

PROPRIEDADES GEOFÍSICAS DE LINEAMENTOS ASSOCIADOS ÀS VAZÕES DE POÇOS EM AQUÍFEROS CRISTALINOS NA REGIÃO DE JUÁ, CEARÁ, BRASIL

*Oderson Antônio de Souza Filho*¹, *Adalene Moreira Silva*², *Mônica Mazzini Perrotta*³, *Anne McCaffery*³

RESUMO --- As feições lineares extraídas de fotografias aéreas e de dados aerogeofísicos magnéticos e eletromagnéticos foram comparados com vazões de poços para água, perfurados em gnaisses e granitos diversos. Os modelos previsionais foram gerados usando o método de Razões de Probabilidades que manipula imagens *raster* georreferenciadas. Baseado na premissa de que o principal fator que controla a ocorrência de água nesse ambiente são as descontinuidades da rocha, essas podem ter assinaturas geofísicas distintas da encaixante não fraturada. Os resultados permitiram definir valores de magnetização e de condutividade elétrica característicos de seções de rochas contidas em lineamentos, onde poços de alta e baixa vazão estão localizados. Com o método, também é possível mapear outras regiões permissivas para água subterrânea que contenham as mesmas direções de lineamentos e propriedades geofísicas.

ABSTRACT --- Linear features extracted from aerial photographs and, airborne geophysical data were compared with yield of water wells drilled in crystalline rocks. Predictive models were generated using the probability ratio method, a raster-based GIS technique. The idea was to locate regions permissive for ground-water based on the premise that ground-water occurrence in this environment is fractured-controlled and, which may have distinct geophysical signature from host-rock. Results distinguish preferential values of magnetic, electromagnetic content within lineaments, rocks and soil that characterize sites where low- and high- yield wells are located, and hence to map other localities where similar conditions are expected to occur.

Palavras-chave: aerogeofísica, geoprocessamento, hidrogeologia

-
- 1) Geólogo do Serviço Geológico do Brasil-CPRM, Residência de Fortaleza. Doutorado do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas, Rua João Pandiá Calógeras, 51 CEP: 13083-870, Campinas/SP. E-mail: oderson@ige.unicamp.br
 - 2) Professora e Sub-Chefa do Depto. de Geoquímica e Recursos Naturais/IG, Universidade de Brasília, Brasília/DF. E-mail: adalene@unb.br
 - 3) Geóloga, Chefa da Divisão de Sensoriamento Remoto do Serviço Geológico do Brasil-CPRM, SUREG/SP. E-mail: perrotta@sp.cprm.gov.br
 - 4) Geóloga do Crustal Image Characterization Team/CICT, U.S. Geological Survey/USGS, Lakewood, Colorado. E-mail: anne@usgs.gov

1 – INTRODUÇÃO

O método de razão de probabilidades é uma técnica de modelagem criada para aplicações geoambientais (Lee et al., 2001). Outras aplicações de sucesso deram-se na pesquisa de recursos minerais (Silva, 1999) e na análise estrutural (McDougal et al., in press). Souza Filho et al. (2007) usou o método na identificação de áreas potenciais para água subterrânea, comparando a vazão de poços e as propriedades geofísicas, radiométricas e espectrais de rochas cristalinas e, o trabalho ora apresentado é continuação dessa pesquisa.

A área de estudo corresponde a 144 km² do Distrito de Juá, no município de Irauçuba, Estado do Ceará. A região possui clima semi-árido e a geologia, com rochas Meso-Neoproterózoicas, compreende migmatitos e biotita-gnaisses, com lentes de mármore, gnaisses cálcio-silicatados, anfibolitos e raros quartzitos. Os granitos podem ser intrusivos e pós-tectônicos ou, gnaissificados e concordantes com a estruturação local, originados por anatexia. (Figura 1).

