



ANAIS do 34º Congresso Brasileiro de Espeleologia

Ouro Preto SP, 13-18 de junho de 2017 - ISSN 2178-2113 (online)



O artigo a seguir é parte integrando dos Anais do 34º Congresso Brasileiro de Espeleologia disponível gratuitamente em www.cavernas.org.br/34cbeanais.asp

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

SPOLADORE, A.; STEVANATO, R.; BARROS, C. E. M.. Tomografia Elétrica 2D – um apoio na detecção de cavidades em arenitos da Formação Botucatu. In: RASTEIRO, M.A.; TEIXEIRA-SILVA, C.M.; LACERDA, S.G. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 34, 2017. Ouro Preto. *Anais...* Campinas: SBE, 2017. p.457-463. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe_457-463.pdf>. Acesso em: *data do acesso*.

A publicação dos Anais do 34º CBE contou com o apoio do Instituto Brasileiro de Mineração. Acompanhe a cooperação SBE-IBRAM em www.cavernas.org.br/sbe-ibram

Esta é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia.
Consulte outras obras disponíveis em www.cavernas.org.br



IBRAM 40 anos
INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO
Brazilian Mining Association
Câmara Mineira de Brasil

TOMOGRAFIA ELÉTRICA 2D – UM APOIO NA DETECÇÃO DE CAVIDADES EM ARENITOS DA FORMAÇÃO BOTUCATU

*ELECTRIC TOMOGRAPHY 2D - A SUPPORT IN THE DETECTION OF CAVITIES IN SANDSTONES OF
THE BOTUCATU FORMATION*

Angelo SPOLADORE (1); Rodoilton STEVANATO (2); Carlos Eduardo de Mesquita BARROS (3)

(1) Universidade Estadual de Londrina – UEL, Londrina PR.

(2) Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada – LPGA/UFPR, Curitiba – PR.

(3) Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba – PR.

Contatos: spolador@uel.br.

Resumo

A pesquisa discute os resultados dos ensaios de tomografia elétrica 2D executados em quatro feições morfológicas designadas de dolinas, cujas depressões estão preenchidas por água, localizadas a sul da cidade de São Jerônimo da Serra e nas proximidades do Distrito de Terra Nova. Geologicamente, a área de estudo é dominada por basaltos e dacitos da Formação Serra Geral e arenitos da Formação Botucatu. O objetivo principal foi delinear em subsuperfície o contraste geoeletrico das citadas feições morfológicas. Os dados geoeletricos foram adquiridos ao longo de quatro linhas localizadas no terreno em função da disposição em área das dolinas. A técnica de amostragem dos dados geoeletricos foi através do arranjo dipolo-dipolo, com os eletrodos separados de 10 e 20 metros e seis níveis de profundidade de investigação. O processamento foi obtido por inversão realizado através dos programas Oasis Montaj™ e Zonge 2D Inversion for Interactive™ IP, ambos da Geosoft/Interpex. Os resultados obtidos permitiram delinear, em subsuperfície, três contextos geológico-geofísicos: 1) zonas de baixas resistividades associadas a zonas saturadas, coberturas argilosas, basaltos e possíveis diques de diabásio; 2) altas resistividades dos arenitos não saturados e, 3) baixa resistividade que pode revelar uma eventual cavidade preenchida por água no contexto dos arenitos da Formação Botucatu.

Palavras-Chave: cavidades; Formação Botucatu; tomografia elétrica 2D; modelo inverso.

Abstract

The research discusses the results of the 2D electrical tomography surveys executed in four designated morphologic sinkhole features, whose depressions are filled out with water. These are located to the south of the city of São Jerônimo da Serra and in the proximities of the district of Terra Nova. The studied area is dominated by basalts and dacites from the Serra Geral Formation and sandstones from the Botucatu Formation. The main objective was to delineate superficially the geoelectric contrast of the morphologic features. The geoelectrical data was acquired along four lines distributed in the terrain due to the arrangement of the sinkhole area. The sampling technique of the geoelectrical data was through the dipole-dipole arrangement, with the electrodes separated by 10 and 20 meters and six depth levels of investigation. Data processing was achieved by inversion performed through Oasis Montaj™ and Zonge 2D Inversion for Interactive™ IP, both from Geosoft/Interpex. The results obtained allowed to delineate, in subsurface, three geological-geophysical contexts: 1) areas of low resistivity associated with saturated zones, clay roof, basalts and possible diabase dikes; 2) high resistivity of unsaturated sandstones and 3) low resistivity that may reveal a possible cavity filled by water in the context of Botucatu Formation sandstones.

