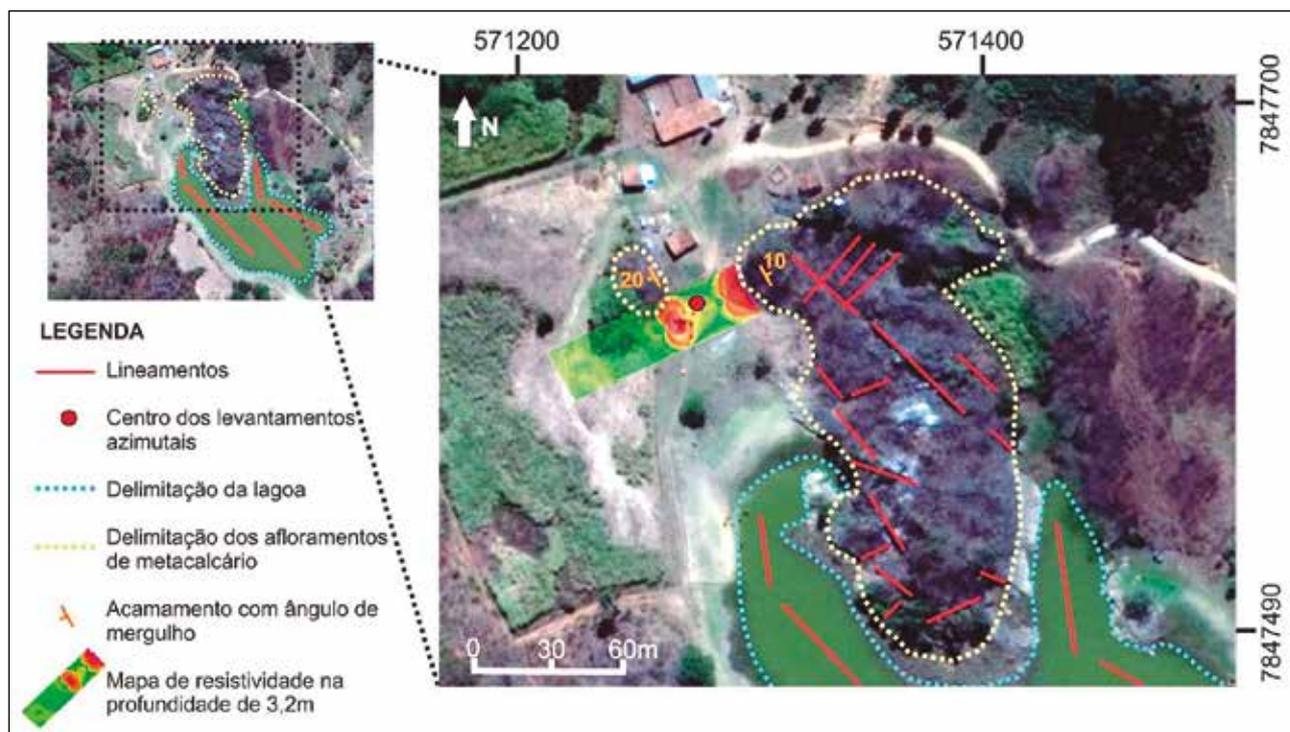


Figura 3 Imagem Landsat da área ilustrando os afloramentos de metacalcário, a lagoa e os lineamentos morfoestruturais. Na imagem principal tem-se a sobreposição do mapa de resistividade elétrica na profundidade de 3,2m.

lidade (Figura 5A). Tradagens manuais revelaram que este material é de espessura métrica, de composição argilosa, rico em matéria orgânica e muito saturado.

No estereograma de projeção polar com as medidas de acamamento (Figura 5B), reconhece-se este dobramento suave, com eixo sub-horizontal de direção N30W, valores similares aos encontrados na região por Salgado (2016). Observou-se desenvolvimento de fraturas subparalelas aos planos de acamamento, além de muitas fraturas subverticais. Embora haja grande dispersão nas atitudes, nota-se uma concentração em quatro direções preferenciais ou famílias: N20E, E-W, N50-70E e N30-50W, denominadas, respectivamente, F1, F2, F3 e F4 (Figura 5C). A família mais frequente é EW (F2), fato também verificado na região da Área de Proteção Ambiental (APA) Carste de Lagoa Santa, MG, em área limítrofe à do município de Sete Lagoas (Ribeiro *et al.*, 2019).

