



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Método de eletrorresistividade: implicações para o planejamento urbano em áreas cársticas de Almirante Tamandaré (Paraná, Brasil)

João André Martins¹, Fábio Effting Silva², Edilberto Costa³, Luiz Henrique Medeiros Collalto Toni⁴, Lélia Santiago Custódio da Silva⁵

¹Dr. em Geologia e Recursos Naturais, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Departamento de Geologia e Recursos Minerais, Instituto de Geociências (IG). Rua Carlos Gomes, 250, CEP 13.083-855, Campinas, SP. (48) 99644-9996. j235026@dac.unicamp.br (autor correspondente). ²Geólogo, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Departamento de Geologia (DGL), Bloco F. Rua Roberto Sampaio Gonzaga, s/n, CEP 88040-970, Florianópolis, SC. (48) 99970-0513. fabio.effting@gmail.com. ³Engenheiro Civil, Geosollo, Rua Padre Roma, 221, CEP 88010-090, Florianópolis, SC. (48) 99979-3534. contato@edilbertocosta.com. ⁴Graduando Geologia, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Departamento de Geologia e Recursos Minerais, IG. Rua Carlos Gomes, 250, CEP 13.083-855, Campinas, SP. (11) 99300-4713. l183220@dac.unicamp.br. ⁵MSc. em Geociências, docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, IFBA, Campus Brumado. Rua Francisco Manoel da Cruz, CEP 46100-000, Brumado, BA. (71) 99926-1374. lelia.silva@ifba.edu.br.

Artigo recebido em 27/03/2024 e aceito em 05/12/2024

RESUMO

A dinâmica hidrogeológica de zonas cársticas impacta no planejamento de expansão e ocupação de áreas urbanas. Nestas áreas, os riscos geológicos associados aos colapsos cársticos representam uma ameaça significativa ao planejamento urbano. O estudo tem como objetivo caracterizar as formações cársticas da região de Almirante Tamandaré (Paraná, Brasil) a partir da aplicação integrada de métodos geofísicos, com ênfase na eletrorresistividade, e identificar estruturas subterrâneas, como cavidades, fraturas e zonas de dissolução, que possam representar riscos ao planejamento urbano. Foram desenvolvidos cinco caminhamentos geofísicos delimitando as áreas em processo de dissolução, com abordagem baseada na interpretação de dados geofísicos de eletrorresistividade. Os resultados mostraram que os fatores estruturais, tectônicos e litológicos são predisponentes para o desenvolvimento de processos de dissolução em metacarbonatos. Foi identificado ainda a ocorrência do aquífero cárstico, onde a exploração apresenta restrições naturais para assentamentos humanos urbanos e rurais, em função do processo de dissolução das rochas metacarbonáticas que pode ser acelerado pelo uso inadequado do solo, principalmente quando resulte em alterações na dinâmica de circulação das águas subterrâneas. A área apresenta uma grande fragilidade do terreno à ocupação urbana, industrial e agrícola.

Palavras-chave: ocupação urbana, dissolução, metacarbonatos.

Electroresistivity method: implications for urban planning in karst areas of city Almirante Tamandaré (Paraná, Brazil)

ABSTRACT

The hydrogeological dynamics of karst areas have implications for the planning of urban expansion and settlement. In these areas, the geological risks associated with karst collapses represent a threat to urban planning. The aim of the study was to characterise the karst formations of the Almirante Tamandaré region (Paraná, Brazil) through the integrated application of geophysical methods, with particular emphasis on electrical resistivity, and to identify underground structures such as cavities, fractures and collapse zones that may pose risks to urban planning. Five geophysical paths were developed to delineate the areas of dissolution, with an approach based on the interpretation of geophysical electrical resistivity data. The results showed that structural, tectonic and lithological factors are predisposing factors for the development of dissolution processes in metacarbonates. The presence of a karst aquifer was also identified, the exploitation of which represents a natural limitation for urban and rural human settlements, due to the process of dissolution of metacarbonate rocks, which can be accelerated by inappropriate land use, especially if it leads to changes in the dynamics of groundwater circulation. The area presents a great vulnerability of the terrain to urban, industrial and agricultural occupation.

Keywords: urban occupation, dissolution, metacarbonates.

Introdução

As áreas cársticas, formadas pela dissolução de rochas carbonáticas, são zonas complexas para o planejamento urbano devido à suscetibilidade a processos de subsidência e colapso, provocadas pela dissolução de rochas carbonáticas (Nam et al., 2020; Robinson et al., 2021). Para Liu et al. (2024), o colapso cárstico representa uma ameaça direta à segurança urbana, sendo o principal desastre geológico em zonas urbanas. Desse modo, avançar na compreensão da dinâmica hidrogeológica de zonas cársticas em áreas urbanas é essencial para o planejamento de expansão e ocupação de áreas urbanas.

Estudos evidenciam o alto risco geológico envolvido no desenvolvimento de obras em áreas cársticas (Jiajia et al., 2022; Liu et al., 2024; Mansour et al., 2023; Ou et al., 2024). O risco associado a esses processos se intensifica com a exploração de aquíferos cársticos e a expansão territorial, que podem alterar a dinâmica da circulação das águas subterrâneas, favorecendo a ocorrência de colapsos, uma vez que o esvaziamento das cavidades é o fator mais proponente para a ocorrência das subsidências e aberturas de novas dolinas (Oliveira et al., 2020; Robinson et al., 2021). Os problemas relacionados à subsidência e ao colapso podem ser induzidos por fenômenos naturais ou por atividade antrópica (Lago et al., 2022). Dessa forma, a formação de dolinas e subsidências constituem-se em um grande risco para assentamentos urbanos (Talib et al., 2022) por comprometerem a segurança das infraestruturas (Liu et al., 2024).

Nas regiões cársticas, as formas de relevo são caracterizadas por taxas lentas de formação de solo, recursos de solo e água descoordenados, altas taxas de exposição do leito rochoso e alta heterogeneidade espacial (Li et al., 2024). Em relação a intensidade da carstificação, estudos apontam o importante papel da arquitetura solo-epicarste nos processos hidrológicos (Hu et al., 2015; Wang et al., 2020; Wang et al., 2022; Xu et al., 2020; Zhang et al., 2024). Outros fatores como a variação do nível do aquífero, terremotos, chuvas intensas, escoamento superficial e variação climática também são apontados como gatilhos para a formação de dolinas (Boualla et al., 2021; Linares et al., 2017; Youssef et al., 2016), agravando os riscos para infraestruturas urbanas.

Em áreas cársticas, os métodos geofísicos têm sido aplicados na investigação e avaliação de problemas geotécnicos que envolvem sumidouros, estruturas cársticas, entre outros (Alemdağ et al.,

2024; Ba et al., 2020; Liu et al., 2023; Özel & Darıcı, 2020). A aplicação de métodos geofísicos, como resistividade elétrica e magnéticos, tem sido eficaz na identificação de lineamentos e fraturas que influenciam a movimentação de água subterrânea, ajudando a mapear zonas com maior potencial de colapso (Stanly et al., 2021). O estudo de Khogali et al. (2024) mostrou que o uso combinado de métodos geofísicos, incluindo magnetotelúrica e métodos eletromagnéticos transitórios, permite a caracterização de estruturas subterrâneas complexas, como domos salinos e zonas de fratura, influenciando a gestão de recursos hídricos e a mitigação de riscos ambientais. O estudo de Hussain et al. (2020a) também integrou técnicas para caracterização geofísica de sistemas cársticos. Estes estudos de aplicação integrada de métodos geofísicos contribuem significativamente para uma caracterização mais aprofundada dos ambientes cársticos e a identificação de áreas de risco. Portanto, o uso integrado de técnicas geofísicas propicia uma abordagem mais robusta para investigar as áreas cársticas (Hussain et al., 2020b).