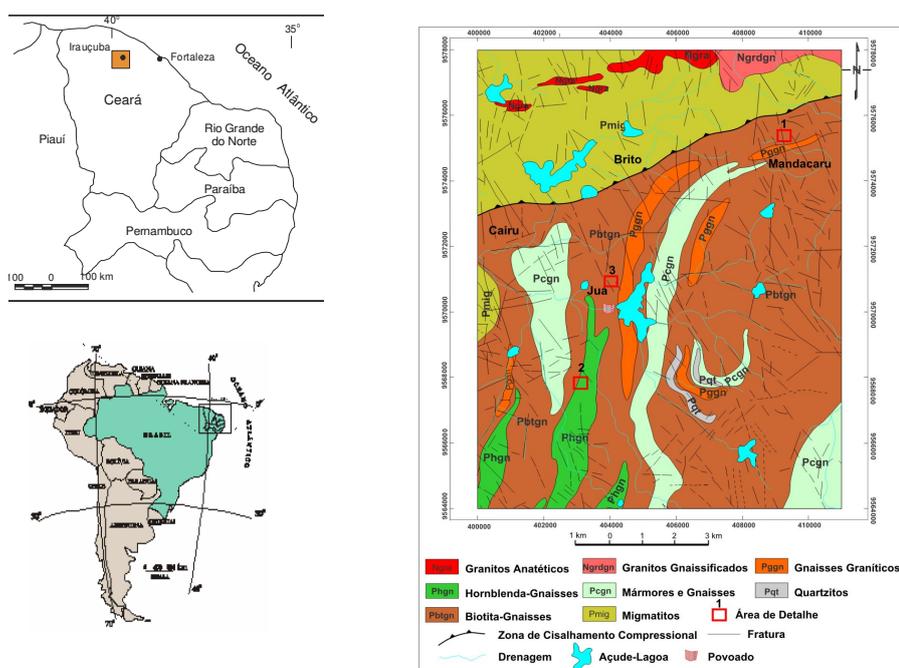


Figura 1. Localização da área do Juá e, mapa geológico (modificado de Souza Filho, 2002). Traços pretos são lineamentos foto-interpretados.

2 – MATERIAIS

Dados geológicos provêm de Souza Filho (1998) e Souza Filho et al. (2003). Informações hidrogeológicas foram retiradas de Veríssimo and Feitosa (2002) e provenientes de coleta própria em 2005.

Os dados geofísicos do campo magnético e eletromagnético induzido foram obtidos com levantamento por helicóptero, de alta resolução (Lasa, 2001), para a cooperação técnica PROASNE

(PROASNE, 2007). Como características técnicas do levantamento, tem-se: linhas de produção voadas na direção leste-oeste, com 100 m de espaçamento; linhas de controle direcionadas norte-sul e, espaçadas de 500 m; taxa de amostragem no terreno a cada 4 m; campo magnético medido com magnetômetro Geometrics G-8222, de vapor de Césio de 0,001 nT de sensibilidade; medição do campo eletromagnético induzido através de sistema Aerodat-DSP-99 de pares de bobinas em arranjo vertical (coaxial) e horizontal (coplanar) operando nas frequências nominais de 900 Hz, 4500 Hz e, 33.000 Hz e mesma taxa de amostragem do magnetômetro.

3 – MÉTODOS

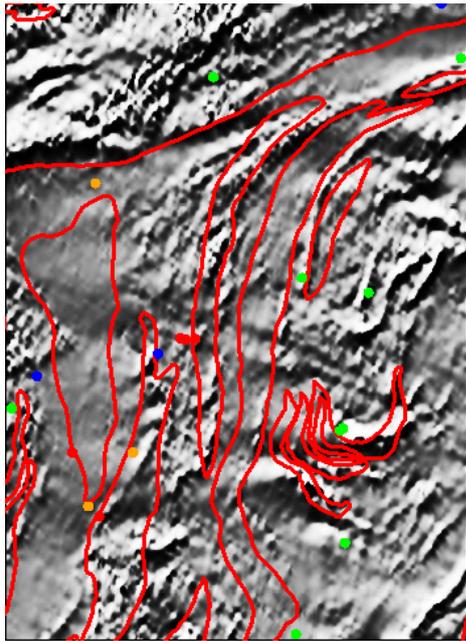
Os dados magnéticos sofreram rotinas usuais de correção para valores espúrios e nivelamento tais como: a subtração do Campo Geomagnético Definitivo de Referência Internacional-DGRF; redução ao pólo magnético e; micronivelamento, resultando num *grid* do campo magnético anômalo local, com células de 25 m. Sobre o grid resultante, foi realizado o processamento propriamente, utilizando o programa Oásis Montaj v. 6.3 e rotinas de Phillips (1997) e Phillips et al. (2003), com o objetivo de enfatizar as anomalias rasas localizadas no intervalo até 60 m de profundidade da superfície do terreno (Figura 2a). Os lineamentos magnéticos (anomalia de gradiente positivo) e não magnéticos (anomalia de gradiente negativo) foram interpretados e digitalizadas como arquivos diferentes (Figura 2b).