Key-words: cavities; Botucatu Formation; 2D electrical tomography; reverse model.

1. INTRODUÇÃO

O trabalho discute os resultados de ensaios de tomografia elétrica 2D executadas no município de São Jerônimo da Serra, Distrito de Terra Nova no Estado do Paraná. O objetivo principal foi delinear em subsuperfície assinaturas geoeletricas de possíveis cavidades associadas aos arenitos da

Formação Botucatu. No total foram levantadas quatro linhas em feições morfológicas associadas a possíveis dolinas preenchidas por água. As linhas foram denominadas de L1-AV (Arco Verde); L2-ZP (Zé Pretinho), L3-BE e L4-BE (Fazenda Boa Esperança), localizadas no terreno de acordo com disposição espacial das referidas dolinas. Neste trabalho apresentamos somente as L1-AV e a L2-

ZP. O processamento dos dados envolvendo as pseudoseções de resistividade aparente e os respectivos modelos de profundidade obtidos por inversão foi realizado através dos programas Oasis Montaj™ e Zonge 2D Inversion for Interactive™ IP, ambos da Geosoft/Interpex. Os modelos de profundidade permitiram delinear com razoável precisão zonas de baixas resistividades, correspondentes às zonas em que ocorre percolação por água, coberturas argilosas e rochas básicas em contraste com arenitos resistivos não saturados.

2. MÉTODOS E OBJETIVOS

A proposição do método elétrico aqui apresentado foi determinar a distribuição da resistividade em subsuperfície através de medidas na superfície do terreno. A resistividade elétrica do subsolo está diretamente relacionada a parâmetros pedológicos e geológicos como o conteúdo mineral, fluidos, porosidade e grau de saturação em água nos solos e rochas. Inicialmente, o método elétrico foi aplicado a estudos hidrogeológicos, geotécnicos e mineração.

Para o presente estudo, o referido método, foi direcionado para a identificação de contrastes resistivimétricos oriundos de zonas saturadas e não saturadas. Os dados geoeletricos foram adquiridos através da técnica de tomografia elétrica 2D, arranjo dipolo-dipolo e seis níveis de profundidade de investigação.

O equipamento utilizado foi um eletrorresistivímetro composto por dois módulos, um transmissor de corrente e outro receptor, ambos do modelo AC ABEM, visualizados na Figura 1.

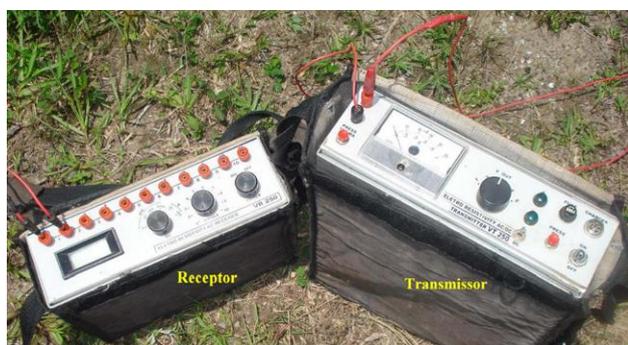


Figura 1: Sistema transmissor-receptor utilizado na aquisição dos dados geoeletricos.

2.1 Método de Inversão de uma Pseudoseção Aparente

Todos os métodos de inversão tentam, essencialmente, encontrar um modelo cujas

respostas estejam em conformidade com os dados medidos. No método calcado em células, usado pelo programa Zonge 2-D Inversion for Interactive™ IP, da Geosoft/Interpex, os parâmetros são os valores de resistividade dos blocos do modelo, enquanto que os dados são os valores da resistividade medida ou aparente. Sabe-se que para um mesmo conjunto de dados, há uma ampla variedade de modelos cujas resistividades calculadas se aproximam, em algum grau, dos valores medidos. Além de tentar minimizar as diferenças entre os valores calculados e os medidos, o método da inversão também tenta reduzir outros parâmetros que produzem certas características desejadas no modelo resultante. Os refinamentos adicionais também ajudam a estabilizar o processo de inversão. O programa Zonge 2-D Inversion for Interactive™ IP usa um método iterativo que, partindo de um modelo inicial, tenta encontrar um modelo aprimorado, cujos valores de resistividade aparente sejam mais próximos aos valores medidos. Um método iterativo de inversão já bem conhecido, é o método *smoothness-constrain* (de GROOT-HEADLIN & CONSTABLE, 1990), expresso pela equação 3:

$$(JTJ + uF)*d = JTg - uFr(3)$$

onde:

