



MODELAGEM DE DADOS DE POTENCIAL ESPONTÂNEO (SP) E SUA INTEGRAÇÃO COM DADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM LAVRAS DO SUL (RS): UMA PERSPECTIVA NA PROSPECÇÃO AURÍFERA

Rosales, M. J. T., UNIPAMPA, Guimarães, M. F. S. B. *, UNIPAMPA Dias, A. L. L., UNIPAMPA, Alcalde G., UNIPAMPA

Copyright 2019, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 August 2019.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Spontaneous Potential (SP) is a natural field geophysical method widely used in mineral exploration and groundwater study, based on the measurement of a potential difference between two electrodes introduced into the soil.

This research aims to demonstrate the efficiency of the Spontaneous Potential Method (SP) in detailed scale geophysical surveys in Lavras do Sul Intrusive Complex (CILS), in an area of 4.8 km². It was used resistivity data from a Vertical Electrical Survey (VES), located near the SP profiles, in order to correlate the geological and geometric parameters with the results obtained in the SP models. The results of the qualitative interpretation of the Spontaneous Potential data obtained for the E-E' and D-D' profiles indicates the presence of anomalies of the order of +15 mV to -5 mV, following in general, the flow direction of water coming from the streams suggesting the presence of fractures filled with water. The 2D modeling of the Spontaneous Potential data corresponds to the A-A' profile oriented according to WWS-EEN, B-B' profile oriented according to NW-SE, E-E' profile oriented according to WWN-EES, D-D' profile oriented according to NW-SE and F-F' profile oriented according to SW-NE. According to the proposed geophysical models, anomalies with a negative signal of low amplitude around -10 mV and -5 mV may be associated with the presence and/or accumulation of water in zones of fractures, almost outcropping, that can extend from the first meters in surface, presenting continuity in depth. Significant results from the spontaneous potential data models indicate the presence of fracture zones with accumulations of groundwater circulation that may be associated with areas of hydrothermal alteration with probable occurrence of metallic and / or gold mineralization.

Introdução

A área da pesquisa se encontra inserida na porção central do Complexo Intrusivo Lavras do Sul (CILS), compreendendo rochas pertencentes ao enclave central, caracterizadas por Biotita (Bt) - Granodiorito de aproximadamente 601 - 599 Ma, e de Anfibólio (Amp) -

Biotita (Bt) (Gastal *et al.*, 2006). A área possui 1,49 km² e se situa na localidade rural do Cerrito, em torno de 2 km a Leste da cidade de Lavras do Sul (RS), delimitada geograficamente pelas longitudes UTM: 223640 W – 223920 W, e as latitudes UTM: 6589060 S – 6588760 S.

A finalidade da pesquisa de maneira geral é demonstrar o grau de eficiência da aplicação do Método de Potencial Espontâneo (SP) em levantamentos geofísicos em escala de detalhe (~ 1:2000), com um intervalo de amostragem de aproximadamente 15 metros, tendo como objetivo principal esclarecer questões relacionadas com a caracterização geológica e geofísica, visando à identificação e caracterização de zonas com alteração hidrotermal associadas com zonas de falhas e/ou de fraturas, com perspectivas de hospedarem presença de mineralização metálica em sulfetos disseminados, e por consequência mineralização aurífera. Para a aplicação do método de SP, foram escolhidos dois setores da área de estudo, caracterizado pela presença de um solo residual provindo de rochas granodioríticas, onde se observam fragmentos de rochas alteradas oriundas de rejeitos de antigas trincheiras alguns destaques para afloramentos de rochas de similar composição. Os resultados da interpretação qualitativa dos dados de SP, indicam a presença de intervalos de valores de SP de +30 mV a -10 mV, nos perfis A-A', B-B', E-E', D-D' e F-F', correlacionando-se de maneira geral, com uma direção de fluxo de água proveniente dos riachos (zona de drenagem) vindo de áreas de cotas mais elevadas para as áreas mais baixas, sugerindo a presença de fraturas preenchidas com água, uma vez que trata-se de anomalias de pequena amplitude, se comparadas com as que poderiam esperar-se para a presença de mineralização metálica em veios de quartzitos. Foram utilizados dados de resistividade oriundos de duas Sondagens Elétricas Verticais (SEV), localizadas próximo aos perfis de SP, a fim de correlacionar os parâmetros geoeletricos e geométricos com os resultados obtidos nos modelos de SP.

