

Artigos

O aquífero fissural no semiárido: análise de modelos com base em dados geológico-estruturais e métodos geofísicos aeroportados e terrestre

The hard rock aquifer in semiarid: analysis of models based on geological-structural data and airborne and terrestrial geophysical methods

Carlos César Nascimento da Silva¹; Walter Eugênio de Medeiros¹; Emanuel Ferraz Jardim de Sá¹; Maria da Guia Lima²

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal-RN, Brasil

² Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM, Natal, RN

✉ cesar.nascimento@ufrn.br, walter.medeiros@ufrn.br, emanuel.sa@ufrn.br, maria.lima@cprm.gov.br

Palavras-chave:

Água subterrânea;
Meio fissural;
Geologia estrutural;
Geofísicas aeroportada e terrestre;
Semiárido.

Keywords

Groundwater;
Hard rock aquifer;
Structural geology;
Airborne and terrestrial geophysics;
Semiarid.

Revisão por pares.
Recebido em: 22/11/2022.
Aprovado em: 22/03/2023.

Resumo

Em grande área do NE do Brasil, em que se superpõem os efeitos do clima semiárido e terrenos cristalinos, aquíferos fissurais são as únicas fontes de água, principalmente nos períodos de seca prolongada. A locação de poços tradicional, baseada nas análises geológico-estrutural, geomorfológica e de produtos de sensores remotos envolve alto risco exploratório, resultando em cerca de 30 a 40 % de insucesso. Isso decorre da dificuldade de avaliação sobre quais são as discontinuidades dominantes (fratura ou foliação), bem como quais apresentam potencialidades hidrogeológicas mais elevadas. Nesta pesquisa foram integrados dados de levantamentos geofísicos aeroportados (eletromagnético e magnético) e terrestre (geoelétrico), além da análise estrutural com viés neotectônico. Com fins ao aprimoramento no trabalho de locação de poços, os resultados obtidos demonstram que os modelos riacho-fenda e calha elúvio-aluvionar comumente coexistem, permitindo esboçar as suas distribuições espaciais. Além disso, foi possível identificar aspectos geológicos e geofísicos importantes para discriminar em campo qual modelo ocorre de forma efetiva.

Abstract

In a large area of NE Brazil, where the effects of the semi-arid climate and crystalline terrain overlap, hard rock aquifers are the only sources of water, especially in periods of prolonged drought. The traditional location of wells, based on geological-structural, geomorphological and remote sensor product analyses, involves high exploratory risk, resulting in about 30 to 40% of failure. This stems from the difficulty of assessing which are the dominant discontinuities (fracture or foliation), as well as which have higher hydrogeological potential. In this research, data from airborne (electromagnetic and magnetic) and terrestrial (geoelectric) geophysical surveys were integrated, in addition to structural analysis with a neotectonic bias. With the aim of improving the work of well locating, the results obtained demonstrate that the riacho-fenda and eluvial-alluvial trough models commonly coexist, allowing to outline their spatial distributions. In addition, it was possible to identify important geological and geophysical aspects to discriminate in the field which model effectively occurs.