- F = uma matriz de suavização;
- J = uma matriz Jacobiana das derivadas parciais;
- R = um vetor do logaritmo dos valores de resistividade modelada;
- u = um fator de suavização;
- d = um vetor de perturbação do modelo;
- g = um vetor de discrepância.

O vetor de discrepância g contém a diferença entre os valores calculados e medidos de resistividade aparente. A magnitude deste vetor é frequentemente dada como um valor do erro médio quadrático-rms (*root-mean-squared*). Esta é parâmetro que o método de inversão tenta reduzir, buscando encontrar um modelo mais ajustado, após cada interação. O vetor de perturbação do modelo (d) é a variação dos valores de resistividade, calculados usando a equação acima, que normalmente resultam num modelo melhorado. A equação 3 tenta minimizar uma combinação de dois parâmetros, a diferença entre os valores de resistividade aparentes medidos e calculados, assim como a irregularidade ou rugosidade (ou seja, a recíproca da suavização do modelo) dos valores de resistividade.

O fator de suavização controla o peso dado à suavização do modelo no processo de inversão. Quanto maior o fator de suavização mais suavizado é o modelo, porém o erro médio quadrático (rms) é provavelmente maior.

O método básico de *smoothness-constrained*, conforme a equação 1 pode ser modificado de várias formas, as quais fornecem, em alguns casos, resultados satisfatórios. Os elementos da matriz de suavização F podem ser modificados para que as variações verticais (ou horizontais) dos valores de resistividade modelada sejam ressaltadas no modelo resultante. Ainda na equação 3, todos os pontos recebem um mesmo peso. Em alguns casos, especialmente para dados com excesso de ruído, alguns pontos com valores anormalmente altos ou baixos de resistividade aparente podem gerar efeitos indesejáveis na inversão, os quais podem ser reduzidos usando-se uma matriz de ponderação.

A mesma equação (1) também busca minimizar o quadrado das variações espaciais, ou a rugosidade dos valores de resistividade modelados. Esta abordagem é aceitável se a resistividade verdadeira variar de forma suave e gradativa. Em alguns casos o contorno geológico de um corpo pode ser homogêneo, porém seus contatos normalmente são abruptos em relação à rochas encaixantes. Para tais casos, uma fórmula de inversão que minimize as variações absolutas dos valores de resistividade modelada, pode, às vezes, levar a resultados significativamente melhores. A Figura 2 mostra os resultados obtidos através da inversão em profundidade real de uma pseudoseção de resistividade aparente realizada com o programa Zonge 2-D Inversion for Interactive™ IP com seis níveis de investigação em profundidade ($n=6$).

Também é mostrada a seção de resistividade sintética, a qual valida o modelo resultante da resistividade real. A resistividade sintética é um processo inverso, calculada a partir da resistividade real, se o resultado é semelhante à resistividade aparente, então o modelo resultante satisfaz os dados originais (EDWARDS, 1977).

2.2 Geologia da área

A Bacia Sedimentar do Paraná é uma extensa depressão deposicional situada na parte centro-leste do continente sul-americano, cobrindo cerca de 1.600.000Km². Destes, 1.000.000Km² localizam-se no território brasileiro (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

Abrange parte dos Estados de Goiás e Minas Gerais e grande parte dos Estados de São Paulo,

Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Mato Grosso. Presume-se que o centro da bacia alcance entre 4500 a 5000 metros de espessura.

É uma bacia intracratônica simétrica, preenchida por sedimentos do paleozóico, mesozóico, lavas basálticas e, localmente, rochas cenozóicas.