A grande concentração de lineamentos na direção NW se deve não somente a família F4, mas

também ao acamamento dobrado segundo esta direção. É possível que a F4 represente fraturas de tração longitudinais ao eixo dos dobramentos, porém estudos mais detalhados são necessários para melhor entendimento da gênese destas discontinuidades. As quatro famílias, assim como a subparalela ao acamamento, encontram-se geralmente muito abertas, em consequência da carstificação pela dissolução. A maioria das fraturas mostram-se como cavernosas (>100cm), extremamente largas (10 a 100cm) ou muito cavernosas (Figura 6). A família F4 (N30-50W) apresenta-se mais aberta, com predomínio de fraturas cavernosas, secundada pela família F2 (EW), também com muitas fraturas nesta categoria. Cabe destacar que Galvão *et al.* (2015) mostram que as cavidades na região tendem a se desenvolver de acordo com discontinuidades subparalelas ao acamamento e Ribeiro *et al.* (2019) relatam que na APA Carste de Lagoa Santa predominam condutos cársticos controlados pela intersecção de fraturas subverticais de orientação E-W com o acamamento sub-horizontal.

Figura 4 A) Diagrama de rosetas com medidas dos lineamentos em imagem Landsat. B) Lineamentos identificados na imagem de radar SRTM (Miranda, 2005), com área de estudo marcada com ponto vermelho.

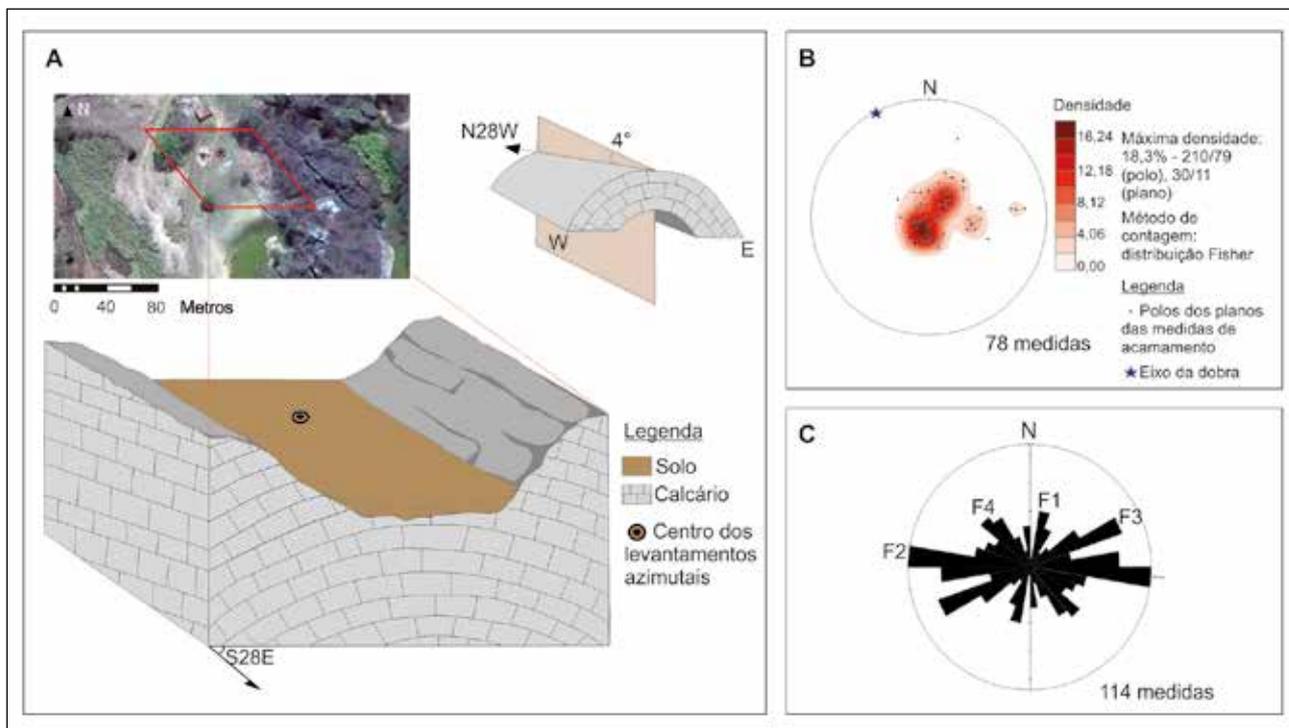
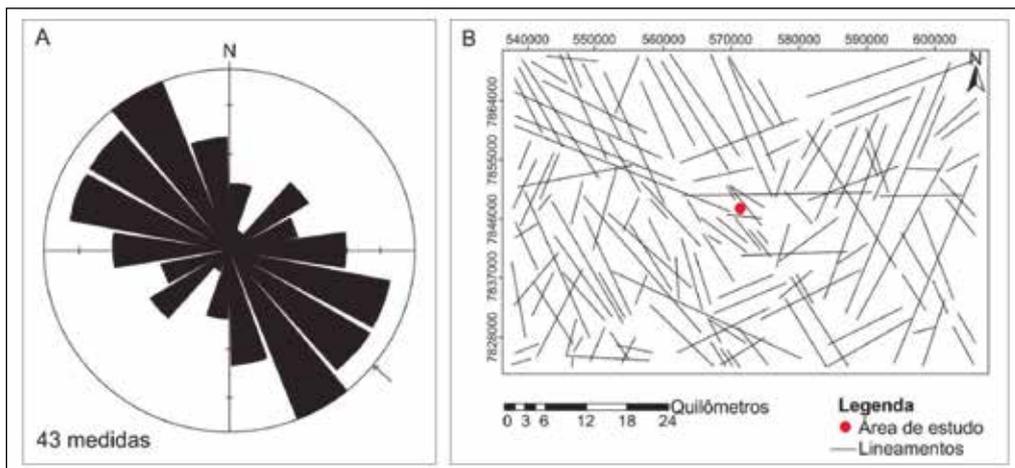
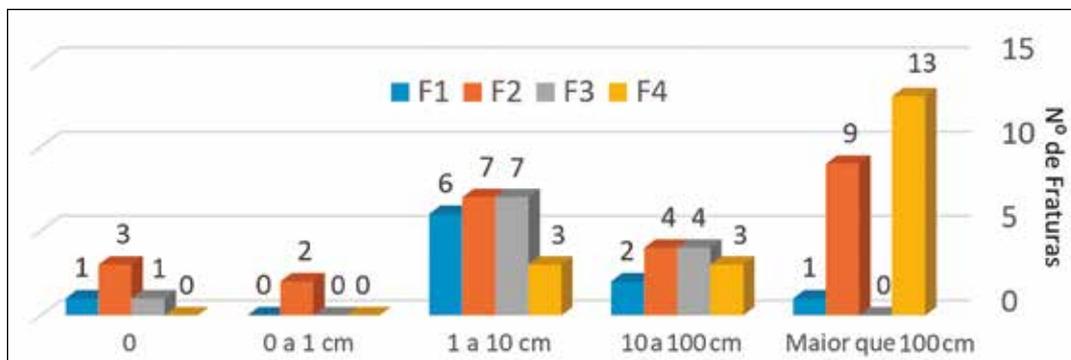