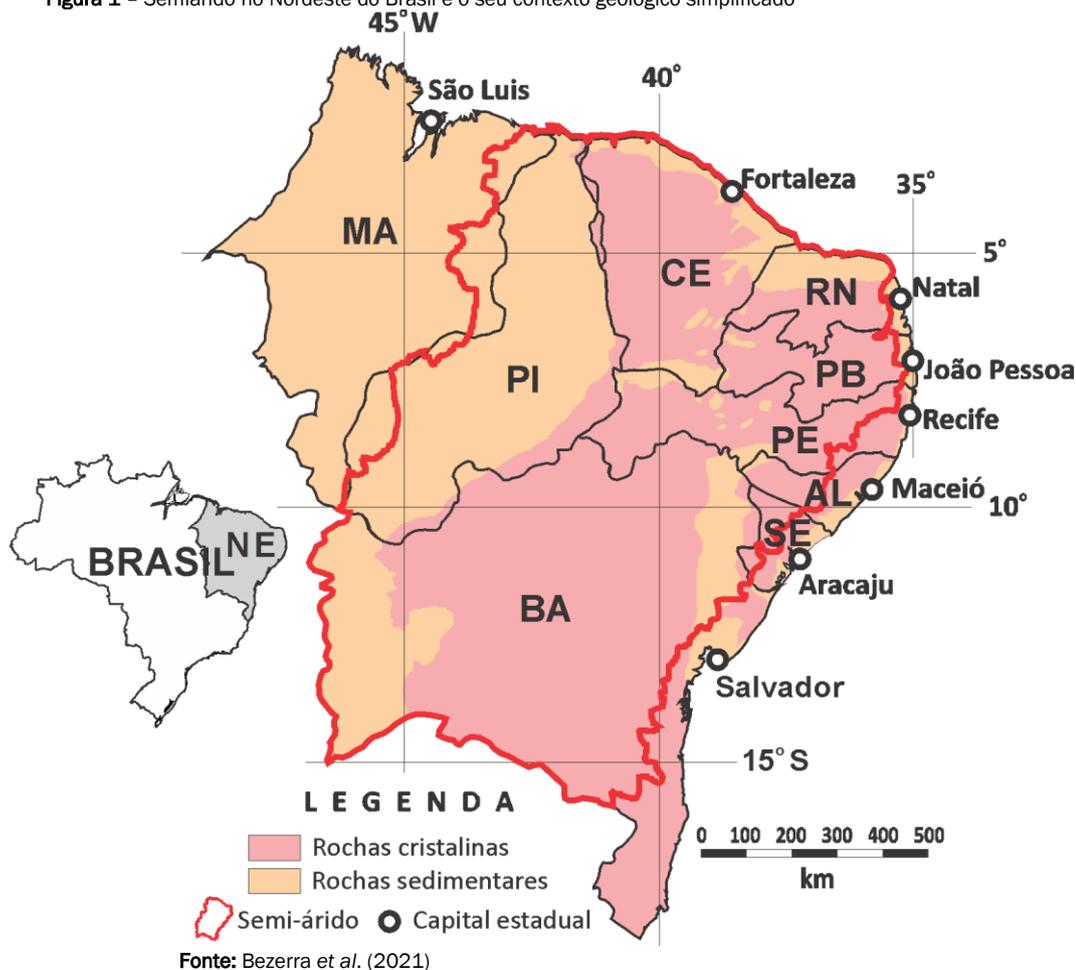
DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v37i2.30197>

1. INTRODUÇÃO

Rocha cristalina designa genericamente rochas ígneas plutônicas e metamórficas, cujas porosidade primária (até 1 %) e condutividade hidráulica (aproximadamente 10^{-6} m/s) são consideradas desprezíveis, compondo cerca de 20 % da superfície terrestre (da ordem de 30 milhões de km²) (SINGHAL; GUPTA, 2008). Especificamente, cerca de 70 % da região Nordeste (NE) do Brasil (aproximadamente 1,56 milhões de Km²) é composta por rochas cristalinas conforme Figura 1 (BEZERRA *et al.*, 2021). O armazenamento e o fluxo da água subterrânea no cristalino ocorrem ao longo das discontinuidades, envolvendo falhas e zonas de cisalhamento, juntas, foliação e outras anisotropias, bem como nas zonas intemperizadas, quando existentes, compondo o meio aquífero fissural.

Do ponto de vista climático, grande área no NE brasileiro, 981.000 km² (Figura 1), representa o semiárido (BEZERRA *et al.*, 2021), caracterizado por curtos períodos de chuva anuais (3 a 4 meses), longa estiagem e intensa taxa de insolação, colaborando para a constante evaporação da água nos reservatórios superficiais. O clima semiárido não afeta diretamente o meio aquífero fissural, mas interfere em sua recarga sazonal, tornando, a exemplo de outras regiões no planeta (TAYLOR *et al.*, 2013), a água subterrânea estratégica à subsistência e ao desenvolvimento econômico da população, normalmente representando o único meio de suprimento de água

Figura 1 – Semiárido no Nordeste do Brasil e o seu contexto geológico simplificado



Em campo, identificar os locais com maior potencial para a perfuração de poços envolve análise multidisciplinar (SINGHAL; GUPTA, 2008): (a) geologia, no mapeamento superficial e delineamento das discontinuidades e espessura da zona de intemperismo; (b) geomorfologia, na definição da forma de relevo e do padrão da rede de drenagem; (c) hidrogeologia, relacionada aos parâmetros hidráulicos do aquífero e à qualidade da água subterrânea; (d) sensoriamento remoto, na análise de feições do substrato que apresentam reflexo em superfície; (e) geofísica, no imageamento das discontinuidades em subsuperfície. Em ambientes cristalinos, geralmente a rede de drenagem é estruturalmente controlada em padrão angular ou retangular, revelando indícios das discontinuidades geológicas. Moore e Stewart (1983), Prabu e Rajagopalan (2013), Acharya et al. (2012) e Sur e Acharya (2020) avaliaram a correlação entre lineamentos superficiais, comumente de natureza frágil, e o aumento na porosidade e permeabilidade nas rochas e, com isto, locais propícios para a locação de poços.