Resultados obtidos a partir do mapa da anomalia de SP, e da interpretação quantitativa dos modelos geofísicos geológicos obtidos para os perfis B-B', E-E' e D-D', sugere a presença de água nas zonas de fraturas das rochas granodioríticas.

Materiais e Métodos

O Potencial Espontâneo (SP) é um método geofísico de campo natural muito utilizado em prospecção mineral e no estudo de águas subterrâneas, baseando-se na medição de uma diferença de potencial entre dois eletrodos introduzidos no terreno. Segundo Orellana, 1972, este método baseia-se no fato de que, sob certas

condições geológicas, na presença de heterogeneidades condutoras do subsolo, estas são polarizadas, tornando-se verdadeiras baterias elétricas, que originam correntes elétricas no subsolo. Essas correntes produzem uma distribuição de potenciais observáveis na superfície do terreno, o que pode revelar a presença de um corpo polarizado. Entre os corpos que podem apresentar este fenômeno estão os depósitos de alguns sulfetos (pirita, pirrotita, calcocita, etc.), certos óxidos (magnetita, pirolusite), minerais ou rochas carbonatadas (grafite, antracito) e a presença de fluxo de água. A anomalia de SP produzida pela presença de fluxo de água subterrânea tende a ter um comportamento mais suavizado e com uma menor amplitude do sinal negativo, se comparada com as anomalias produzidas por corpos constituídos por sulfetos e óxidos metálicos.

O SP é um método passivo, ou seja, não necessita da injeção de corrente elétrica para que o campo elétrico seja gerado. O potencial natural ou espontâneo medido em milivolts (mV) é causado pela atividade eletroquímica ou eletromecânica produzida na presença de corpos metálicos com diferentes propriedades elétricas, principalmente com variações de resistividade, produzindo de maneira geral anomalias negativas. Uma outra resposta de SP é oriunda do denominado “*potencial de fluxo*”, o qual é devido ao movimento de fluidos através dos poros e descontinuidades das rochas, sendo também denominado de potencial de eletrofiltração. A passagem de um eletrólito através de uma membrana porosa produz uma diferença de potencial entre os dois lados da mesma. Considerando a porosidade do substrato como uma rede de capilares por onde percolam as águas de subsuperfície, então o comportamento do substrato pode ser visto como uma membrana. A medida deste tipo de potencial tem sido utilizada para detecção de caminhos preferenciais da água subterrânea, auxiliando no mapeamento de divisores d'água e na direção do fluxo. Em áreas com relevo acidentado onde os aquíferos mantêm uma dinâmica controlada pela gravidade em função dos taludes da topografia, existe uma resposta de potencial elétrico natural originando uma anomalia negativa coincidindo espacialmente com a área de descarga do aquífero em zonas caracterizadas por altos topográficos. A resposta originando uma anomalia positiva no contexto anterior é válida para as áreas de recarga do aquífero em zonas onde predominam a presença de baixos topográficos.

O levantamento de Potencial Natural Elétrico foi realizado na área de estudo com um espaçamento regular de aproximadamente 15 metros de abertura do dipolo de medição, contando para o setor 1 com um total de 120 pontos físicos medidos e para o setor 2 com um total de 100 pontos físicos medidos, utilizando a técnica de gradiente. Esta técnica consiste em medir sucessivamente as diferenças de potencial entre dois pontos contíguos de um perfil em polígonos fechados, tendo a grande vantagem de fornecer um controle da medição, levando em consideração o erro médio quadrático dos dados do levantamento. Após realizada a medição entre dois pontos contíguos, o arranjo é deslocado ao longo da linha, normalmente a intervalos regulares.