Figura 5 A) Bloco diagrama esquemático do antiforme identificado. B) Estereograma Schmidt-Lambert, com os polos de acamamento e eixo de dobra marcado por estrela azul. C) Diagrama de rosetas, com orientação das fraturas subverticais.

Figura 6 Histograma com as classes de abertura para as famílias de fraturas na área.



Os três levantamentos de resistividade (RES1, RES2 e RES3), paralelos entre si, foram feitos ortogonalmente ao eixo da dobra. As seções invertidas de resistividade mostram grande similaridade entre si (Figura 7). Até aproximadamente 2 a 3 metros de profundidade predomina uma zona de material de resistividade entre 50-300 Ohm.m, interpretada como a cobertura superficial. Abaixo desta, as seções revelam nitidamente uma zona com menor resistividade (<50 Ohm.m) (Figura 7). Valores de resistividades como esses no interior de rochas podem ser interpretados como cavidade preenchida por água ou sedimentos como argila e alúvio (Loke, 2000). Esta cavidade torna-se mais larga para sul, e projetando-se esta tendência, infere-se que ela esteja conectada com a lagoa, podendo dessa forma tratar-se de uma dolina colapsada, como previamente interpretado.

O antiforme vazado identificado em campo também pode ser visto nas seções, que mostram que a carstificação também se desenvolve ao longo do plano de acamamento dobrado (Figura 7). Nos afloramentos, a rocha exposta sobre a superfície freática apresenta resistividades mais altas (>1000 Ohm.m), mas a zona de baixa resistividade (<50 Ohm.m) ao longo do acamamento se encontra próximo à superfície entre os flancos da dobra. Para sudoeste, esta cavidade parece estar confinada ou semiconfinada por rocha não carstificada e pela cobertura inconsolidada argilosa, situação similar a encontrada por Galvão (2015) na região. Infelizmente, não há afloramentos neste local que possibilitem identificar o acamamento, mas a geometria da cavidade sugere que este se encontre subhorizontalizado.