De acordo DNPM (1984), a sedimentação da bacia ocorreu num ambiente pouco perturbado por fenômenos tectônicos e, devido a tal fato, as unidades litoestratigráficas apresentam grande continuidade lateral, com pequenas variações faciológicas e são, geralmente subparalelas às linhas do tempo. No entanto, este fato não é verificado nas formações depositadas sob influência glaciais ou com as áreas marginais da bacia. Nas áreas marginais houve subsidência muito lenta em relação ao centro da bacia e os processos erosivos nos episódios de soerguimento foram mais intensos, foi encontrado um registro do tempo geológico muito incompleto.

Em São Jerônimo da Serra foram identificadas rochas pertencentes à Formação Rio do Rasto (Grupo Passa Dois) e as formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral (Grupo São Bento), unidades estas pertencentes à Bacia Sedimentar do Paraná (Figura 2).

• Grupo Passa Dois

Formação Irati: A Formação Irati é subdividida nos Membros Taquaral e Assistência. O Membro Taquaral, formado em plataforma rasa, é constituído por argilitos e folhelhos cinzentos com laminação paralela. Já o Membro Assistência, foi depositado em ambiente de bacia restrita, sendo formado por folhelhos pretos, pirobetuminosos, com intercalações de calcário e laminação paralela.

Formação Serra Alta: As rochas pertencentes a esta unidade foram depositadas em plataforma epinerítica, sendo compostas por de lamitos e folhelhos cinza escuros, microlaminados ou maciços.

Formação Teresina: Esta unidade é constituída por siltitos acinzentados com intercalações de calcário micrítico e estromatolítico, gerados em ambiente de planície de marés e plataforma epinerítica. Apresenta laminação paralela, ondulada e flaser.

Formação Rio do Rasto: A Formação Rio do Rasto é subdividida nos Membros Morro Pelado e Serrinha. O Membro Morro Pelado foi depositado em ambiente fluvial e de planície deltáica, sendo