Os dados eletromagnéticos-EM escolhidos para esse trabalho referem-se às frequências de 900 Hz e 4500 Hz (Figura 3a), que correspondem às profundidades maiores de investigação e são menos influenciados por ruídos superficiais e antrópicos do que os da frequência 33.000 Hz. As profundidades de investigação são inversamente proporcionais à frequência utilizada no sistema EM. A profundidades de investigação teórica, máxima, com o arranjo utilizado no levantamento é de 40 m, caso o terreno não seja muito condutivo em superfície. Informações sobre o sistema EM aeroportado e teorias do método eletromagnético induzido são encontradas em Lasa (2001), Silva (1999) e, para mais detalhes sugerimos Telford et al. (1976).

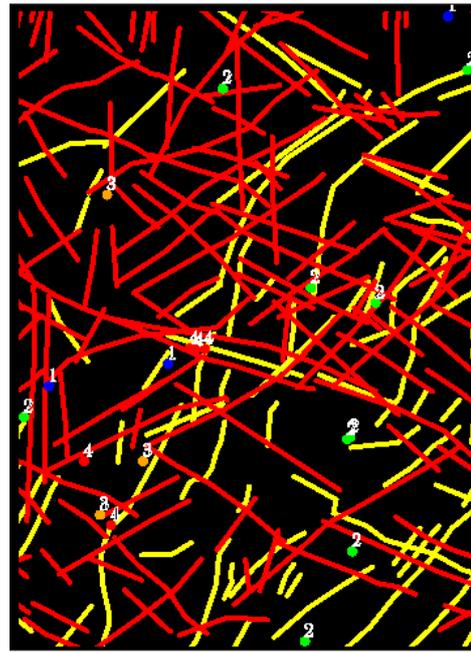
Os dados condutividade elétrica aparente foram corrigidos para valores espúrios e micronivelados. Em seguida, interpolados e apresentados como *grids* de trabalho com células de 25 m (programa Oásis Montaj, v. 6.3). A partir dos grid para cada frequência, das combinações falsacor e dos mapas ternários, houve a interpretação e digitalização dos lineamentos condutivos (anomalia de gradiente positivo) e negativos (anomalia de gradiente negativo). (Figura 3b).

Também se extraiu lineamentos estruturais não coincidentes com a foliação regional a partir de foto-aéreas, escala 1: 75.000. (Figura 4).

-12.16.0-3.5-2.1-1.2-0.5.0.0.5.0.9.1.3.1.8.2.5.3.5.5.0.7.7.14.6

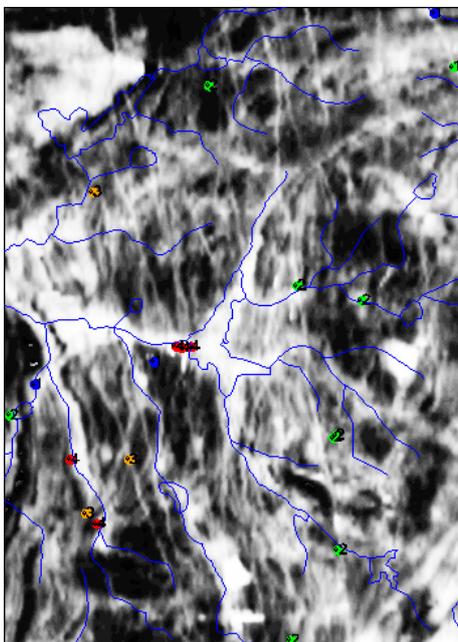


2a)

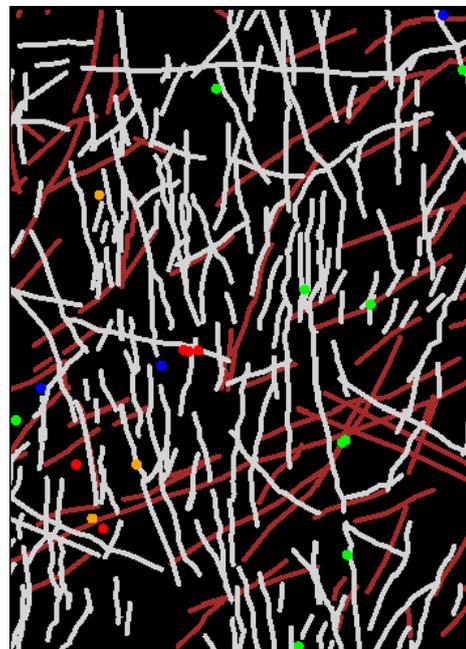
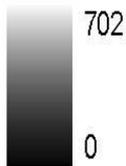