No Brasil, Siqueira (1963) e Silva (2000) propuseram modelos de acumulação e percolação, distinguindo-os quanto à natureza frágil ou dúctil da discontinuidade que controla a drenagem, denominando-os de riacho-fenda e calha elúvio-aluvionar. Geomorfologicamente, ambos são idênticos e, na ausência de dados geológicos que associem a qual modelo a

drenagem está controlada, o profissional pode, por exemplo, imaginar que está locando o poço ao longo do modelo riacho-fenda, quando estaria no outro.

No cristalino, a produtividade de poços de 100 a 40.000 l/h (MAURICE et al., 2018; COURTOIS et al., 2010), usualmente baixa, denota a heterogeneidade do meio fissural (GONZÁLEZ et al., 2021), relacionada também a distintos perfis intempéricos com espessuras de até 100 m (LACHASSAGNE et al., 2021; DEWANDEL et al., 2006). No campo, é difícil localizar precisamente as discontinuidades ou caracterizá-las geometricamente em subsuperfície quanto ao mergulho, à interconectividade e ao atual comportamento “aberto” ou “fechado”. Coberturas sedimentares, autóctones ou alóctones, capeando o substrato e a ausência de modelos conceituais ilustrando o real modo de percolação e acumulação da água subterrânea, prejudicam ainda mais a caracterização deste ambiente. Desta forma, apesar do uso integrado destas técnicas, a ambiguidade interpretativa acarreta no baixo índice de acerto de poços produtivos, de 70 % (RODRIGUES et al., 2017) a 60 % (ALLE et al., 2018), considerando aquele poço com vazão superior a 700 l/h.

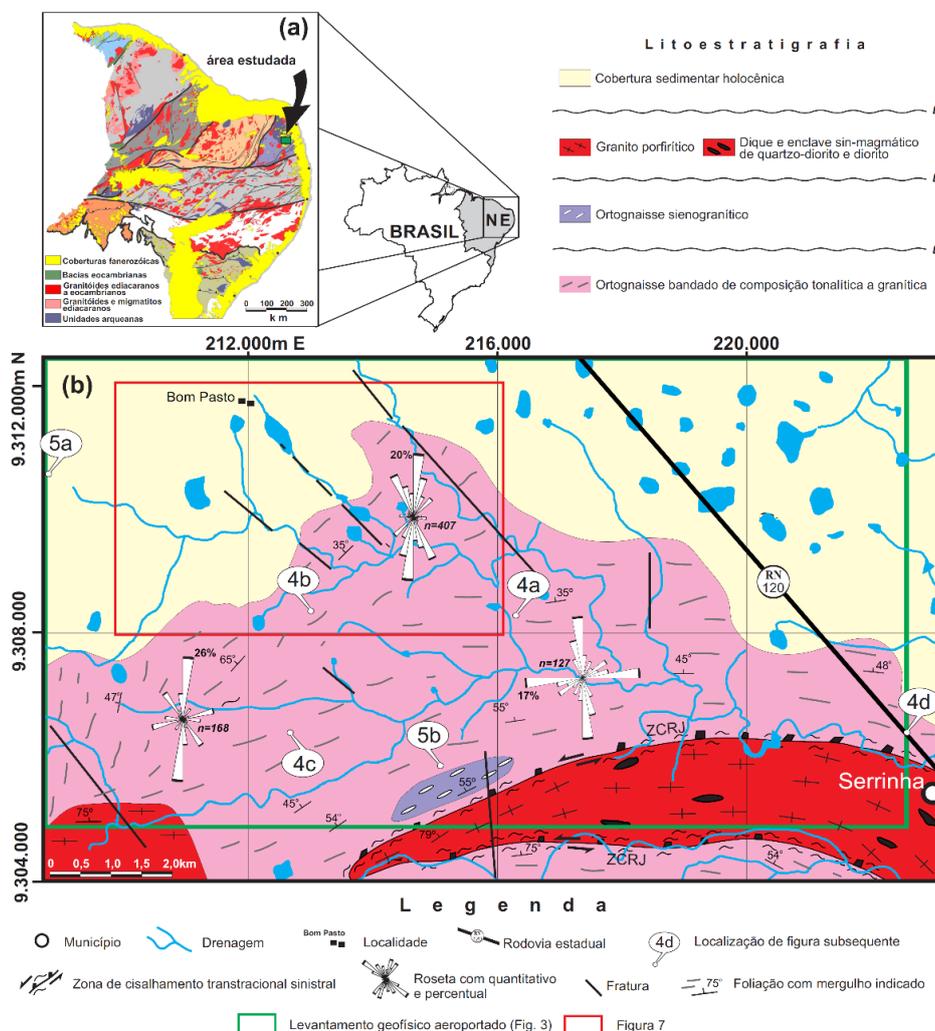
Esporadicamente, são utilizados métodos geofísicos, geralmente elétricos e eletromagnéticos terrestres, implicando em critérios de locação mais precisos (MEDEIROS,