O algoritmo utilizado foi projetado para modelagem direta e inversa de campos de potencial espontâneo natural (SP) que permite simular os padrões geoeletricos simultaneamente para até 29 condutores prismáticos polarizados eletrostaticamente (Dmitriev, 2012). O software ZONDSP2Dp (Zond Software, 2018) destina-se à interpretação bidimensional dos dados adquiridos pelo método do campo elétrico natural. O ambiente do modelo é representado por um conjunto de corpos que simula uma seção poligonal. O algoritmo matemático é baseado no ajuste dos dados pelo método dos mínimos quadrados e permite simular em modo automático padrões de resistividades que podem conter condutores polarizados eletrostaticamente, apresentando diferentes geometrias. Os dados de resistividade aparente obtidos em campo foram a partir de duas Sondagens Elétricas Verticais (SEV) com o arranjo Schlumberger, posicionadas na porção central da área de estudo, a SEV 01 próxima ao perfil A-A' e a próxima ao perfil E-E'. Os parâmetros geoeletricos e geométricos obtidos a partir da inversão da curva de resistividade aparente serviram de subsídio para correlacionar os padrões de resistividade dos condutores polarizados nos modelos de SP obtidos para os perfis A-A', B-B', E-E', D-D' e F-F'. Para a inversão (1D) dos dados de resistividade aparente oriunda das SEVs, foi utilizado o programa *IP12Win 3.0.1a*, elaborado pela Universidade de Moscou, 2003.

Área de Estudo

A Figura 1 ilustra o mapa geológico simplificado da área de estudo compreendendo as rochas pertencentes ao enclave central, caracterizadas por Biotita (Bt) - Granodiorito de aproximadamente 601 - 599 Ma, e de Anfibólio (Amp) - Biotita (Bt) - Monzogranito, de idade aproximada de 604 Ma. Na área é destacável a intensa ação da tectônica rúptil apresentando estruturas radiais associadas à presença de falhas e fraturas, que servem de principais condutos de acesso das mineralizações. Observa-se o posicionamento dos perfis de SP, A-A', B-B', E-E', D-D' e F-F' que foram objeto da modelagem.

A Figura 2 se corresponde com uma imagem que mostra um afloramento de rocha granodiorítica pouco alterada na porção Leste da área de estudo. É composta por K-feldspato, plagioclásio, quartzo, biotita e anfibólio. Destaca-se a presença de duas direções preferenciais de fraturas com uma disposição ortogonal, isto é, na direção N 75°W e na direção N 30°E. Observa-se a presença de um fluxo de água superficial acompanhando a direção N 30°E. A Figura 3 corresponde ao mapa de localização dos perfis A-A', B-B', C-C', D-D', E-E' e F-F' e as posições das SEV 01 e SEV 02.

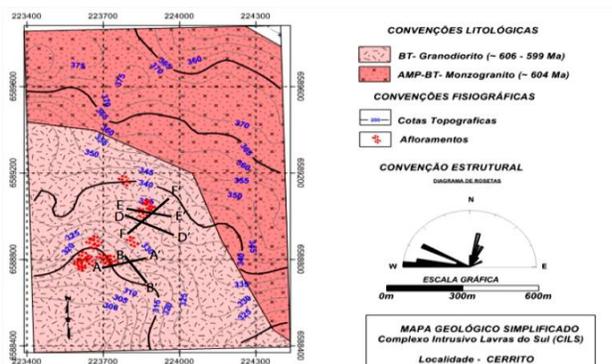


Figura 1 – Mapa geológico da Área de Estudo (modificado de Gastal et al., 2006)



Figura 2 – Foto ilustrativa de um afloramento de Granodiorito porfírico, com a linha amarela indicando a direção das fraturas.

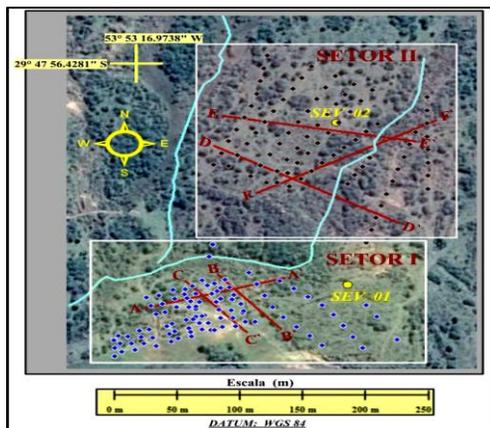


Figura 3 – Mapa esquemático mostrando o Setor I e Setor II, com a malha de pontos medidos de SP e os Perfis A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', F-F', assim como o posicionamento da SEV 01 e SEV 02.