Diante disso, este estudo tem como objetivo caracterizar as formações cársticas na região de Almirante Tamandaré (Paraná, Brasil), por meio da aplicação integrada de métodos geofísicos, com ênfase na eletrorresistividade, para identificar estruturas subterrâneas, como cavidades, fraturas e zonas de dissolução, que possam representar riscos ao planejamento urbano. Pretende-se também analisar os resultados obtidos à luz dos fatores estruturais, litológicos e hidrológicos da área, visando à delimitação de zonas de risco associadas a processos de colapso e subsidência em terrenos cársticos. Assim, busca-se fornecer subsídios para uma gestão adequada do uso do solo e para decisões no planejamento urbano em áreas suscetíveis, além de contribuir para o entendimento dos processos de dissolução e evolução do carste.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada na porção não urbanizada de Almirante Tamandaré, no estado do Paraná (Figura 1), sul do Brasil (Figura 1A, B). A Cidade está a aproximadamente 15 km ao norte da capital Curitiba (Figura 1C), nas coordenadas geográficas 25°19'21" de latitude sul e 49°18'30" de longitude oeste. A região faz parte

de uma área de transição entre a Serra do Mar e o Primeiro Planalto Paranaense, o que influencia suas características geológicas e hidrológicas.

Geologicamente, está inserida na Faixa Ribeira (Almeida et al., 1973) corresponde à maior unidade da Província da Mantiqueira (Silva et al., 2005), estendendo-se por aproximadamente 2.500 km de extensão. Esta Faixa é formada pelos sistemas de dobramento, propulsão e deslizamento, e compreende os terrenos Paraíba do Sul-Embu, Cabo Frio, Apiaí, Embu, Paranaguá, Curitiba e Luís Alves (Heilbron et al., 2008).

Atualmente, o nome Faixa Ribeira foi restringido pela maioria dos autores à ampla província de deformação regional a leste dos cinturões Alto Rio Grande e Araçuaí, que se estende ao longo da costa sudeste do Brasil desde o Cráton Luís Alves até o norte, pelo menos até o Rio de Janeiro. O Domínio Apiaí, neste contexto, é referido como a porção sul da Faixa Ribeira, onde os supracrustais de baixo grau são mais bem preservados e permitem uma reconstrução estratigráfica mais precisa em contraste com as

regiões do norte que têm um grau metamórfico mais alto. Nesse sentido, o termo 'Supergrupo Açungui' foi adotado para designar os supracrustais metamórficos de baixo a médio grau da região, para distingui-los do embasamento ou complexo gnáissico-migmatítico e dos molassóides associados aos pequenos puxões tardios (Baldin et al., 2020). Este foi subdividido em uma série de cinturões longitudinais dispostos lateralmente a NE, denominados em sequência, de noroeste para sudeste: Grupo Itaiacoca, representando o Domínio Norte de formações de plataforma rasa; a Formação Água Clara e Votuverava, Grupo que representa um Domínio Central de litofácies de aprofundamento gradual; e a Formação Capiuru e Grupo Setuva, que pertencem a um Domínio Sul de formações de plataforma rasa mais embasamento.

A área de estudo está inserida na Formação Capiuru (Heilbron et al., 2008; Perrotta et al., 2004) (Figura 2D), associada aos metacarbonatos (Figura 3).



Figura 1. Área de estudo, caracterizada pela ausência de urbanização, localizada no município de Almirante Tamandaré (Paraná, Brasil).

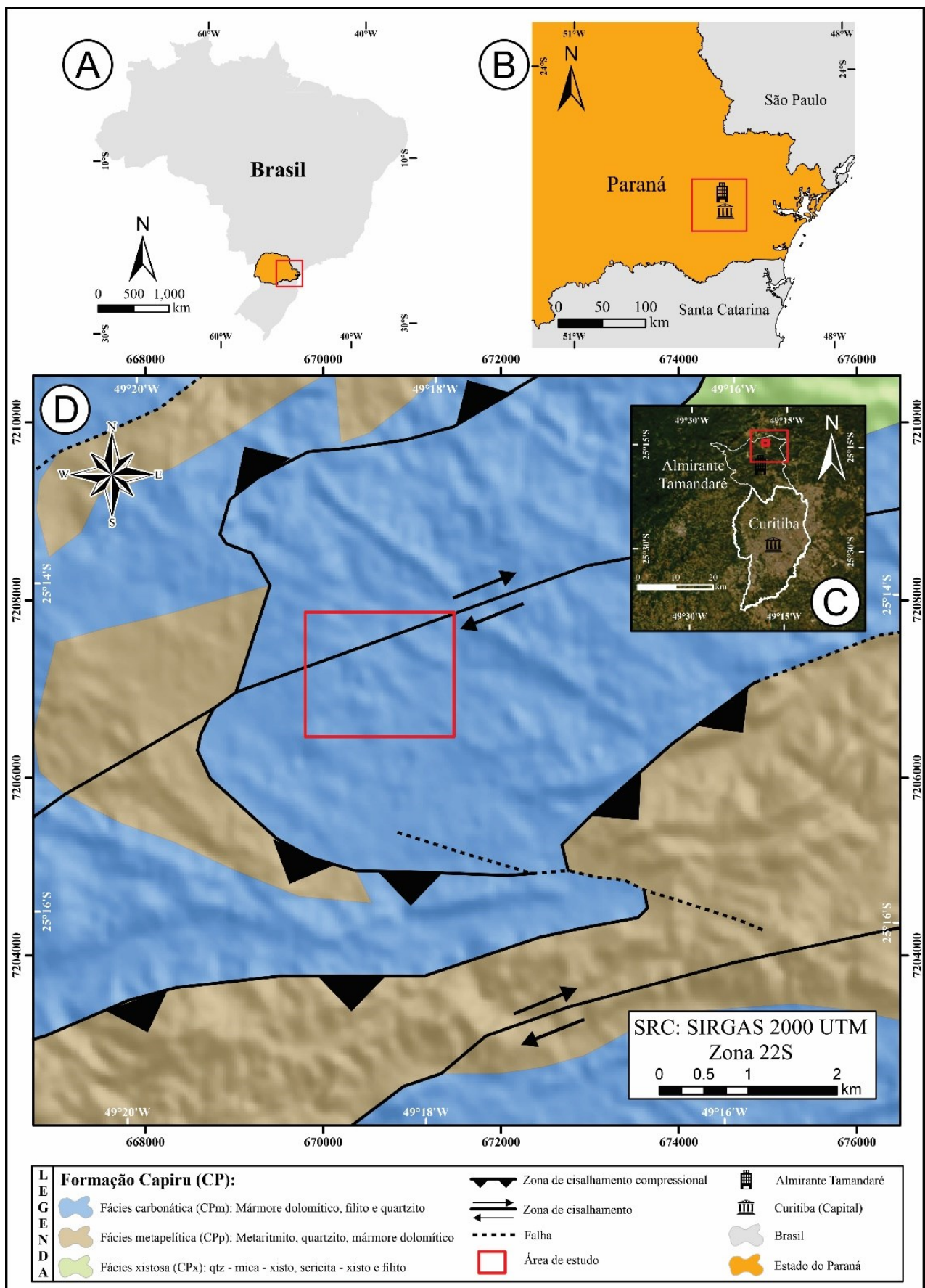


Figura 2. Mapa geológico da área de estudo, adaptado de Perrotta et al. (2004).