2b)

Figura 2. a) Dado magnético de Juá, filtrado para o intervalo de 60 m de profundidade da superfície (nT). Falsa iluminação com 45° de inclinação e, declinação para azimuth 315. Litologia em vermelho, classes de poços em pontos coloridos (Tabela 1); b) Zonas de proximidades de lineamentos magnéticos dos dados filtrados para 60 m de profundidade. Anomalias negativas em vermelho, anomalias positivas em amarelo.



3a)



3b)

Figura 3. a) Mapa de condutividade elétrica aparente (mS/m) da frequência de 4500 Hz para a área de Juá. Classes de vazões de poços em pontos coloridos (# Tabela 1), drenagem em azul; b) Imagem *raster* da zona de proximidade de 100 m para lineamentos eletromagnéticos da área de Juá. Anomalias condutivas em cinza, não condutivas em marrom.

Pelo conhecimento geológico da área, as seguintes premissas foram adotadas na interpretação de lineamentos:

- a) Lineamentos magnéticos referem-se a contatos entre unidades geomagnéticas e, em zonas de cisalhamento; lineamentos não-magnéticos são interpretados como descontinuidades tectônicas, em geral rúpteis;
- b) Lineamentos condutivos podem ser fraturas preenchidas por água, solo úmido rico em sais precipitados, argila ou bandas com grafite. Lineamentos não condutivos podem representar descontinuidades (sem preenchimento) na rocha ou veios de quartzo;
- c) Lineamentos estruturais podem se relacionar a qualquer um dos lineamentos geofísicos e, ao mesmo tempo estarem relacionados a importantes estruturas de condução e armazenamento de água subterrânea;
- d) As feições lineares de importância hidrogeológica poderiam ser identificadas pela associação espacial entre propriedades geofísicas dos lineamentos e poços de alta vazão.

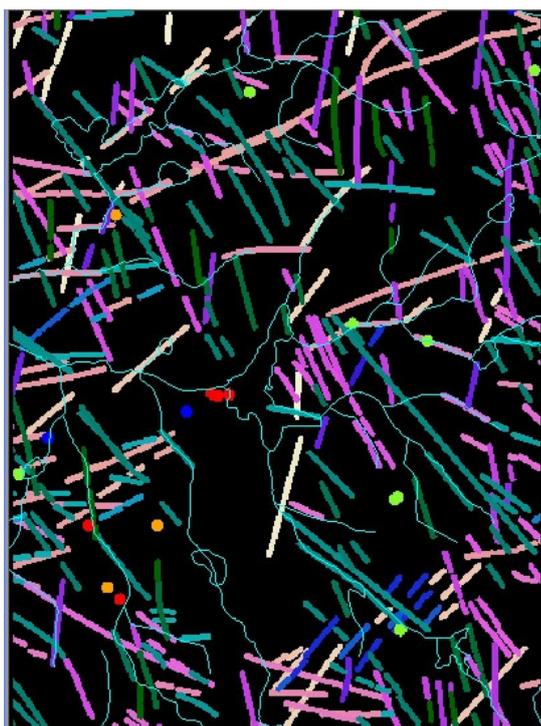


Figura 4. Zona de proximidade e 100 m para lineamentos extraídos de fotografias-aéreas. Classes de vazões de poços em pontos coloridos (# Tabela 1), drenagem em azul.

As vazões de 20 poços cadastrados na área (profundidades de até 80 m) foram agrupadas em quatro classes (Tabela 1) de acordo com intervalos práticos de instalação de equipamento de bombeio: classe 1 - poços não produtivos ou de baixa produção, uso de bomba manual ou de

catavento; classe 2 - poços de produtividade baixa a média, aos quais é recomendado uso de catavento ou bombas injetoras de baixa potência; classe 3 e classe 4 - poços de produtividade alta a excepcional, recomendada a operação com bombas submersas ou injetoras. O mapa de localização de poços (com o atributo classe de vazão) foi transformado em imagem *raster*.

Tabela 1 – Classes de vazões para poços para água no distrito de Juá.