Resultados

No mapa integrado de anomalias de Potencial Espontâneo (SP) na área de estudo (Figura 7), observa-se a malha de pontos medidos de dados SP, a SEV01 e SEV 02 e os perfis A-A', B-B', E-E', D-D' e F-F' que foram objeto de modelagem. É importante ressaltar a presença de zonas de drenagem dispostas na direção NE-SW e que cortam os perfis E-E' e D-D', e a presença de afloramentos de granodioritos na porção Leste. A área se encontra caracterizada por um relevo abrupto com as

cotas mais altas em torno de 335 metros de altitude na porção Norte.

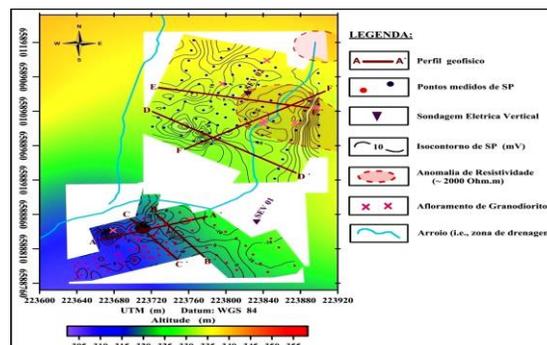


Figura 4 - Mapa esquemático integrado da Anomalia de Potencial Espontâneo (SP) no Setor I e Setor II, com a malha de pontos medidos e os Perfis A-A', B-B', D-D', E-E', F-F', o posicionamento da SEV 01 e SEV 02 e a localização de afloramentos.

É notório ressaltar na porção Norte do mapa, caracterizada por altos topográficos, a presença de dois *trends* anômalos com valores na ordem de +14 mV, com uma orientação segundo NE-SW apresentando uma disposição espacial quase paralela, e acompanhando de certa maneira a direção de fluxo de água proveniente dos riachos ou arroios, vindo das zonas de cotas mais elevadas para as zonas de cotas mais baixas.

No extremo Leste destaca-se a presença de uma anomalia com formato dipolar, com valores de SP variando de -5 mV a +15 mV, associadas à presença do acúmulo e/ou movimentação de água nas fraturas das rochas aflorantes (i.e., Bt Granodiorito (~ 601 - 599 Ma)).

As Figuras 5 e 6 mostram os gráficos integrados da Anomalia de Potencial Espontâneo (SP) conjuntamente com o relevo topográfico oriundo do ASTER-GDEM ao longo dos Perfis A-A', B-B', C-C', E-E', D-D' e F-F' presentes na área de estudo.

No perfil A-A' (WWS-EEN) observa-se dois picos da anomalia de SP que variam num intervalo de aproximadamente + 25 mV a +1 mV.

No perfil B-B' (NW-SE) destaca-se uma curva suave da anomalia de SP com uma característica dipolar com valores de aproximadamente +10 mV a -10 mV. O perfil se encontra na porção de patamar topográfico mais baixo dos dois setores.

No perfil E-E' (WWN-EES) observa-se um comportamento mais suave da anomalia de SP, variando num intervalo de +15 mV a +1 mV. O perfil se encontra posicionado em um mesmo patamar topográfico em torno de 333 metros de altitude. Na porção Leste do perfil destaca-se a presença de afloramentos de Granodiorito.

No perfil D-D' (NW-SE), destaca-se valores de SP com amplitude em torno de +15 mV, na presença de um dipolo com um sinal negativo vizinho da ordem de -5 mV.

Este comportamento poderia estar associado a presença de uma zona de fraturas com presença de água.

No perfil F-F' (SW-NE), a anomalia de SP varia suavemente no intervalo de +14 mV a +3 mV. Se caracteriza pela presença de uma variação abrupta do relevo topográfico na direção NE, na ordem de 329 a 334 metros.