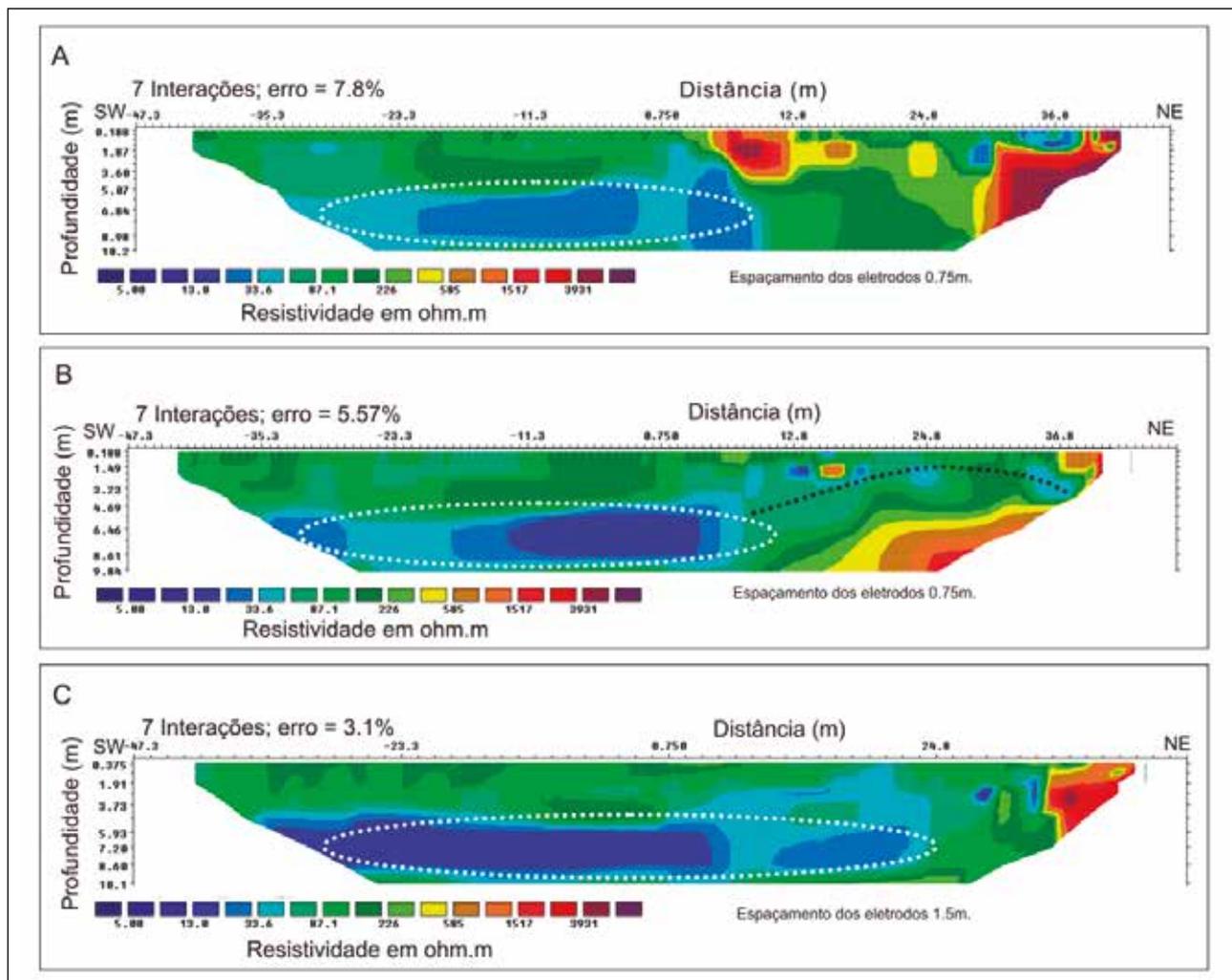


Figura 7 Seção de eletrorresistividade de direção SW-NE: A) RES1, B) RES2 e C) RES3. A linha branca delimita a zona com baixa resistividade e a linha negra, o acamamento dobrado.

A resistividade não apresenta boa resolução para individualizar as unidades, mas estes levantamentos indicam que esta área apresenta forte suscetibilidade ao colapso, pois comprovou-se que há uma cavidade ampla e rasa, geralmente a menos de três metros de profundidade. Considerando-se que há uma camada de cobertura inconsolidada sobre a cavidade, a espessura de rocha sã sobre a cavidade deve ser muito pequena em alguns trechos.