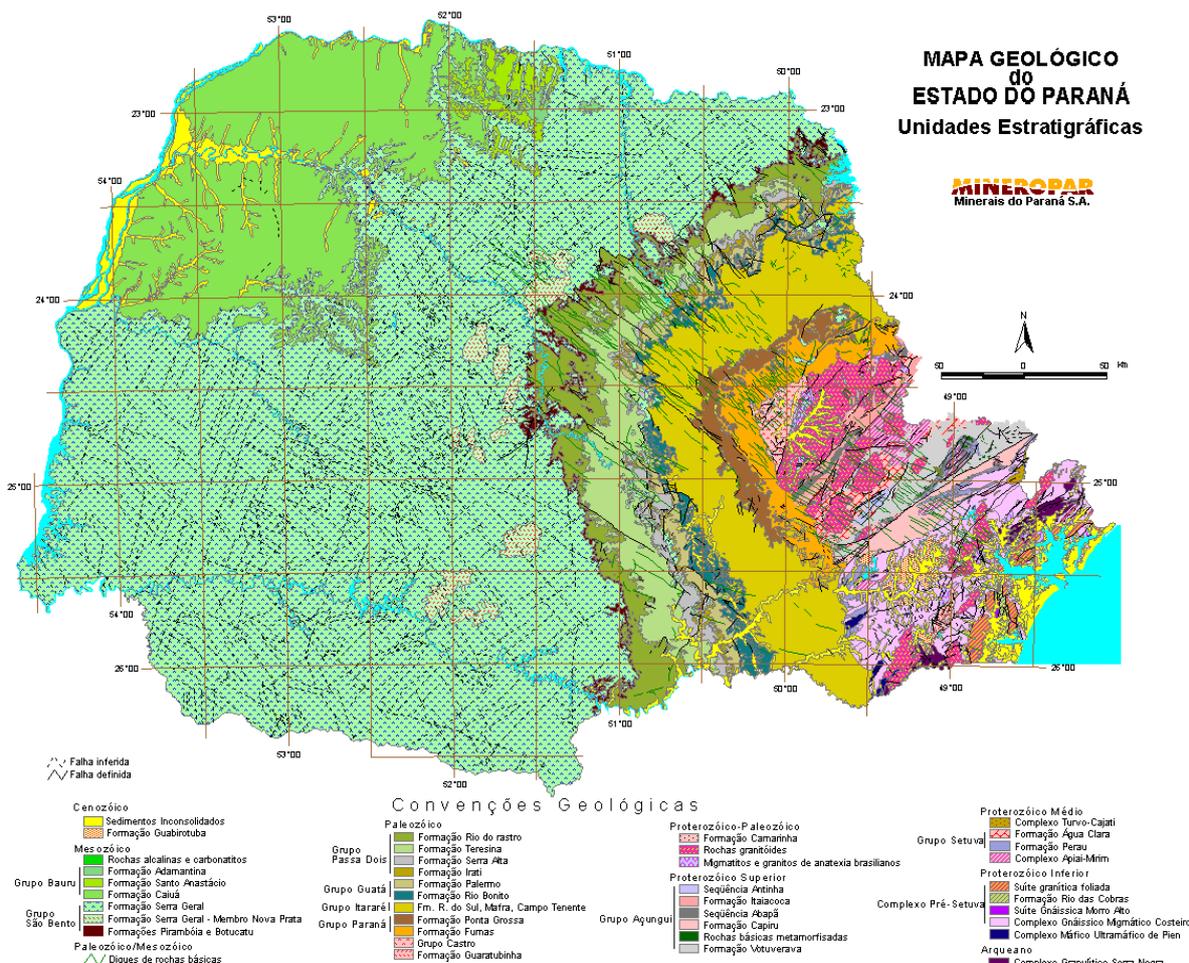


Figura 2: Mapa Geológico simplificado da área de estudo. Fonte: MINEROPAR (2003) – modificado.

Formação Serra Geral: Esta unidade, de idade jurássica-cretácica, é constituída por extensos derrames de rochas ígneas, onde os basaltos são os termos predominantes. O Membro Nova Prata é formado por rochas ígneas cuja composição varia de básicas a ácidas (basaltos pórfiros, dacitos, riodacitos e riólitos). As atividades tectono-magmáticas que ocorreram durante o Mesozóico relacionadas com a reativação do Arco de Ponta Grossa, são representadas regionalmente por um enxame de diques preenchidos por diabásio, diorito, diorito pórfiro e quartzo diorito.



Figura 3: Mapa de localização das dolinas investigadas pela geofísica (Fonte: Google Earth).

3. RESULTADOS OBTIDOS

A área de estudo se localiza no município de São Jerônimo da Serra-PR em ambiente geológico dominado pelo magmatismo basáltico da Formação Serra Geral e dos arenitos da Formação Botucatu da Bacia do Paraná (Figura 3).

Os resultados obtidos são apresentados individualmente para as quatro linhas adquiridas. A localização da Linha L1-AV é mostrada na Figura 4 e os seus resultados na Figura 5. O modelo de profundidade da resistividade real exhibe, na porção superficial do extremo SE, uma fina camada condutiva composta por solo vermelho argiloso derivado dos basaltos da Formação Serra Geral. Nos outros segmentos superficiais o ambiente é resistivo, excetuando-se a porção entre as estações 70 e 100

metros, que mostra camadas condutivas associadas com a parte alagada. Na parte central e mais profunda do modelo, ocorre um núcleo condutivo compreendido entre as estações 50 e 110 m, em contato com tratos resistivos nas extremidades do modelo. Este núcleo condutivo foi interpretado como sendo uma área com infiltração e percolação de água, que deve alimentar uma possível cavidade centrada na estação 60 m, dentro dos arenitos da Formação Botucatu, com as seguintes dimensões médias: 10 m de altura por 3 m de largura, cujo teto situa-se em torno de 8 m de profundidade.

As figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, a localização e a resistividade real da Linha L2-ZP. Os resultados geoeletricos configuram um meio predominantemente resistivo formado pelos arenitos da Formação Botucatu e um trato NW mais condutivo, provavelmente associado com um dique de rocha básica com uma descontinuidade geoeletrica próxima da estação 110m. Neste exemplo não se pode afirmar que existam cavidades associadas à dolina.



Figura 4: Mapa de localização da dolina e Linha L1-AV.



Figura 6: Mapa de localização da dolina e da Linha L2-ZP.