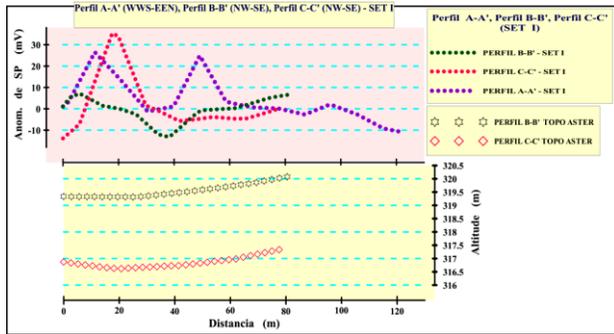


Figura 5 - Gráficos integrados da Anomalia de Potencial Espontâneo (SP) conjuntamente com o relevo topográfico oriundo do ASTER-GDEM ao longo dos Perfis A-A', B-B', C-C'.

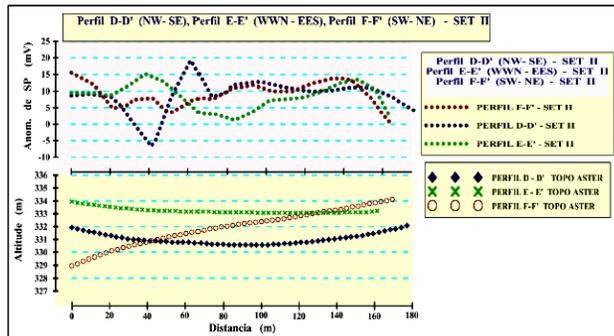


Figura 6 – Gráficos integrados da Anomalia de Potencial Espontâneo (SP) dos perfis E-E', D-D' e F-F' conjuntamente com o relevo topográfico.

As Figuras 7, 8 e 9 mostram as curvas de campo de resistividade aparente oriundas dos dados adquiridos da SEV 01 e SEV 02 e a inversão dos dados de SEV, conforme 4 camadas geoeletricas ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$).

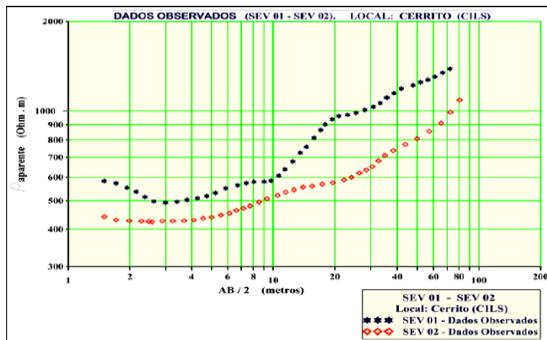


Figura 7 - Curvas de campo de resistividade aparente oriundas dos dados adquiridos da SEV 01 e da SEV 02.

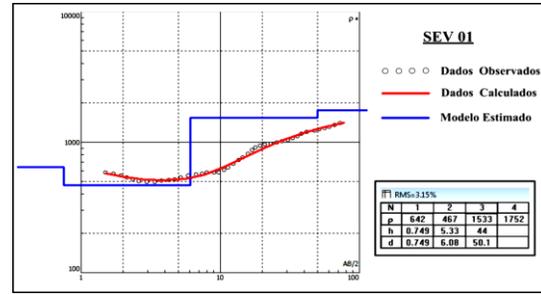


Figura 8 - Modelo de inversão para a SEV 01 conforme quatro camadas geoeletricas ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$).

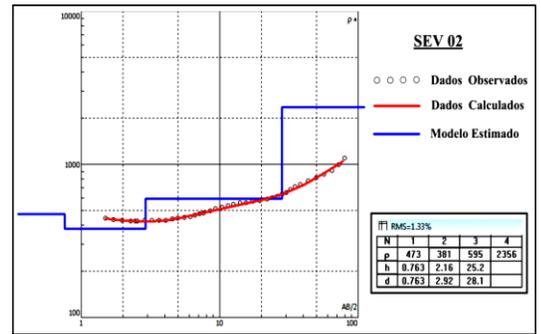


Figura 9 - Modelo de inversão para a SEV 02 conforme quatro camadas geoeletricas ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$).