Quando estes dados invertidos são interpolados e plotados em planta, geram-se mapas de resistividade em várias profundidades (Figura 8). Nestes identifica-se duas anomalias de alta resistividade (>1000 Ohm.m) que representam os flancos do anti-forme e um forte controle da resistividade segundo a orientação NW, que é a direção das fraturas F4. As ou-

tras direções de fraturamento não se encontram muito perceptíveis, com exceção de um lineamento NE, por onde se desenvolve a carstificação no extremo nordeste dos mapas de resistividade. Esta carstificação pode ter se desenvolvido conforme a família F3.

Com a análise conjunta das seções e dos mapas de resistividade, constata-se que os condutos se formam na interseção dos planos de fratura subverticais (principalmente das famílias F4 e, secundariamente, F3) com o plano de acamamento, e o fluxo preferencial de água subterrânea ocorre conforme as direções das fraturas. Ressalta-se também que a família F4 é que apresenta maior quantidade de fraturas cavernosas (Figura 6). Com a evolução do carste, esses condutos tendem a se alargar ao longo dos planos de acamamento (Galvão, 2016).

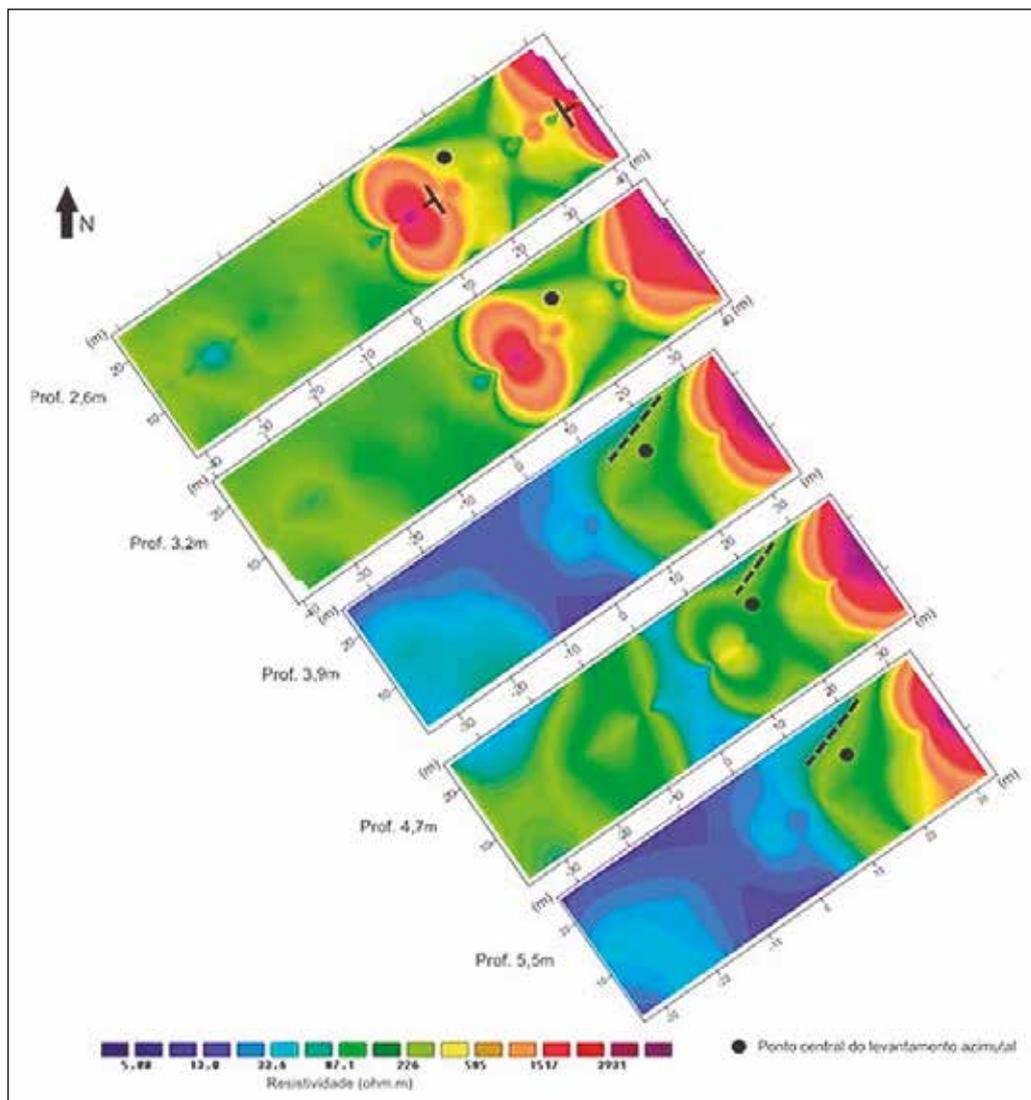


Figura 8 Mapas de resistividade em diferentes profundidades. Notar que a resistividade é fortemente controlada pelo acamamento dobrado nas profundidades mais rasas (representado na profundidade de 2,6m), mas que a maiores profundidades a carstificação evolui no sentido NE (indicado pela linha tracejada).