Figura 3. Metacarbonatos da Formação Capiru, ocorrendo na área de estudo.

Material e métodos

Equipamentos Utilizados

Para a investigação geofísica, foi utilizado um sistema de eletrorresistividade, o resistivímetro modelo TH500-16CH da marca Eletromiq, com tag de identificação 7146 E.C.R. O equipamento opera com 500 V, 250 mA e 16 canais, configurado no arranjo dipolo-dipolo (Schlumberger), que é adequado para a obtenção de bons contrastes relacionados à presença de água em subsuperfície. Essa configuração é altamente eficaz para o mapeamento de estruturas subsuperficiais em terrenos cársticos. O equipamento foi devidamente calibrado conforme as normas ABNT NBR 5180 e 6509, antes do início das medições.

Procedimentos de Aquisição de Dados

Foram realizados cinco perfis de eletrorresistividade, com espaçamento de 6 metros entre os eletrodos, abrangendo uma profundidade de investigação de até 41 metros. Os perfis foram dispostos em duas linhas com orientação NW-SE e três linhas com orientação NE-SW, formando uma grade de intersecção (Figura 4). As linhas de aquisição tinham os seguintes comprimentos: C1 (636 m), C2 (300 m), C3 (618 m), C4 (132 m) e C5

(132 m). Durante a coleta dos dados, foram consideradas as condições locais, como a presença de vegetação e variações topográficas, para otimizar o posicionamento dos eletrodos, bem como a necessidade de abertura de passagens em áreas intransponíveis, a fim de garantir a eficácia do mapeamento.

Processamento e Interpretação dos Dados

Após a aquisição dos caminhamentos elétricos, os dados foram processados utilizando o *software* RES2DINV para a obtenção dos imageamentos de eletrorresistividade. O primeiro passo consistiu na importação dos dados brutos, permitindo o início das etapas de pós-processamento. Em seguida, foram realizadas correções para eliminar possíveis erros de campo, identificando e removendo leituras anômalas (*outliers*) que pudessem ter sido causadas por mau contato dos eletrodos, interferências externas ou falhas durante a medição.

Com os dados corrigidos, realizou-se a inversão inicial, convertendo os valores de resistividade aparente em um modelo de resistividade verdadeira. Essa inversão foi conduzida utilizando o método de Gauss-Newton,

com ajustes nos parâmetros, como o número de iterações, para refinar a qualidade do modelo final. Para minimizar o efeito de ruídos sem comprometer os detalhes relevantes das anomalias, foram aplicados filtros de suavização, ajustando cuidadosamente o nível de suavização para equilibrar a resolução dos dados e a atenuação do ruído.

Nos casos em que a topografia da área de estudo apresentava variações significativas, aplicou-se uma correção topográfica ao modelo,

garantindo que as profundidades das camadas refletissem a superfície real do terreno. Finalmente, o processamento resultou na geração das 5 seções de resistividade 2D, as quais ilustram as variações de resistividade ao longo dos perfis. Essas seções foram utilizadas para identificar e interpretar as feições geológicas, como cavidades, fraturas, zonas de saturação e mudanças litológicas, fornecendo as informações essenciais para a análise geofísica da área.

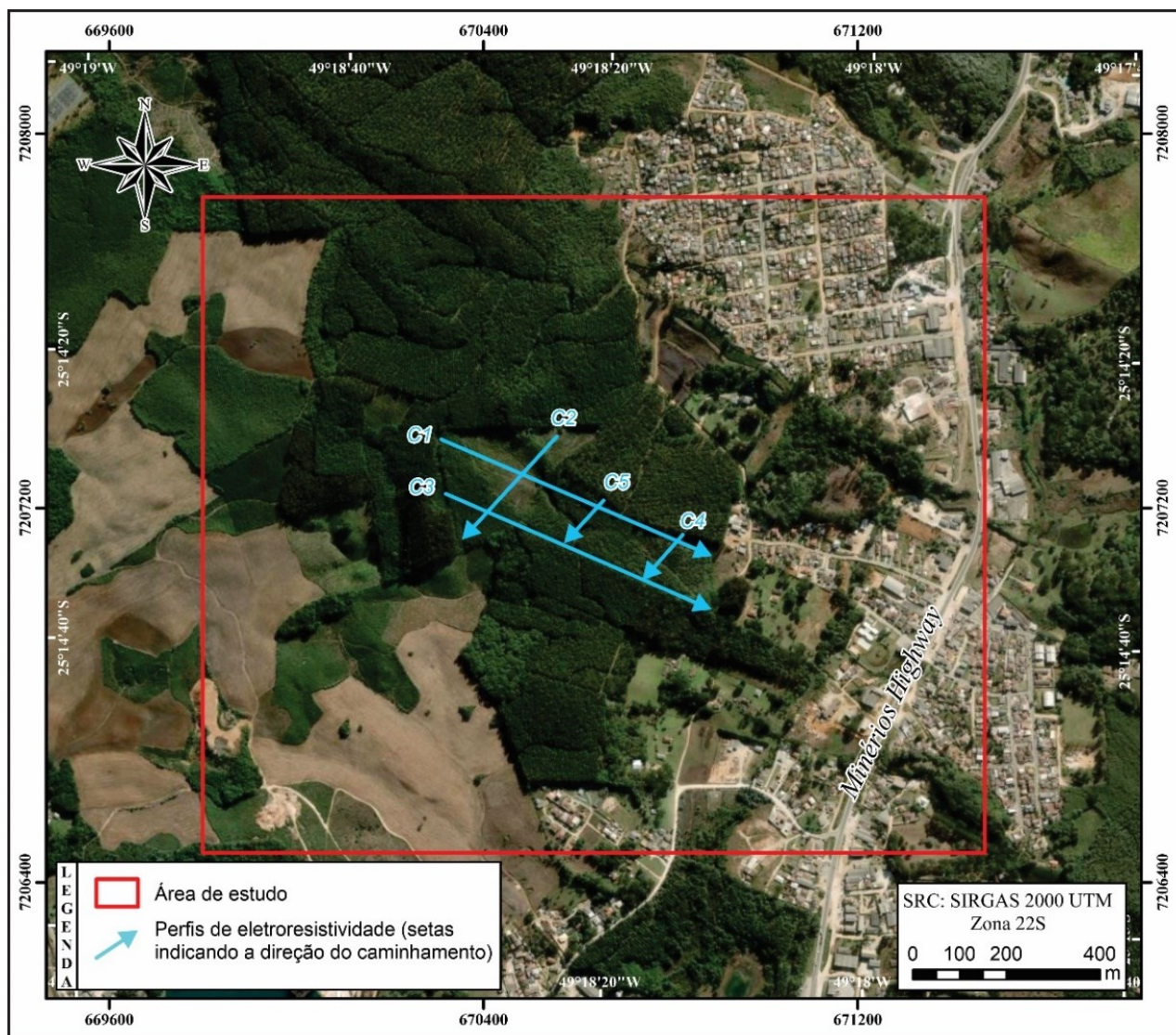


Figura 4. Mapa de localização das linhas de investigação geofísica desenvolvidas na área de estudo.

Resultados e discussão

Levantamentos elétricos

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir dos cinco perfis de eletroresistividade (ERT) realizados na área de estudo, destacando as anomalias de resistividade,

as características geológicas interpretadas e as implicações para a identificação de feições cársticas, além da discussão com trabalhos análogos.