Classe e intervalo de Vazões-Q (m ³ /h)	No. de poços em cada classe	No. de células/pixels em cada classe
Classe 1 (Q < 0.3)	3	154
Classe 2 (0.3 < Q < 1)	9	426
Classe 3 (1 < Q < 2)	3	149
Classe 4 (Q > 2)	5	232

Zonas de proximidade de 100 m foram calculadas tanto para os lineamentos (sendo o azimute como atributo de referência), como para os poços (classes de vazão sendo o atributo de referência) e, transformados em imagens *raster* com células de 25 m. (Figuras 2b, 3b e 4).

A metodologia de Lee et al. (2001) foi aplicada às imagens *raster* dos lineamentos magnéticos, eletromagnéticos e estruturais para contabilizar quão características (ou não) essas feições podem ser das classes de vazões. A abordagem descreve a semelhança estatística de uma classe de evidencia ter uma associação espacial com uma área-protótipo (Equação 1). Para esse estudo, as classes evidenciais eram as imagens de lineamentos e, a área-protótipo a imagem de classes de poços. Souza Filho et al. (in press) aplicou esse método para encontrar associações entre litologias e diversos dados geofísicos para a mesma área de estudo. Mais detalhes sobre o método podem ser encontrados em McCafferty et al. (1999) e Silva (1999).

$$PR = \frac{(\text{Área de Sobreposição} / \text{Área da Classe de Lineamento Testada})}{(\text{Área Protótipo} / \text{Área de Estudo})}$$

Probabilidade Condicional

$$\Rightarrow PR = \frac{\text{Probabilidade Condicional}}{\text{Probabilidade a Priori}}$$

Equação 1. Definição do Método de Razão de Probabilidades (modificado de Lee et al., 2001).

4 – RESULTADOS

Os lineamentos magnéticos representativos de gradiente negativo (anomalias não-magnéticas) e muito provavelmente relacionados a tectônica rúptil têm direções preferenciais 290-320 Az e, 50-70 Az. Feições lineares relacionadas a gradientes positivos (prováveis contatos geomagnéticos) possuem direções principais para 10 a 50 Az, (as mesmas de foliações e contatos litológicos) e, para 300 Az.

As anomalias eletromagnéticas lineares (prováveis fraturas com água ou preenchidas por solo/argila) mais frequentes estão orientadas entre 350 Az e 020 Az e, em torno de 040 Az. Os lineamentos não-condutivos (anomalia negativa) predominam no setor nordeste-sudoeste e menos para norte-sul.

Lineamentos estruturais (de foto-aéreas) têm orientação principal de 311 Az a 330 Az e para 65 Az.

Nas figuras 5, 6, e 7 estão apresentadas as razões de probabilidades entre classes de vazões e os diversos lineamentos. A classe 4 está positivamente associada com: fraturas N-S; Anomalias magnéticas positivas e condutivas para norte e nor-nordeste; anomalias magnéticas (positivas e negativas/ fraturas) e condutivas orientadas para leste e sudoeste.

Classes 1 e 2 (mais baixas vazões) têm associações positivas similares. Para todos os dados de lineamentos analisados, as direções nordeste e leste são exclusivamente relacionadas a essas classes. A classe de vazão 3 possui associação não definida com lineamentos não-magnéticos e, associação positiva com lineamentos estruturais NNE-SSW, lineamentos não-condutivos ENE-WSW e lineamentos condutivos N-S.