As colunas geoeletricas (Figuras 10 e 11) confeccionadas a partir da interpretação do modelo, destaca a presença de 3 camadas geoeletricas com diferentes espessuras e com valores de resistividade variando em torno de 300 a 1400 Ohm.m para a SEV 01 e 300 a 600 Ohm.m para a SEV 02, sendo que as duas primeiras camadas até aproximadamente 3 metros de profundidade, caracteriza a presença de um solo residual com diferentes graus de umidade. Para a SEV 01 a partir dos 6 metros de profundidade destaca-se uma camada de granodiorito alterado de aproximadamente 2 metros de profundidade e para a SEV 02 a partir dos 3 metros de profundidade destaca-se a presença de uma espessa camada (~ 23 metros) com resistividade de 595 Ohm.m que caracteriza o topo do granodiorito com diferentes graus de alteração.

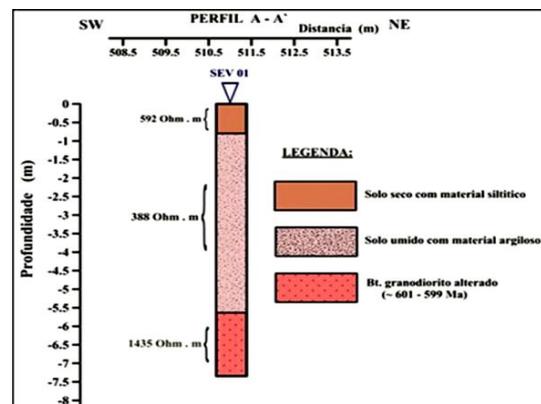


Figura 10 – Coluna geoeletrica obtida a partir da inversão dos dados da SEV 01.



Figura 11 – Coluna geoeletrica obtida a partir da inversão dos dados de SEV 02.

As Figuras 12, 13, 14, 15 e 16 ilustram os modelos geofísicos 2D obtidos a partir da interpretação dos dados de SP para os perfis A-A', B-B', E-E', D-D' e F-F' orientados segundo WWS-EEN, NW-SE, WNW-EES, NW-SE e SW-NE respectivamente, localizados na área de estudo.

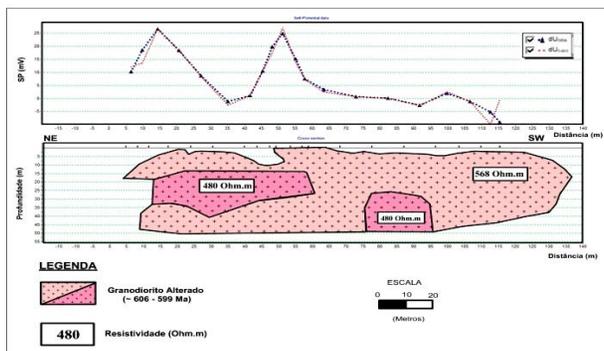


Figura 12. Modelo geofísico geológico proposto para Perfil A-A' orientado segundo WWS-EEN localizado no Setor I da área de estudo.

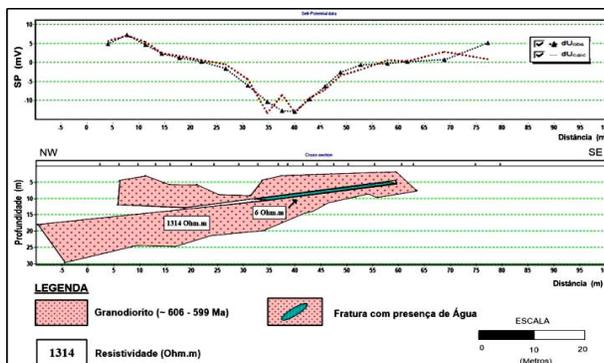


Figura 13 – Modelo geofísico geológico proposto para Perfil B-B' orientado segundo NW-SE localizado no Setor I da área de estudo.