Serão apresentados apenas quatro levantamentos azimutais por economia de espaço, descartando-se aqueles que captaram preferencialmente a resposta do material de cobertura inconsolidado e isotrópico. A figura 9 ilustra os diagramas polares destes levantamentos com as profundidades medianas de investigação. Em tese, dada a relação entre espaçamento dos eletrodos pela espessura do material inconsolidado, não se espera respostas anômalas, como as conferidas pelo paradoxo de anisotropia (Watson & Baker, 2010). Consequentemente, as resistividades aparentes menores nos diagramas polares devem em tese coincidir com as direções das fraturas sub-verticais. Desta forma, verifica-se que a resistividade aparente foi invariavelmente sempre baixa nos 4 levantamentos na direção EW, coincidente com a direção da família F2. Resistividades menores foram igualmente reconhecíveis de acordo com a direção NW (Figura 9A e B), NE (Figura 9B e C) e N (Figura 9C e D). A análise fratura a fratura não é tão simples e uma interpretação alternativa comumente empregada é a de procurar circunscrever elipse contornando os valores de resistividade ao longo dos azimutes,

como sugerido por Taylor & Fleming (1988), cujo eixo menor coincidiria com as fraturas mais condutivas. Nesta interpretação, os levantamentos azimutais com os arranjos Schlumberger e Werner com mesma profundidade de investigação (2,8m) apresentaram comportamento similar, com eixo menor da elipse (menor resistividade) na direção E-W. Os levantamentos com maiores profundidades, mostraram comportamento também similar entre si, mas com eixo menor distinto, no azimute NE.

A direção E-W identificada em todos os levantamentos e pela análise da elipse envoltória corresponde a família de fraturas (F2), mais frequente e muito aberta, e coincidente com a direção preferencial de condutos determinada na região por Ribeiro *et al.* (2019). As direções NW, NE e N coincidem respectivamente com as fraturas F4, F3 e F1. A envoltória da elipse dos levantamentos mais profundos, com eixo menor para NE (figuras 9 C e D), coincide com a família F3 e pode ser explicada pela carstificação nesta direção observada nos níveis mais profundos do caminhamento elétrico (Figura 8).

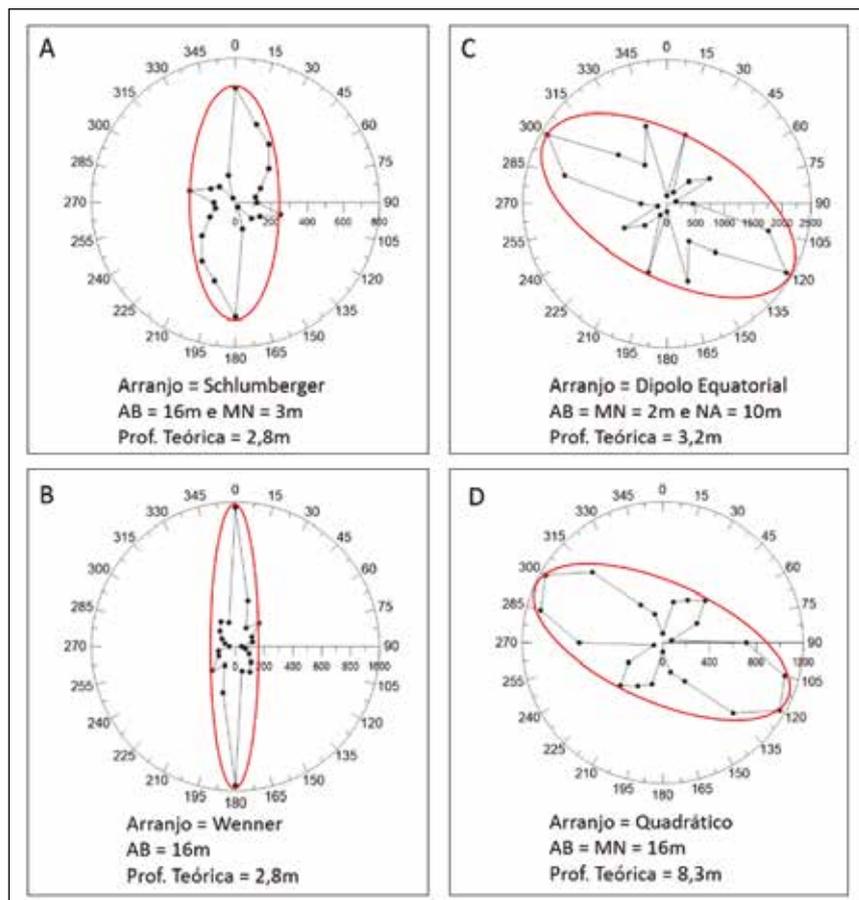


Figura 9 Diagramas polares com valores de resistividade aparente (nas profundidades medianas de investigação) interpretados de acordo com o procedimento de Taylor & Fleming (1988).