Os levantamentos elétricos desenvolvidos forneceram imagens em profundidade do Sistema Cársico da região de Almirante Tamandaré. Os

perfis ERT C1 (Figura 5A) e C3 (Figura 5B) realizados de NW-SE e C2 (Figura 6A), C4 (Figura 6B) e C5 (Figura 6C) de NE-SW, apresentaram diferentes faixas de resistência. Nos perfis ERT, as faixas de valores da resistência aparente estão na escala logarítmica (Log_{10}) (Tabela 1), que é importante para redução do erro dos modelos, que variaram de 6 (C5) a 9,6% (C3).

Tabela 1. Valores de resistência aparente e Log_{10} .

Resistência Aparente (Ohm.m)	Log_{10} (resistência Aparente)
5	0,6990
10	1,0000
25	1,3979
50	1,6990
100	2,0000
200	2,3010
400	2,6021
600	2,7782
900	2,9542
1300	3,1139
2600	3,4150
5000	3,6990
10000	4,0000
500000	5,6990
1000000	6,0000
3000000	6,4771

- *Perfil C1 (636 m, NW-SE)*

O perfil C1 apresentou variações significativas de resistividade, com valores predominantes entre 100 e 2600 Ohm.m. Foram detectadas anomalias condutivas (<100 Ohm.m) em profundidades entre 10 e 25 metros (Figura 5A), associadas a fraturas preenchidas por água e zonas de dissolução. As zonas de maior resistividade (>2600 Ohm.m) indicam a presença de metacarbonatos não intemperizados e/ou fraturas, juntas e cavidades possivelmente preenchidas com ar.

- *Perfil C2 (300 m, NE-SW)*

O perfil C2 revelou uma resistência aparente intermediária, com valores variando entre 200 e 2300 Ohm.m (Figura 6A). Anomalias de baixa resistividade (<100 Ohm.m) foram observadas apenas em zonas próximas à superfície, indicando a presença de uma zona saturada mais rasa ou zonas mais atingidas pelo intemperismo químico próximas ao nível do terreno, sendo amparadas por um embasamento mais sã. A presença de fraturas foi confirmada pelas variações resistivas que acompanham as estruturas tectônicas identificadas.

- *Perfil C3 (618 m, NW-SE)*

O perfil C3 apresentou uma maior heterogeneidade em termos de resistividade, com faixas entre 50 e 4000 Ohm.m. As anomalias mais significativas de baixa resistividade (<100 Ohm.m) foram observadas em profundidades entre 15 e 35 metros, indicando a possibilidade de dolinas subterrâneas ou cavidades parcialmente preenchidas por água (Figura 5B). O contraste da resistividade morfológicamente também indicada a presença das cavidades, uma vez que nitidamente são vistas quedas na resistividade concêntricas e formatos elípticos. Formatos esses que são tipicamente encontrados em cavidades de dissolução em terrenos cársticos. As regiões de alta resistividade (>4000 Ohm.m) são associadas a metacarbonatos intactos, sem evidências de dissolução.

- *Perfil C4 (132 m, NE-SW)*

O perfil C4 apresentou um dos contrastes mais interessantes dentre os caminhamentos. Nele, são verificadas as resistividades mais baixas entre os perfis analisados, com valores inferiores a 100 Ohm.m em grande parte de sua extensão, com amplo destaque para a porção NW (Figura 6B). Essas anomalias sugerem a presença de zonas de alta saturação por água subterrânea, indicativas de fraturas e cavidades cársticas em dissolução ativa. Este perfil é particularmente relevante para a identificação de áreas de risco a subsidências.

- *Perfil C5 (132 m, NE-SW)*

O perfil C5 mostrou variações resistivas semelhantes às do perfil C4, com uma predominância de valores entre 50 e 200 Ohm.m (Figura 6C). Foram observadas anomalias condutivas em profundidades rasas, associadas à presença de água subterrânea em fraturas. Esse perfil reforça a interpretação de que a área de estudo é marcada por intensa circulação de água nas fraturas metacarbonáticas.

Interpretação geológica

Os resultados obtidos corroboram com características cársticas e de intemperismo em rochas carbonáticas, conforme discutido em outros estudos (Boualla et al., 2021; Dubois et al., 2014).

A interpretação integrada dos perfis de eletrorresistividade permitiu identificar três intervalos principais de resistividade:

- (1) Baixa resistividade ($<900 \text{ Ohm.m}$) associadas a rios subterrâneos, metacarbonatos altamente intemperizados e cavidades preenchidas por água;
- (2) Resistividade elétrica intermediária entre 900 e 2600 Ohm.m , associado ao metacarbonato parcialmente intemperizado, que representa as camadas superiores da rocha hospedeira, podendo conter zonas de fraturas preenchidas por sedimentos e,
- (3) Altos valores de resistividade elétrica ($>2600 \text{ Ohm.m}$), relacionado ao metacarbonato não

intemperizado e cavidades não preenchidas por água ou sedimentos.

As anomalias de resistividade em profundidade indicam a presença de cavidades cársticas e fraturas que podem ser associadas a processos de dissolução em andamento. Os resultados também revelaram que as fraturas identificadas acompanham as principais estruturas tectônicas da região, confirmando a influência dos fatores estruturais no desenvolvimento das feições cársticas (Figura 7).