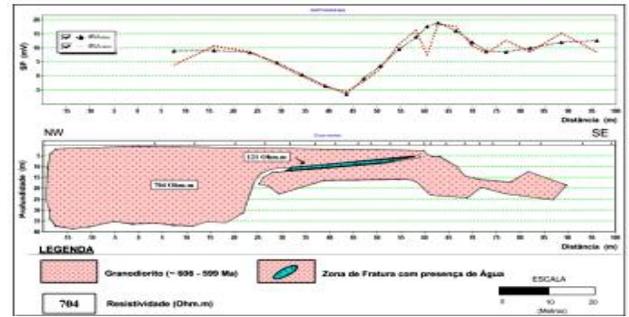


Figura 14 – Modelo geofísico geológico proposto para Perfil D-D' orientado segundo NW-SE, localizado na área de estudo.

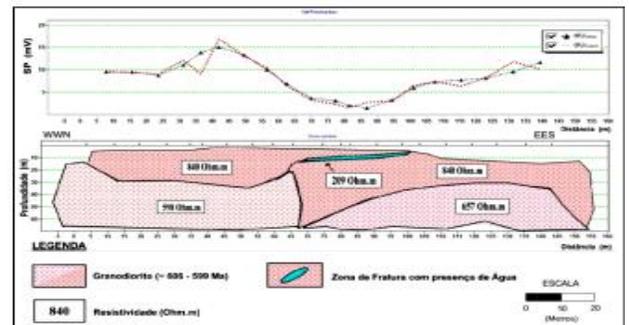


Figura 15 – Modelo geofísico geológico proposto para Perfil E-E' orientado segundo WNW-EES, localizado na área de estudo.

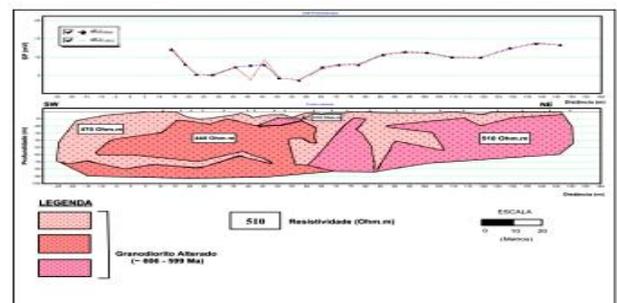


Figura 16 – Modelo geofísico geológico proposto para Perfil F-F' orientado segundo SW-NE, localizado na área de estudo.

A Figura 12, ilustra o Modelo geofísico proposto para o Perfil A-A' orientado segundo NE-SW. Conforme o modelo obtido é possível observar que as resistividades das rochas granodioríticas variam em torno de 568 Ohm.m até 480 Ohm.m. É notório destacar que neste modelo o topo do embasamento granodiorítico apresenta irregularidades no formato geométrico, o que sugere diferentes graus de alteração.

A Figura 13, mostra o Modelo geofísico proposto para Perfil B-B' orientado segundo NW-SE, obtido a partir da inversão 2D dos Dados de Potencial Espontâneo (SP). Conforme o modelo obtido se pode observar para os primeiros 15 metros de profundidade, a presença de

rochas granodioríticas muito afetadas pela presença de zonas de fraturas que apresentam um baixo ângulo de mergulho posicionadas aproximadamente dos 5 a 10 metros de profundidade, que segundo os critérios interpretativos estariam com acúmulo e movimentação de água subterrânea, muito provavelmente servindo de condutos para a infiltração e percolação das águas superficiais. A anomalia com sinal negativo de SP com valores de amplitude em torno de - 10 mV é explicada do ponto de vista interpretativo pelo contraste existente dos valores de resistividades de 1314 Ohm.m para o contexto de rochas granodioríticas encaixantes, e os valores muito baixos de resistividades de 6 Ohm.m característicos para a presença de água em zona de fraturas.

O modelo geofísico obtido para o perfil D-D' (NW – SE) destaca a presença de um embasamento alterado constituído de rocha granodiorítica com valor de resistividade de aproximadamente 704 Ohm.m. Na porção central do perfil destaca-se a presença de uma zona de fraturas caracterizada por uma resistividade de 121 Ohm.m, sugerindo a presença e movimentação de águas subterrâneas.