1987; MEDEIROS; LIMA, 1990; MEDEIROS; LIMA 1999; SÁ E ELIS, 2017). Francés *et al.* (2014) integraram imagens de sensores remotos à geofísica (Ground Penetrating Radar, tomografia de resistividade elétrica e ressonância magnética) para definir forma e dimensão do meio fissural. Igualmente, Nascimento da Silva *et al.* (2004) utilizaram métodos geofísicos rasos (eletrorresistividade e GPR) associados à neotectônica para analisar a diferença de produtividade entre poços situados a curtas distâncias entre si, uma vez que os esforços tectônicos atuais podem, em teoria, condicionar o atual comportamento "aberto" ou "fechado" das descontinuidades. Cassidy *et al.* (2014) usaram técnicas geofísicas multi-escala, envolvendo imagens Lidar e dados geofísicos magnéticos e eletromagnéticos, extrapolando as informações da escala de poço para a regional, enquanto Deyassa *et al.* (2014) empregaram dados de produção de poços e perfis litológicos para analisar verticalmente a variação permo-porosa do aquífero. Chandra *et al.* (2019), utilizando

levantamentos eletromagnético aeroportados, identificaram lineamentos hidrogeológicos ("hidrolinhas") em profundidades máximas de 80 m, em consonância com os resultados de Dewandel *et al.* (2006) e Lachassagne *et al.* (2021). Essas pesquisas convergem na análise multidisciplinar do meio fissural, conforme proposto por Singhal e Gupta (2008), indicando expressivas variações vertical e horizontal das propriedades do substrato, explicando, ao menos em parte, a discrepância nas vazões de poços situados a poucos metros entre si.

A área de estudo situa-se no Estado do Rio Grande do Norte (Figura 2a), a cerca de 75 km a SW da capital Natal. A sua escolha se deu em função de poços perfurados com resultados discrepantes em suas vazões e pela presença extensiva de cobertura sedimentar ou solo que dificultavam a abordagem usual de locação

Figura 2 – Geologia da área nos contextos: (a) da Província Borborema; (b) local



Fonte: Modificado de Santos *et al.* (2021).

2. OBJETIVOS

O Projeto Água Subterrânea no Nordeste do Brasil (PROASNE-Brasil, MAURICE; LIMA, 2002) permitiu adquirir, processar e

interpretar dados diversos, objetivando relacionar geologia, geofísica e potencialidade hidrogeológica no meio fissural. Em particular, foi realizado um levantamento geofísico aeroportado magnético e eletromagnético multifrequência de

forma inédita para as condições geológicas (rochas cristalinas), climáticas (semiárido) e de objetivos (recursos hidrogeológicos subterrâneos).

Objetiva-se, através de um trabalho multidisciplinar integrado, avaliar o real modo de percolação e armazenamento de água subterrânea no cristalino no semiárido, de tal forma a serem detalhados os modelos existentes, fornecendo subsídios para a locação otimizada mesmo fazendo uso das técnicas tradicionais. Neste contexto, são analisados de forma extensiva a ocorrência dos modelos de acumulação de água subterrânea riacho-fenda (SIQUEIRA, 1963) e calha elúvio-aluvionar (SILVA, 2000). A estes modelos, é preconizada a dificuldade empírica durante os trabalhos de locação de poços, a discriminação de qual modelo ocorre localmente e a sua importância relativa durante a exploração.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo se localiza na Província Borborema (ALMEIDA *et al.*, 1977, ALMEIDA *et al.*, 1981), mais precisamente, na parte central do Maciço São José de Campestre (MSJC), a leste do Sistema de Dobramentos Seridó (BRITO NEVES, 1983). O MSJC é um mosaico de blocos gnáissicos, formados durante diferentes pulsos de acreção crustal, delimitados por zonas de cisalhamento e intrudido por corpos granitóides (DANTAS, 1998).