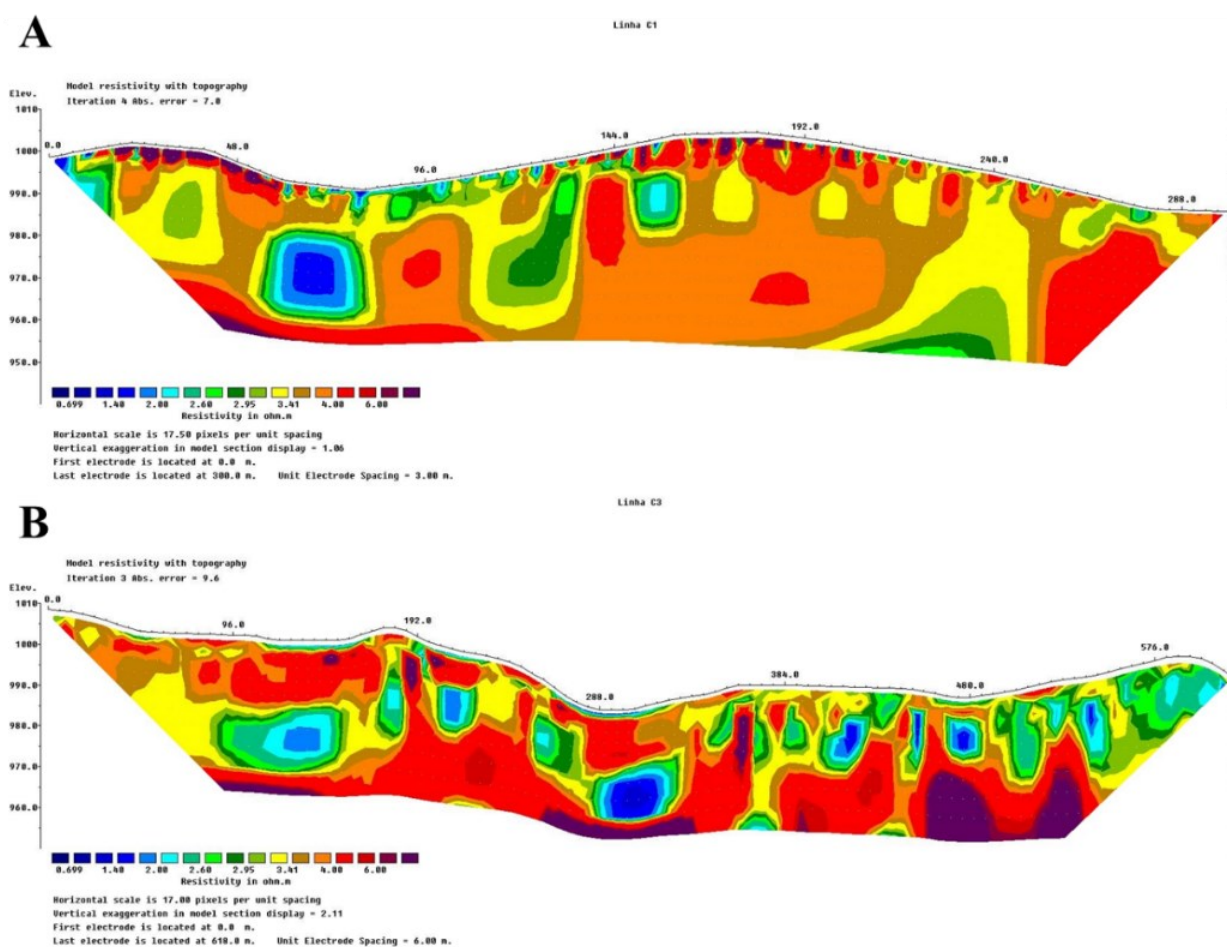


Figura 5. Imageamento Elétrico 2D – ajustado. (A) C1 (Erro = 7%); B) C3 (Erro = 9,6%).

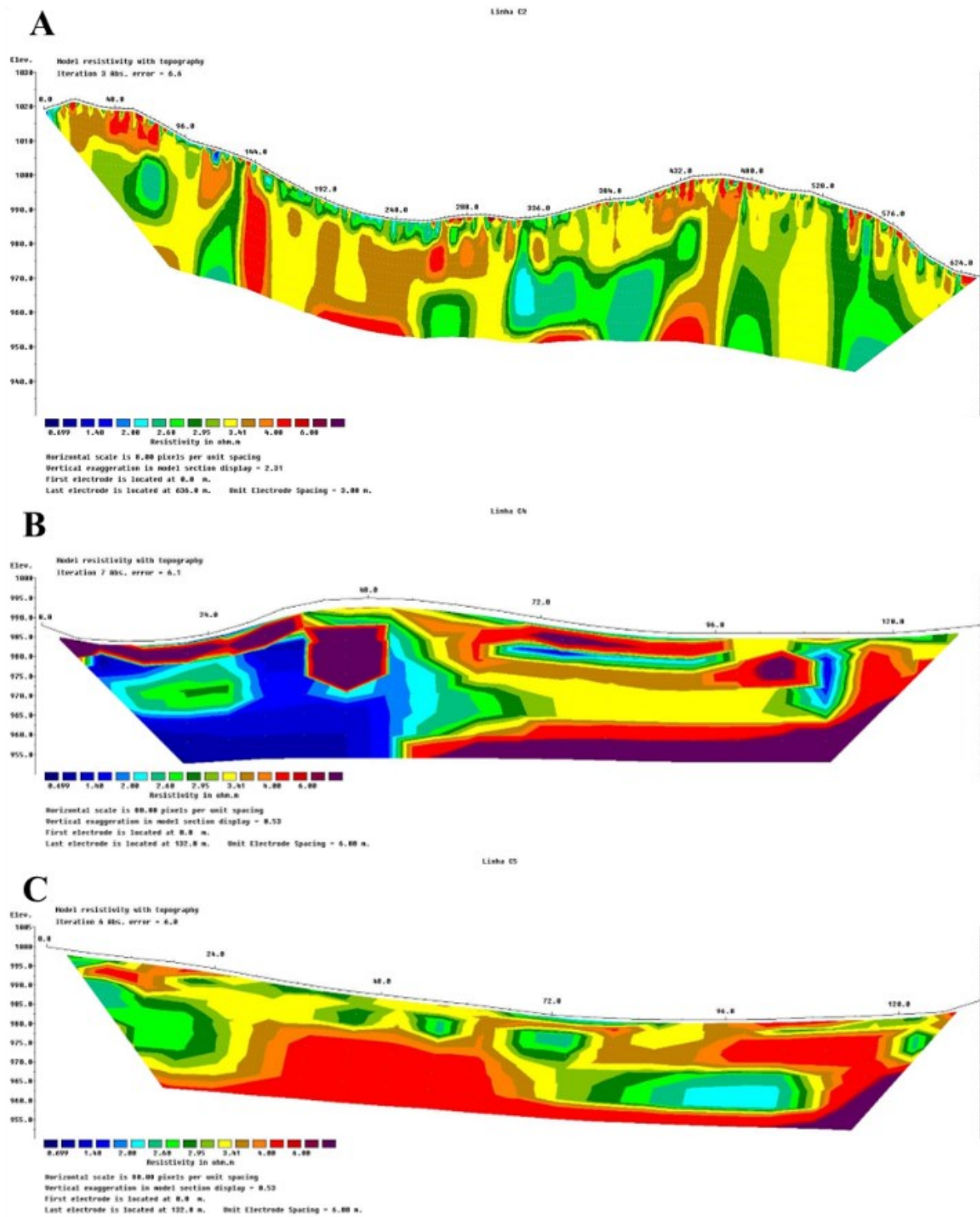


Figura 6. Imageamento Elétrico 2D – ajustado. (A) C2 (Erro = 6,6%); (B) C4 (6,1%) e (C) C5 (Erro = 6%).