O modelo geofísico obtido para o perfil E-E' (WWN - EES) destaca a presença de um embasamento constituído de rochas granodioríticas com diferentes valores de resistividade que variam de 840 Ohm.m a 590 Ohm.m, o que sugere que nesta direção do perfil a rocha tenha sido afetada por zonas de fraturas e/ou falhas. Na porção Leste do modelo destaca-se a presença de uma zona de fratura com um mergulho sub-horizontal caracterizada por valores de resistividade de 209 Ohm.m, sugerindo a presença e movimentação de águas subterrâneas.

No modelo geofísico obtido para o perfil F-F' (SW-NE) é destacado a presença de um embasamento constituído de rochas granodioríticas com diferentes valores de resistividade que variam em torno de 510 até 440 Ohm.m. Segundo o trabalho de Medeiros *et. al.*, 1999, no estudo de Potencial Elétrico Espontâneo, ao longo de seções transversais, em aquíferos fissurais em rochas cristalinas do Estado da Bahia, os perfis de SP apresentam ordens de grandeza relacionadas à amplitude das anomalias em torno de -15 a -50 mV e mostram, portanto, um padrão semelhante aos apresentados na presente pesquisa, sugerindo que as anomalias de SP dos perfis B-B', E-E' e D-D' poderiam ser originadas pelo fluxo de água subterrânea.

Conclusões

A modelagem de dados de SP oferece uma ferramenta muito eficiente para o esclarecimento e/ou entendimento

de questões relacionadas com a geometria e os processos vinculados com zonas de fraturas, onde exista acúmulo e movimentação de água subterrânea, e comprovadamente possam existir indícios de mineralização metálica associadas a processos hidrotermais.

Os resultados obtidos se mostram consistentes e alentadores do ponto de vista de interpretação geológico - geofísico, integrando os dados dos levantamentos em escala de detalhe, provindo de medições de Potencial Espontâneo e Sondagem Elétrica Vertical, visando à identificação e a caracterização de zonas com alteração hidrotermal associadas com zonas de falhas e/ou de fraturas, com perspectivas de hospedarem presença de mineralização metálica em sulfetos disseminados, e por consequência mineralização aurífera. Conforme os modelos geofísicos propostos para os perfis B-B', E-E' e D-D' obtidos a partir da inversão 2D dos dados de Potencial Espontâneo (SP), pode-se concluir que anomalias com sinal negativo de baixa amplitude em torno de -10 mV a -5 mV, poderiam estar associadas a presença e/ou acúmulo de água em zonas de fraturas, quase aflorantes, que podem estender-se desde os primeiros metros em superfície, apresentando uma continuidade em profundidade.

Referências

ASTER GLOBAL DEM Validation Summary Report. Disponível em: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.JTPmede>

DMITRIEV, A. N. Forward and inverse self-potential modeling: a new approach. *Russian Geology and Geophysics*. 53: 611–622, 2012.

GASTAL, M.C.P., Lafon, J.M., Ferreira, F.J.F., Magro, F.U.S., Remus, M.V.D. & Sommer, C.A. Reinterpretação do Complexo Intrusivo Lavras do Sul – RS, de acordo com os sistemas vulcano-plutônicos de subsidência. Parte I: Geologia, geofísica e geocronologia (207Pb/206Pb e206Pb/238U). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36: 109-124, 2006.

MEDEIROS, W.E., LIMA, O. A. L. Origem do Potencial Elétrico Espontâneo em rochas cristalinas fraturadas e sua utilização na locação de poços. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 17(2,3), 1999.

ORELLANA, E. *Prospeccion geoelctrica en corriente continua*. Madrid: Paraninfo, 523 p., 1972.

ROSALES, M. J. T., LOPES, H. S., LEANDRO, C. G. Inversão de dados de Potencial Espontâneo (SP) e sua aplicação ao estudo de zonas hidrotermais associadas à mineralização aurífera, no Complexo Granítico de Lavras do Sul (RS) - Brasil.. In: VIII Congreso Uruguayo de Geología, I Simposio de Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata., 2016, Montevideo, Uruguay.. In: VIII Congreso Uruguayo de Geología, I Simposio de Recursos Hídricos de la Cuenca del Plata... Montevideo, Uruguay.: EASY PLANNERS, 2016. Montevideo, Uruguay.