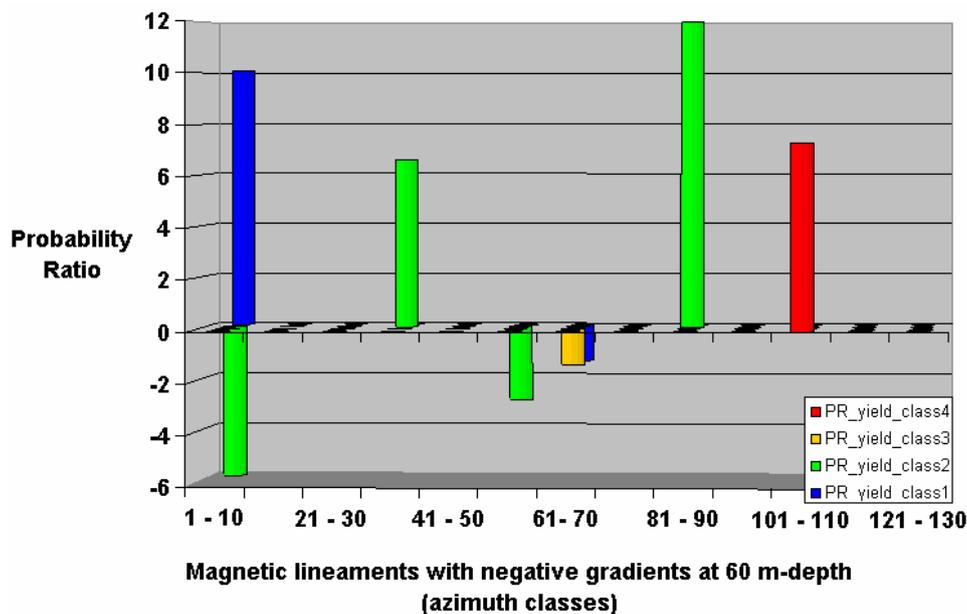
Associações negativas definem onde é menos provável uma classe de vazão ocorrer dentro de um domínio geológico/geofísico. As associações negativas mais marcantes foram: a classe de vazão 4 com lineamentos condutivos N-S e a classe 2 com lineamentos não-magnéticos N-S.

5 – CONCLUSÕES

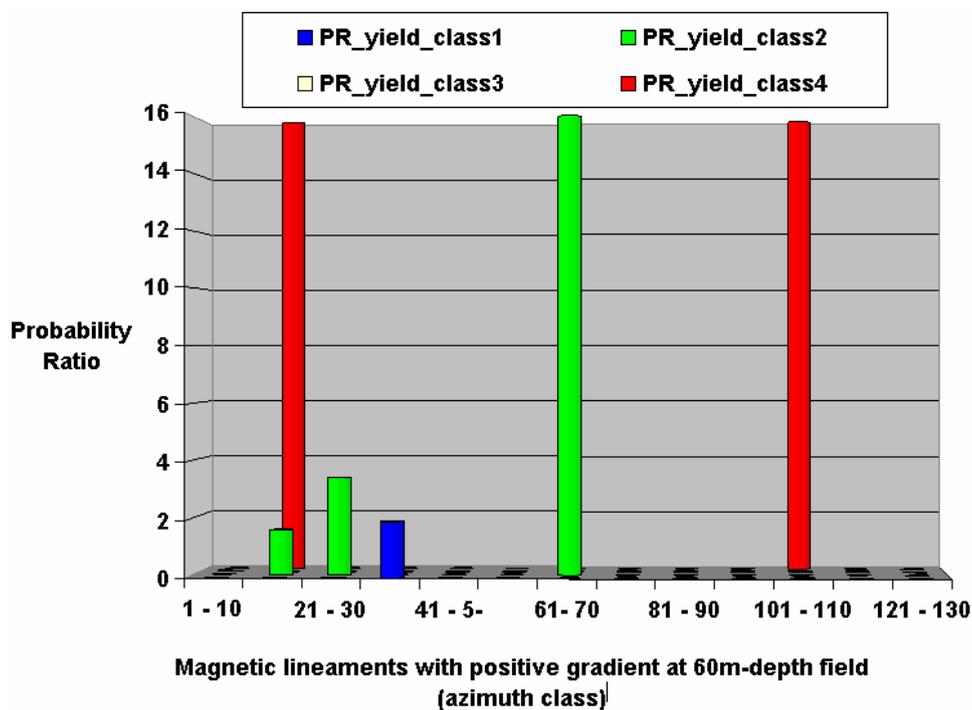
Embora os resultados não sejam suficientes para a locação de poços de grande vazão, os estudos aqui apresentados e de trabalhos prévios (Souza Filho et al., 2007 e Souza Filho, in press) mostram que é possível discriminar padrões geofísicos que estão indiretamente relacionados à ocorrência de água subterrânea através das propriedades da rocha atravessada pelo poço e assim, mapear outras regiões favoráveis.

Os poços mais produtivos estão associados a porções não-magnéticas da rocha, lineamentos não-magnéticos ESE-WNW e, às fraturas e lineamentos condutivos de direção N-S. Classes de mais baixa vazão possuem similaridade com a classe 4 apenas nas direções de lineamentos condutivos,

enquanto que a direção nordeste é a principal para feições lineares estruturais, magnéticas e não-condutivas.