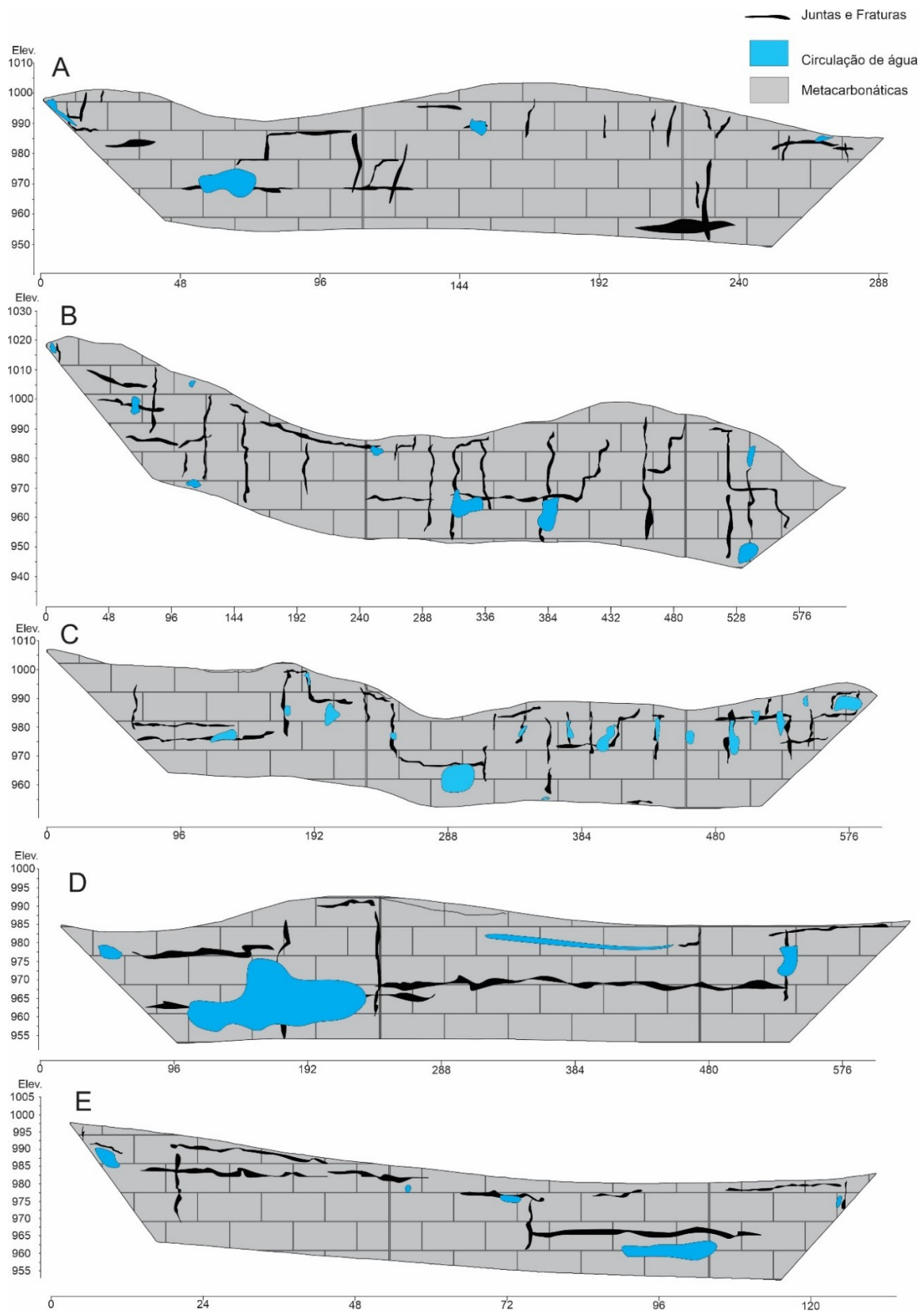


Figura 7. Perfil geológico a partir dos caminhamentos geofísicos, com a identificação em pontos mais susceptíveis da rocha-fratura, juntas, planos de acamamento formando pequenas depressões: (A) C1, (B) C2, (C) C3, (D) C4 e (E) C5.

A avaliação dos perfis ETR de maneira integrada com os dados de relevo indica uma relação com a geomorfologia da área de estudo, para os perfis estudados (Figura 7).

As cotas superiores dos perfis geológicos (1020 e 1975 m) são caracterizadas por juntas ou fraturas não necessariamente preenchidas por água subterrânea. Porém, as cotas inferiores, entre 1975 e 955 m, são formadas por cavidades preenchidas por água subterrânea, que podem apresentar até 6 m de largura, conforme C4 (Figura 6D). Nos perfis ERT, foram identificadas faixas intermediárias (100-2600 Ohm.m) e anomalias indicativas de águas subterrâneas ou alteração de rocha carbonática (<100 Ohm.m). Além disso, os perfis apresentam outras anomalias resistivas que podem corresponder a zonas fraturadas e áreas de dissolução. Foram identificadas anomalias resistivas inferiores a 100 Ohm.m, principalmente para o C4 (Figura 6B).

Conforme o perfil geológico apresentado na Figura 7, a área de investigação é caracterizada por processo de dissolução de metacalcário, provocado pela maior dissolução em pontos susceptíveis da rocha, como as fraturas e juntas. A análise destes dados, permitiu destacar os fatores predisponentes, desencadeantes e agravantes durante a formação das cavidades cársticas.

A investigação geofísica realizada na área não urbanizada de Almirante Tamandaré, refletida pelos perfis elétricos e análise do relevo da área de estudo, não revelou dolinas de colapso com resistividades >2600 Ohm.m representando a camada superior a rocha hospedeira. Porém, foram identificadas diversas juntas e fraturas preenchidas por água subterrânea, com faixa <100 Ohm.m de resistividade, bem como zona aquífera identificada principalmente no C4.

O método geofísico de eletrorresistividade empregado para aquisição dos dados supracitados, forneceu informações específicas relacionadas à estrutura física e elétrica dos terrenos cársticos. O método permitiu delinear os limites e espessuras de unidades em um sistema cárstico e a estrutura dos sistemas aquíferos subjacentes, corroborando com o sucesso da abordagem apresentado nos últimos anos por outros autores (Andrade-Gómez et al., 2019; Cardarelli et al., 2014; Chalikakis et al., 2011; Furtado et al., 2022; Mohamed et al., 2019; Robinson et al., 2021; Torrese et al., 2022). As feições cársticas foram detectadas, contrastando as propriedades elétricas entre a rocha hospedeira, geometrias estruturais e hidrogeologia.

A interpretação integrada dos perfis de eletrorresistividade permitiu identificar três

intervalos principais de resistividade: baixa (<900 Ohm.m), intermediária (900–2600 Ohm.m) e alta (>2600 Ohm.m). A baixa resistividade foram predominantemente associada a rios subterrâneos, metacarbonatos altamente intemperizados e cavidades preenchidas por água, enquanto a resistividade intermediária foi relacionada a metacarbonatos parcialmente intemperizados e fraturas preenchidas por sedimentos. Por fim, os altos valores de resistividade correspondem a metacarbonatos não intemperizados e cavidades possivelmente vazias.

Os resultados obtidos no presente estudo são consistentes com achados de outras regiões cársticas estudadas. No caso da China, em Wuhan, as cavidades subterrâneas preenchidas por água foram identificadas com valores de resistividade semelhantes, variando abaixo de 100 Ohm.m, o que reflete a saturação de água nas fraturas e zonas de dissolução (Liu et al., 2024). Da mesma forma, no estudo realizado no Valliyar River Basin, na Índia, as fraturas preenchidas por água subterrânea também exibiram resistividades inferiores a 100 Ohm.m, corroborando com os resultados obtidos nos perfis C4 e C5 da área de Almirante Tamandaré, que apresentaram anomalias condutivas associadas a água subterrânea e cavidades ativas (Stanly et al., 2021).

No estudo da Arábia Saudita, no Parque Nacional de Al-Hassa, os valores de resistividade relacionados a cavidades saturadas com água subterrânea ficaram também abaixo de 100 Ohm.m, reforçando a interpretação de que as anomalias de baixa resistividade nos perfis C4 e C5 indicam a presença de fraturas e cavidades preenchidas por água na área de estudo (Khogali et al., 2024). Além disso, em Kribi, Camarões, foram registrados valores de resistividade variando entre 100-200 Ohm.m em zonas saturadas com água subterrânea. As camadas mais condutivas, com resistividades inferiores a 100 Ohm.m, foram associadas a fraturas preenchidas por água (Yevalla et al., 2024).

As comparações com estudos internacionais mostram a robustez dos resultados obtidos, uma vez que os valores de resistividade encontrados para as cavidades cársticas e fraturas em Almirante Tamandaré seguem o mesmo padrão observado em outras regiões cársticas, sugerindo que as anomalias de baixa resistividade nos perfis ERT são indicativas de zonas de dissolução e saturação de água. Dessa forma, o estudo confirma a presença de feições cársticas e reforça a necessidade de um planejamento cuidadoso da

ocupação urbana nessas áreas devido ao risco de colapsos e subsidências.

Implicações para o planejamento urbano

A partir dos dados obtidos observa-se uma grande fragilidade do terreno à ocupação urbana, industrial e agrícola. No caso de ocupações dessas áreas, haverá alterações na dinâmica de circulação das águas subterrâneas, seguida pelo processo de dissolução das rochas metacarbonáticas existentes. O impacto do processo de ocupação destas porções cársticas de Almirante Tamandaré foi relatado por Bollmann et al. (2013), que apontaram que a fragilidade geotécnica do terreno, frente aos riscos da ocupação dessas áreas. Para os mesmos autores, a presença de atividades de indústria e agricultura, bem como com a superexploração de água do aquífero subterrâneo para abastecimento público ou comercialização, com a contaminação de rios e águas subterrâneas, são os principais impactos.