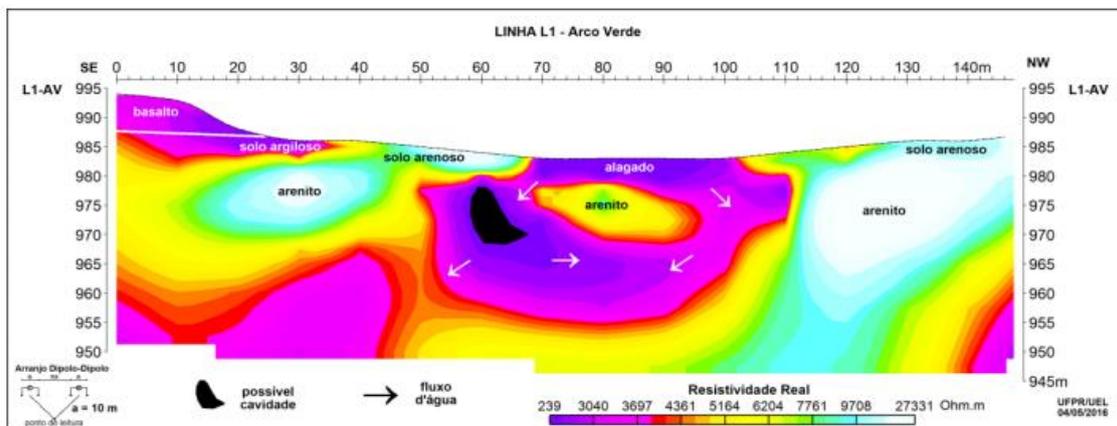


Figura 5: Seção de resistividade real obtida pela inversão em profundidade real da Linha L1-AV.

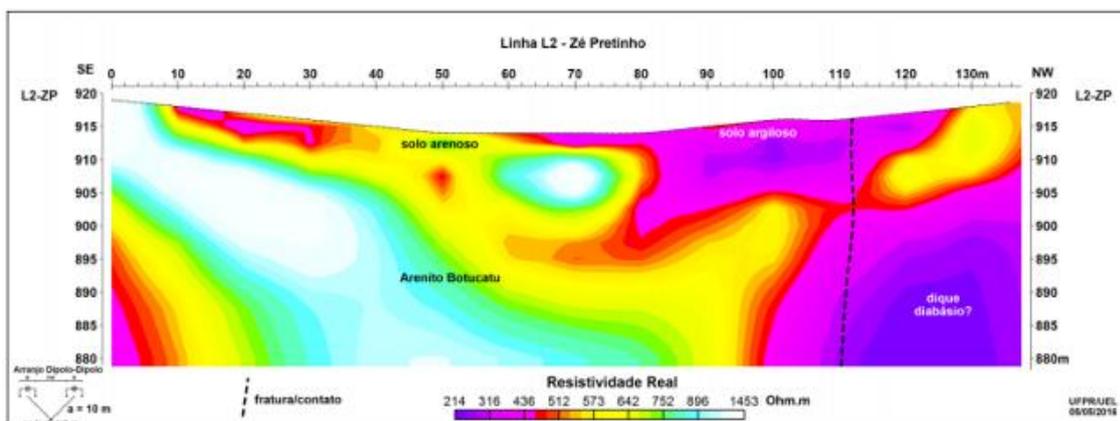


Figura 7: Seção de resistividade real obtida pela inversão em profundidade real da Linha L2-ZP.

4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados alcançados nesta pesquisa, se evidenciou que apenas a Linha L1-AV mostrou características geelétricas que podem estar associadas a possível cavidade nos arenitos da

Formação Botucatu. As outras dolinas investigadas permitiram concluir que tais feições morfológicas estão associadas a eventos tectônicos da geologia local, formada pelo desenvolvimento pedológico, dacitos da Formação Serra Geral e pelos arenitos.

REFERÊNCIAS

- DeGroot-Hedlin, C. & Constable, S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, twodimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, vol.55, p.1613-1624.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL. 1984. *Geologia do Brasil*. Brasília, DNPM.
- Edwards, L.S. 1977. A Modified Pseudosection for Resistivity and IP. *Geophysics*, vol 42, n. 5, p.1020-1036.
- MINEROPAR. www.mineropar.com.br. Visita: 16/03/2017.
- Loke, M.H. 2004. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Coursenotes - www.geoelectrical.com.
- Schneider, R.L.; Mühlmann, H.; Tommasi, E.; Medeiros, R. A .; Daemon, R.F.; Nogueira, A. A. 1974. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. *Anais do XXVIII Congresso Bras. De Geol.* Vol. 1, pp: 41 – 66. Porto Alegre, RS.