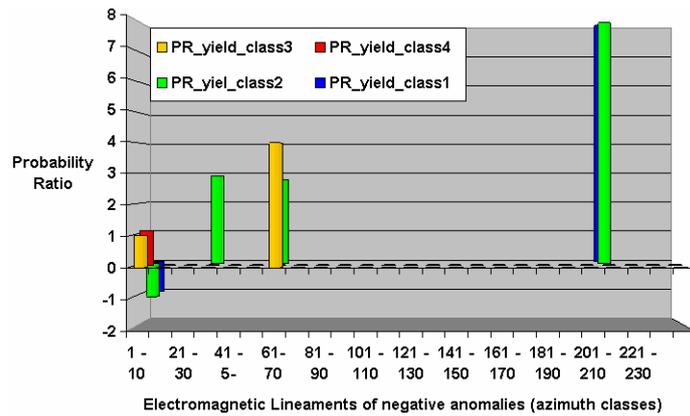


a) Lineamentos não-magnéticos (anomalias negativas).

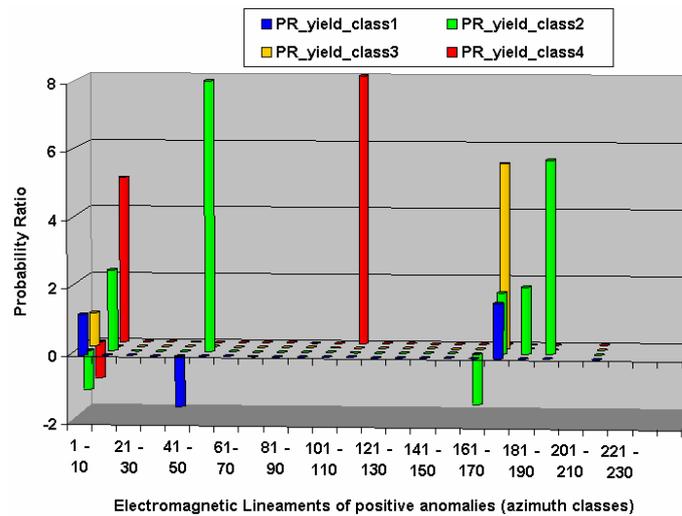


b) Lineamentos magnéticos (anomalias positivas).

Figura 5. Razão de Probabilidades calculadas entre lineamentos magnéticos e classes de vazões de poços (# Tabela 1).



a) Lineamentos não-condutivos (anomalias negativas).



b) Lineamentos condutivos (anomalias positivas)

Figure 6. Razões de Probabilidades calculadas entre lineamentos eletromagnéticos e classes de vazões de poços (Tabela 1).

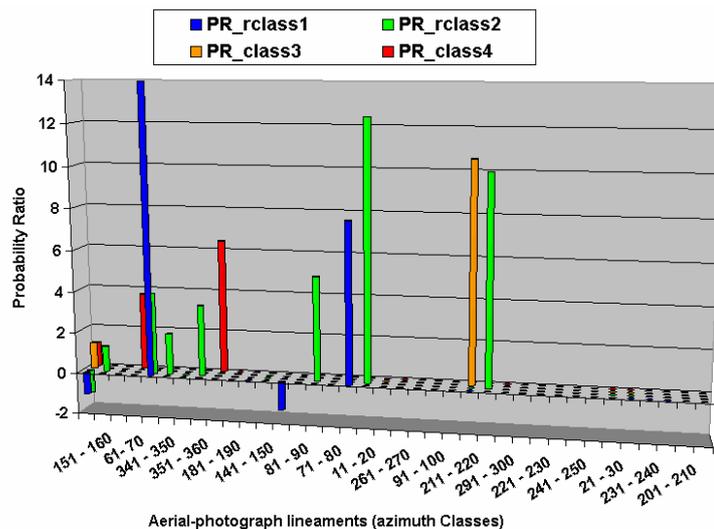


Figure 7. Razões de Probabilidades calculadas entre lineamentos estruturais e classes de vazões de poços (# Tabela 1).