Com relação a mudança na dinâmica de circulação das águas subterrâneas, ocasionada no caso de bombeamento do aquífero, com o aumento da diferença de carga hidráulica, causaria grande impacto sobre as cavidades cársticas identificadas. O mesmo risco foi identificado para áreas urbanas, por Nam et al. (2020), apontando o rebaixamento do aquífero como a principal causa antrópica da formação das cavidades cársticas.

Conclusões

O estudo permitiu identificar e delimitar áreas de risco em processo de dissolução na região de Almirante Tamandaré (Paraná, Brasil), com base na interpretação de dados de eletrorresistividade. Os resultados mostraram que os fatores estruturais, tectônicos e litológicos são predisponentes para o desenvolvimento de processos de dissolução em metacarbonatos. A orientação das fraturas e a presença de água subterrânea em cavidades alinhadas com as principais estruturas tectônicas confirmaram a influência desses fatores na formação de feições cársticas.

Os levantamentos geofísicos realizados contribuíram para uma melhor compreensão dos mecanismos de formação das cavidades cársticas e dos padrões de circulação de água subterrânea na área de estudo. As anomalias de resistividade indicaram a presença de fraturas preenchidas por água e zonas de dissolução, além de destacar áreas com maior susceptibilidade à ocorrência de colapsos. Em profundidades de até 30 m, os níveis resistivos não indicaram a presença de água

subterrânea ou de cavidades cársticas, mas confirmaram a presença de condutividade aumentada em fraturas e zonas de infiltração. Além disso, a presença de anomalias condutivas abaixo das fraturas expostas confirmou a presença de circulação de água em rio subterrâneo.

Os resultados obtidos têm implicações importantes para o planejamento urbano e o controle de ocupação em áreas cársticas. Recomenda-se que o poder público, seja em âmbito Federal, Estadual ou Municipal, considere o risco, a susceptibilidade e a vulnerabilidade associada à terrenos cársticos durante o rito do licenciamento ambiental, adotando critérios embasados na ciência e técnica refinada para a aprovação de novos empreendimentos, especialmente em regiões onde as atividades de exploração de água subterrânea e o uso do solo possam alterar a dinâmica hídrica e acelerar os processos de dissolução. Medidas de mitigação, como monitoramento contínuo e controle de cargas hidráulicas, recarga artificial do aquífero e até mesmo adensamento de malhas de perfis de eletrorresistividade em unidades de litotipos carbonáticos são essenciais para minimizar os riscos associados à ocupação dessas áreas.

Por fim, o método de eletrorresistividade demonstrou ser uma ferramenta eficaz para mapear cavidades de dissolução e estruturas subsuperficiais em terrenos cársticos. No entanto, futuras investigações poderiam beneficiar-se da aplicação de métodos geofísicos complementares, como sísmica, radar ou até mesmo gravimetria, para aumentar a resolução dos modelos geológicos e aprimorar o entendimento dos processos cársticos em maior detalhe.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Empresa Geosollo pela colaboração durante o levantamento de dados.

Referências

- Alemdağ, H., Köroğlu, F., Aydın, Z.Ö., Şeren, A., Babacan, A.E., & Ersoy, A.F. (2024). Deciphering of karst geomorphology and sinkhole (doline) structures using multiple geophysical and geological methods (Trabzon, NE Türkiye). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(286), 1-32. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03779-7>
- Almeida, F.F.M., Amaral, G., Cordani, U.C., & Kawashita, K. (1973). The Precambrian evolution of the South American cratonic margin south of the Amazon River. In: Nairn,

- E.M., Stehli, E.G. (Eds.), *The Ocean Basins and Margins I. Plenum*, pp. 441–446
- Andrade-Gómez, L., Rebolledo-Vieyra, M., Andrade, J.L., López, P.Z., & Estrada-Contreras, J. (2019). Karstic aquifer structure from geoelectrical modeling in the Ring of Sinkholes, Mexico. *Hydrogeol. Journal*, 27, 2365–2376. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02016-w>
- Ba, X., Li, L., Wang, J., Zhang, W., Fang, Z., Sun, S., Liu, Z., & Xiong, Y. (2020). Near-surface site investigation and imaging of karst cave using comprehensive geophysical and laser scanning: a case study in Shandong, China. *Environmental Earth Sciences*, 298, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09037-9>
- Baldin, M.T., Salamuni, E., & Lagoeiro, L.E. (2020). Petrographic, structural and textural analysis of the Atuba Complex, Southern Ribeira Belt: Case study in the Greca quarry, *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102821>
- Boualla, O., Fadili, A., Najib, S., Mehdi, K., Makan, A., & Zourarah, B. (2021). Assessment of collapse dolines occurrence using electrical resistivity tomography: Case study of Moul El Bergui area, Western Morocco. *Journal of Applied Geophysics*, 191, 104366, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104366>
- Bollmann, H.A., Gasparin, D.C., & Duarte, F. (2013). Restrição ambiental ou oportunidade para o desenvolvimento sustentável? Aquífero Carste na Região Metropolitana de Curitiba. *Cadernos. Metrópole*, 15(30), 645-665. <http://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2013-3013>
- Cardarelli, E., Cercato, M., Donno, G.D., & Filippo, G.D. (2014). Detection and imaging of piping sinkholes by integrated geophysical methods. *Near Surface Geophys*, 12, 439–450. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2013051>
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R., & Bosch, F.P. (2011). Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal*, 19, 1169–1180. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0746-x>
- Dubois, C., Quinif, Y., Baele, J. M., Barriquand, L., Bini, A., Bruxelles, L., Dandurand, G., Havron, C., Kaufmann, O., Lans, B., Maire, R., Martin, J., Rodet, J., Rowberry, M.D., Tognini, P., & Vergari, A. (2014). The process of ghost-rock karstification and its role in the formation of cave systems. *Earth-Science Reviews*, 131, 116-148. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.01.00>
- Furtado, C.P.Q., Borges, S.V.F., Bezerra, F.H.R., Castro, D.L. de., Maia, R.P., Teixeira, W.L.E., Souza, A.M., Auler, A.S., & Lima-Filho, F.P. (2022). The fracture-controlled carbonate Brejões Karst System mapped with UAV, LiDAR, and electroresistivity in the Irecê Basin – Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 119, 103986, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103986>
- Heilbron, M., Valeriano, C.M., Tassinari, C.C.G., Almeida, J.C.H., Tupinamba, M., Siga Junior, O., & Trouw, R.A.J. (2008). Correlation of Neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. In: Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., Brito Neves, B.B., de Wit, M. (Eds.), *West Gondwana Pre-cenozoic Correlations across the South Atlantic Region*, vol. 294. *Journal Geological Society London, Special Publication*, pp. 211–232.
- Hu, K., Chen, H., Nie, Y., & Wang, K. (2015). Seasonal recharge and mean residence times of soil and epikarst water in a small karst catchment of southwest China. *Scientific reports*, (10215), 1-12. <https://doi.org/10.1038/srep10215>
- Hussain, Y., Uagoda, R., Borges, W., Nunes, J., Hamza, O., Condori, C., Aslam, K., Dou, J., & Cárdenas-Soto, M. (2020a). The Potential Use of Geophysical Methods to Identify Cavities, Sinkholes and Pathways for Water Infiltration. *Water*, 12(8), 1-19. <https://doi.org/10.3390/w12082289>
- Hussain, Y., Uagoda, R., Borges, W., Prado, R., Hamza, O., Cárdenas-Soto, M., Havenith, H-B., & Dou, J. (2020b). Detection of Cover Collapse Doline and Other Epikarst Features by Multiple Geophysical Techniques, Case Study of Tarimba Cave, Brazil. *Water*, 12(10), 1-19. <https://doi.org/10.3390/w12102835>
- Jiajia, S., Hu, Z., Li, W., Changan, Z., Xing, S., Zhanquan, L., & Jie, S. (2022). Causes of Tunnel Diseases in a Karst Stratum and Remediation Measures: A Case Study. *Frontiers in Earth Science*, 10, 1-10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.882058>
- Khogali, A., Chavanidis, K., Kirmizakis, P., Stampolidis, A., Ashadi, A.L., Hanstein, T., & Candansayar, E. (2024). Subsurface characterization of the Al-Hassa National Park, Eastern Saudi Arabia, using multi-geophysical methods. *Arabian Journal for Science and*