4 Conclusões

Identificou-se na área um antiforme suave com eixo sub-horizontal de direção N30W, com zona de charneira erodida (antiforme vazado). Quatro famílias de fraturas subverticais foram reconhecidas em campo, N20E (F1), E-W (F2) N50-70E (F3) e N30-50W (F4), além de descontinuidades subparalelas ao acamamento. Todas as famílias se encontram abertas devido a dissolução, especialmente a F4 e a F2, que são cavernosas, sendo esta última também a mais frequente. A família F4 coincide com o eixo dos dobramentos, o que explica a preponderância de lineamentos nesta direção em imagens de sensoriamento remoto.

Identificou-se uma cavidade sub-horizontal preenchida por água, que ocorre a partir da profundidade aproximada de 3m. Esta cavidade se alarga para sudeste, quando se conecta com a lagoa, indicando sua formação como uma dolina de colapso. Os condutos principais dessa cavidade se formaram na interseção entre acamamento e famílias F4 e F3 e com a evolução do processo de carstificação estes tendem a se alargar ao longo do plano de acamamento.

Os levantamentos azimutais mostraram coerência com os dados estruturais, pois permitiram reconhecer as famílias de fraturas, especialmente a F2 e F3, esta principalmente em maiores profundidades. Portanto, esta técnica se mostrou promissora para avaliação de descontinuidades verticais, dado de grande importância para a identificação de condutos, suas conexões, e com óbvias implicações para várias questões hidrogeológicas e geotécnicas. A aplicação da técnica é ainda mais relevante quando é pequena a área superficial disponível, como é comum em zonas urbanas.

O desenvolvimento dessa cavidade de evolução condicionada pela estrutura geológica, muito ampla e rasa, torna a área suscetível ao colapso. Portanto, este estudo reforça a importância da caracterização de terrenos cársticos antes da ocupação antrópica, associando-se métodos diretos com eletrorresistividade, para se evitar áreas suscetíveis a este risco geotécnico. Acredita-se que os resultados deste trabalho podem ser úteis em outros locais com problemas similares.

5 Agradecimentos

À FAPEMIG, pelo financiamento do projeto e bolsa, à UFOP, ao CNPq, IGC/UFMG e NUGEO por propiciarem condições adicionais para o desenvolvimento deste estudo.

6 Referências

- Albrecht, K.J. 1998. *Avaliação geológica-geotécnica de terrenos sujeitos a problemas cársticos*. Programa de pós-graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 210p.
- Alkmim, F.F. & Martins-Neto, M.A. 2001. A bacia intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: PINTO, C.P. & MARTINS-NETO, M.A. (ed.). *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. Editora SBG-MG, p.9-30.
- Busby, J. P.; Raines, M. G.; Jackson, P. D.; Nelder, L. & Morgan, D. J. R. 2004. Detection of fracture dilatancy on the cliff top using the azimuthal apparent resistivity technique. *British Geological Survey Internal Report*, IR/04/20. 42p.
- Chandra, P.C. 2016. *Groundwater Geophysics in Hard Rock*. CRC Press/Balkema, 366p.
- CPRM. 2010. *Projeto Sete Lagoas – Abaeté. Estado de Minas Gerais. Programa Geologia do Brasil. MME/. Serviço Geológico do Brasil*. Belo Horizonte, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 138p.
- CPRM/SIAGAS. 2018. Serviço Geológico do Brasil – Sistema de Águas Subterrâneas, cadastro de poços tubulares do município de Nova Palma. Disponível em < <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em 20 Jun. 2018.
- Danderfer, A.; Ribeiro, J.H.; Tuller, M.P. & Alkmim, F.F. 1996. Arcabouço litoestratigráfico da porção basal do Grupo Bambuí (Proterozóico Superior) no Sudeste da Bacia do São Francisco. Salvador. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 5, Salvador, 1996. Anais, Salvador, p.483-486.
- Demirel, S.; Roubinet, D.; Irving, J. & Voytek, E. 2018. Characterizing Near-Surface Fractured-Rock Aquifers: Insights Provided by the Numerical Analysis of Electrical Resistivity Experiments. *Water*, 10: 1-20.
- Edwards L. S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42: 1020-1036.
- Galvão, P.H.F. 2015. *Modelo hidrogeológico conceitual de Sete Lagoas (MG) e implicações associadas ao desenvolvimento urbano em regiões cársticas*. Programa de Pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 124p.
- Galvão, P.; Halihan, T & Hirata, R. 2015. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeology Journal* (online). DOI: 10.1007/s10040-015-1266-X.
- Geotomo. 2011. Programa RES2DINX32versão 3.71: *Geotomo Software*.
- Golder. 2002. SURFER -SURFACE MAPPING SYSTEM, versão 8.02: *Golden Software*.
- Grohmann, C. H.; Campanha G.A.C. & Soares Junior A.V.; ver-