BIBLIOGRAFIA

- LEE, G. K; MCCAFFERTY, A. E.; ALMINAS, H. V.; BANKEY, V.; FRISHMAN, D.; KNEPPER, D. H. JR.; KULIK, D. M.; MARSH, S. P.; PHILLIPS, J. D.; PITKIN, J. A.; SMITH, S. M.; STOESER, D. B. TYSDAL, R. G.; VAN GOSEN, B. S. (2001), “*Montana geoenvironmental explorer*”: U.S. Geological Survey Digital Data Release DDS-65, Denver, 2001. Original volume from 1999, USGS Digital Data Series-XX.
- LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S/A. (2001), “*Projeto Aerogeofísico Água Subterrânea no Nordeste do Brasil, Bloco Juá (CE). Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e eletromagnetométricos e seleção das anomalias eletromagnéticas. Texto técnico*”. Cooperação Canadá-Brasil / PROASNE. Brasília.
- MCCAFFERTY, A.E., SMITH, B.D., SOLE, T.C., KARL, S., and TAYLOR, C., (in press), “*Predictive geophysical models for select geologic units and mineralized environments, Kuprenof and Zarembo Islands, southeast Alaska*”: U.S. Geological Survey Professional Paper Chapter, 47p.
- MCDUGAL, R.; MCCAFFERTY, A. E.; SMITH, B. D.; YAGER, D. B., (In press), “*Topographic, geophysical, and mineralogical characterization of geologic structures using a statistical modeling approach*”. In: Integrated investigations of environmental effects of historical mining in the Animas river watershed, San Juan County, Colorado. Ed. by Church, S. E. and Finger, S. E. Denver, 44 p. and il. (U.S. Geological Survey Professional Paper 1651-E13).
- PHILLIPS, J.D., (1997), “*Potential-field geophysical software for the PC, version 2.2*”: U.S. Geological Survey Open-File Report 97-725, 34 p.
- PHILLIPS, J.D., DUVAL, J.S., SALTUS, R.W., (2003), “*Geosoft eXecutables (GXs) developed by the U.S. Geological Survey, version 1.0, with a viewgraph tutorial on GX development*”: U.S. Geological Survey Open-File Report 03-101, 22 p. Available in <http://pubs.usgs.gov/products/books/openfile/2003.html>.
- PROASNE. (2007), “*Northeastern Brazil Groundwater Project*”, <http://proasne.net>, available on March 2007.
- McCAFFERTY, A.E.; SMITH, B.D.; SOLE, T.C.; KARL, S.; TAYLOR, C.D. 1999. Predictive geophysical models for select geologic units and mineralized environments, Kuprenof and Zarembo Islands, southeast Alaska: U.S.G.S. Open-File Report 99-x, digital web release.
- SILVA A. M., (1999), “*Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica estatística para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greensstone Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero*”. 195 p. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília.
- SOUZA FILHO, O. A. de, (1998), “*Geologia e Mapa de Previsão de Ocorrência de Água Subterrânea. Folha SA.24-Y-D-V Irauçuba, Ceará*”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil. 99 p. il. e mapas.
- SOUZA FILHO, O. A. de; RIBEIRO, J. A.; VERÍSSIMO, L. S.; OLIVEIRA, R. G. de; GOMES, F. E. M.; BRANDÃO, R. de L.; Frizzo, S. J.; OLIVEIRA, J. F. de, (2003), “*Projeto Otimização de Metodologias para Prospecção de Águas Subterrâneas em Rochas Cristalinas. Relatório Integrado De Atividades 1999 – 2002 - Bases para avaliação do projeto*”. CPRM/REFO. Fortaleza. 160 p. il. Anexos.
- SOUZA FILHO, O. A. de; MCCAFFERTY, A. E.; SILVA, A. M.; PERROTTA, M. M., (2007), “*Groundwater Potential: A Predictive Model from Airborne Geophysical, Radiometric and Remote Sensing Data, Ceará, Brazil*”. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007, p. 3593-3595. CD-ROM. ISBN 978-85-17-00031-7.

SOUZA FILHO, O. A. de; SILVA, A. M.; MCCAFFERTY, A. E.; PERROTTA, M. M.; DESZCZPAN, M.; FITTERMAN, D., (In press), “*Geophysical properties associated to Juá District geology, Ceará, Brazil*”. Submetido ao 10^o Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, SBGf, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

TELFORD, W.M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E.; KEYS, D. A., (1976), “*Applied Geophysics*”. Ed. Cambridge University Press, New York, US. p. 442-456 e 551-612.

VERÍSSIMO, L. S.; FEITOSA, F. A. C., (2002), “*As Águas Subterrâneas no Nordeste do Brasil. Região de Irauçuba - Estado do Ceará, Brasil*”. In: XXXII Congresso da Associação Internacional de Hidrogeologia e VI Congresso da Associação Latino-Americana de Hidrologia Subterrânea. Mar Del Plata, Argentina. CD-Rom, p. 889-896.