- Engineering*, 49, 9573-9590. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09584-4>
- Lago, A.L., Borges, W.R., Barros, J.S., & Amaral, E.S. (2022). GPR application for the characterization of sinkholes in Teresina, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 81, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10265-4>
- Li, Y., Liu, Z., Liu, G., Xiong, K., & Cai, L. (2020). Dynamic variations in soil moisture in an epikarst fissure in the karst rocky desertification área. *Journal of Hydrology*, 591, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125587>
- Linares, R., Roqué, C., Gutiérrez, F., Zarroca, M., Carbonel, D., Bach, J., & Fabregat, I. (2017). The impact of droughts and climate change on sinkhole occurrence. A case study from the evaporite karst of the Fluvia Valley, NE Spain. *Science of The Total Environment*, 579, 345–358. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.091>
- Liu, R., Sun, H., Qin, J., & Zheng, Z. (2023). A multi-geophysical approach to assess potential sinkholes in an urban área. *Engineering Geology*, 318, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107100>
- Liu, D., Wang, L., Liu, L., Xu, J., Wu, J., & Liu, P. (2024). Application of geophysical methods in fine detection of urban concealed karst: A case study of Wuhan City, China. *China Geology*, 7, 517-532. <https://doi.org/10.31035/cg2023046>
- Mansour, K., El Zaher, M.A., Hafiz, M., Ebrahim, S., Gomaa, M., & Salem, M. (2023). Detection for severe caves and sinkholes in non-clastic rock type using GPR technique. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 12(1), 121-131. <https://doi.org/10.1080/20909977.2023.2270859>
- Mohamed, A.M.E., El-Hussain, I., Deif, A., Araffa, S.A.S., Mansour, K., & Al-Rawas, G. (2019). Integrated ground penetrating radar, electrical resistivity tomography and multichannel analysis of surface waves for detecting near-surface caverns at Duqm area, Sultanate of Oman. *Near Surface Geophysics*, 17 (4), 379–401. <https://doi.org/10.1002/nsg.12054>
- Nam, B.H., Kima, Y.J., & Younb, H. (2020). Identification and quantitative analysis of sinkhole contributing factors in Florida's Karst. *Engineering Geology*, 271, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105610>
- Oliveira, D.V.; Bacellar, L.A.P., & Aranha, P.R.A. (2020). Characterization of Susceptibility to Collapse by Structural and Geophysical Analyses in Karst Area in Sete Lagoas Municipality – MG. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 43(2), 76-86.
- Ou, X., Ouyang, L., Zheng, X., & Zhang, X. (2024). Hydrogeological analysis and remediation strategies for water inrush hazards in highway karst tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 152, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105929>
- Özel, S., & Darıcı, N. (2020). Environmental hazard analysis of a gypsum karst depression area with geophysical methods: a case study in Sivas (Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 79(115), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-8861-4>
- Perrotta, M. M., Salvador, E. D., Lopes, R. C., D'Agostinho, L. Z., Wildner, W., Ramgrab, G. E., Peruffo, N., Freitas, M. A., Gomes, S. D., Chieregato, L. A., Silva, L. C., Sachs, L. L. B., Silva, V. A., Batista, I. H., Marcondes, P. E. P. (2004). Folha Curitiba SG-22. In: Schobbenhaus, C., Gonçalves, J. H., Santos, J. O. S., Abram, M. B., Leão Neto, R., Matos, G. M. M., Vidotti, R. M., Ramos, M. A. B., Jesus, J. D. A. de. (eds). Carta geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM.
- Robinson, T., Rodgers, B., Oliver-Cabrera, T., Downs, C., Kruse, S., Wdowinski, S., Zhang, B., Jazayeri, S., Esmaeili, S., & Kiflu, H. (2021). Complex relationships between surface topography, groundmotion, and cover sediments in covered karst, west-central Florida, USA. *Geomorphology*, 392, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107927>
- Silva, L.C., McNaughton, N.J., Armstrong, R., Hartmann, L.A., & Fletcher, I.R. (2005). The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections, a zircon-based U-Pb geochronologic subdivision of the Brasiliano/Pan-African systems of orogens. *Precambrian Research*, 136, 203-240.
- Stanly, R., Yasala, S., & Murugesan, R. V. (2021). Hydrological subsurface investigation using geophysical electrical and magnetic methods in and around Valliyar river basin, India. *Results in Geophysical Sciences*, 7, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ringps.2021.100022>
- Talib, O., Shimon, W., Sarah, K., & Tonian, R. (2022). Detection of sinkhole activity in West-Central Florida using InSAR time series observations. *Remote Sensing of Environment*, 269, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112793>

- Torrese, P., Zucca, F., Martini, S., Benazzi, S., Drohobytsky, D., & Gravel-Miguel, C. (2022). Ground truth validated 3D electrical resistivity imaging of the archaeological deposits at Arma Veirana cave (northern Italy). *Journal of Quaternary Science*, 37, 1112–1132. <https://doi.org/10.1002/jqs.3406>
- Wang, F., Chen, H., Lian, J., Fu, Z., & Nie, Y. (2020). Seasonal recharge of spring and stream waters in a karst catchment revealed by isotopic and hydrochemical analyses. *Journal of Hydrology*, 591, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125595>
- Wang, F., Zhang, J., Lian, J., Fu, Z., Luo, Z., Nie, Y., & Chen, H. (2022). Spatial variability of epikarst thickness and its controlling factors in a dolomite catchment. *Geoderma*, 428, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116213>
- Xu, C., Xu, X., Liu, M., Li, Z., Zhang, Y., Zhu, J., Wang, K., Chen, X., Zhang, Z., & Peng, T. (2020). An Improved Optimization Scheme for Representing Hillslopes and Depressions in Karst Hydrology, *Water Resources Research*, 56(5), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2019WR026038>
- Yevalla, G.S., Rodrigue, E.S., Ndoh, N.E., & Tabod, C.T. (2024). Characterization of subsurface geology and hydrogeology in Kribi - Cameroon using electrical resistivity soundings and 3D-Implicit modelling: Baseline for groundwater resource management. *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101163>
- Youssef, A.M., Al-Harbi, H.M., Gutiérrez, F., Zabramwi, Y. A., Bulkhi, A.B., Zahrani, S.A., & El-Haddad, B.A. (2016). Natural and human-induced sinkhole hazards in Saudi Arabia: distribution, investigation, causes and impacts. *Hydrogeology Journal*, 24 (3), 625–644. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1336-0>
- Zhang, J., Wang, S., Fu, Z., Wang, F., Wang, K., & Chen, H. (2024). Soil thickness influences the control effect of micro-topography on subsurface runoff generation in the karst hillslope critical zone. *Catena*, 239, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107957>