- são 0.1.2. OpenStereo, 2011.
- Hobbs S.L.; Gunn; J. 1998. The hydrogeological effect of quarrying karstified limestone: options for protection and mitigation. *Quarterly Journal of Eng. Geol.* 31:147-157.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics. 1983. *Suggested methods for the quantitative description of rock masses*. England, Pergaman Press LTD Oxford, 132p.
- IBGE. 2014. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapas digitais. Disponível em: < <ftp://geofp.ibge.gov.br/> >. Acesso em: 16 de fevereiro 2016.
- Lane, J.W.; Haeni, F.P. & Watson, M. 1995. Use of a square array direct-current resistivity method to detect fractures in crystalline bedrock in New Hampshire. *Ground Water*, 33(3): 476-485.
- Loke, M. H. 2000. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies - A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. Guia Prático. Malasia, Geotomo, 63p.
- MMA 2008. Ministério do Meio Ambiente. Dados Geográficos. Disponível em: < <http://mapas.mma.gov.br/i3geo/download.htm#> >. Acesso 16 de Fevereiro 2016.
- Miranda, E. E. de, (Coord.) 2005. Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 26 janeiro 2016
- Oliveira, D.V. 2018. *Caracterização geofísica e estrutural de área cárstica na cidade de Sete Lagoas – MG com subsídio para estudo geotécnico*. Programa de Pós-graduação em Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 121p.
- Orellana, E. 1972. *Prospeccion geoeletrica en corriente continua*. 1ª edição. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips, Madrid. 523p.
- Ribeiro, C. G.; Velasques, L.N.M.; Paula, R. S.; Meireles, C.G.; Balzani, N. H. Arcos, R. E. C. & Amaral, D. G. P. 2019. Análise dos fluxos nos aquíferos cárstico-fissurais da região da APA Carste de Lagoa Santa, MG. *Revista Águas Subterrâneas*, 33 (1): 12-21.
- Salgado, J.R.P. 2016. *Condicionamento estrutural e litológico da porosidade cárstica da formação Sete Lagoas, município de Sete Lagoas (MG)*. Programa de Pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, IG/USP, Dissertação de Mestrado, 71p.
- Schöll, W.U. 1976. Sedimentologia e Geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, Ouro Preto, 1976. Anais, Ouro Preto, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 207-231.
- Silva A.B. da. 1988. Abatimento de solo da cidade de Sete Lagoas, MG. *Revista Águas Subterrâneas*, 12: 58-66.
- Taylor, R.W. & Fleming, A.H. 1988. Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. *Ground Water*, 26(4): 464 – 474.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P. & Sheriff, R.E. 1990. *Applied geophysics*. 2ed. Cambridge: Cambridge University Press, 792p.
- Thomas, B. & Roth, M.J.S. 1999. Evaluation of site characterization methods for sinkholes in Pennsylvania and New Jersey. *Engineering Geology*, 52: 147-152.
- Tuller M.P., Ribeiro J.H., Signorelli N., Féboli W.L., Pinho J.M.M. 2010. *Projeto Sete Lagoas - Abaeté*. Belo Horizonte, Convênio Secretária de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais e Serviço Geológico do Brasil, 160p.
- Waltham, T; Bell, F. G. & Culshaw, M. G. 2005. *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*. Springer Science & Business Media, 382p.
- Watson K. A. & Barker, R. D. 2010. Tank modeling of azimuthal resistivity surveys over anisotropic bedrock with dipping overburden. *Near Surface Geophysics*, 8: 297 – 309. Vestena, L. R.; Kobiyama, M. & Santos, L. J. C. 2002. Considerações Sobre Gestão Ambiental em Áreas Carste. *RA'EGA (UFPR)*, 4(6): 81-94.