Ao longo do tempo geológico, eventos tectônicos por vezes reativaram feições dúcteis preexistentes em um nível crustal raso. Em específico ao Fanerozóico, no final do Ciclo Brasileiro ocorreu a implantação de estruturais frágeis e dúcteis-frágeis tardi a pós-orogênicas decorrentes de esforços compressivos E-W e distensivos N-S (JARDIM DE SÁ *et al.*, 1999). Do Juro-Cretáceo ao Terciário, por ação do desenvolvimento das bacias sedimentares da margem continental brasileira, estruturas foram formadas sob esforços distensivos N-S (MATOS, 1992), os quais foram invertidos para compressão N-S no Terciário Superior (DANTAS, 1998). Durante o Holoceno, regionalmente, a compressão é E-W e a distensão, N-S (FERREIRA *et al.*, 1998).

4. METODOLOGIA

4.1. Mapeamento geológico

O mapeamento geológico (Figura 2b, LIMA, 2002) foi realizado na escala de 1:50.000, compatível com a escala do levantamento geofísico aeroportado. Em uma etapa inicial,

foram utilizadas imagens de satélites SPOT e fotografias aéreas convencionais objetivando o melhor entendimento do contexto geológico regional, permitindo gerar mapas de lineamentos e contato geológicos, de vias de acesso e da rede de drenagem. Em campo, afloramentos foram descritos coletando atitudes de foliações e de fraturas, em uma densidade variando de 4 pontos por km² na porção sul a 1 ponto por 2 km² na porção norte.

4.2. Levantamento geofísico aeroportado

O levantamento aéreo foi realizado em uma área de 100 km² (localização na Figura 2 e produtos na Figura 3) utilizando metodologia definida pela CPRM (2001) ao longo de linhas de voo E-W, com 13 km de extensão, equidistantes 100 m, e linhas de controle N-S, com 8 km de extensão, espaçadas por 500 m. Os sensores eletromagnéticos e magnético foram rebocados em *bird* à velocidade de 144 km/h, altitude de 30 m e taxa de amostragem temporal de 0,1 s, resultando na taxa de amostragem espacial de 4 m.

Na aeronave e em terra foram utilizados magnetômetros Minimag, modelo Geometrics G-822A, acoplados a um sensor de bombeamento ótico de vapor de césio na faixa de 20.000-95.000 nT, com resolução de 0,001 nT. O sistema eletromagnético empregado, Aerodat-DSP-99, consiste de cinco pares de bobinas transmissoras-receptoras no domínio da frequência, espaçadas por 6,4 m. Foram utilizados dois pares de bobinas no arranjo coaxial (900 e 4.500 Hz), verticalizados com eixo alinhado à direção de voo e três pares horizontalizados no arranjo coplanar (900, 4.500 e 33.000 Hz). Para cada frequência, é associada um *skin depth* *d* (espessura pelicular), dada por (SPIES 1989):

$$d \approx 503,29 \cdot \left(\sqrt{f/\rho} \right)^{-1} \quad (1)$$

em que *f* é a frequência (em Hz) e ρ , a resistividade do substrato (em Ohm.m). Empiricamente, é usual atribuir uma profundidade efetiva de investigação (*z_e*) de cerca de 1/5 *d* (KEAREY *et al.*, 2002).

A Tabela 1 exemplifica valores de "d" e "z_e" para as frequências utilizadas e diferentes resistividades do substrato. Dados geoeletricos terrestres mostram que a resistividade do terreno é cerca de 100 Ohm.m. Assim, z_e é de 15 m para f de 4.500 Hz, por exemplo.

Tabela 1 – *Skin depths* (*d*) e profundidades efetivas de investigação (*z_e*) para frequências (*f*) disponíveis e diferentes resistividades (ρ) do substrato

<i>f</i> (Hz)	<i>d</i> (m)			<i>z_e</i> (m)		
900	53	168	375	11	33	75
4500	14	75	168	5	15	33
33000	9	28	62	2	6	12
	10	100	500	10	100	500
	ρ (Ohm.m)					

Dois sistemas GPS de 12 canais, sendo um na aeronave e outro na base em terra, forneceram dados de elevação corrigidos diferencialmente permitindo gerar o Modelo Digital do Terreno (MDT, Figura 3d), útil para a análise geomorfológica.

4.3. Levantamento geofísico terrestre

Os locais dos levantamentos geofísicos terrestres foram definidos a partir da análise de anomalias nos dados aeroportados, com base nas disposições angulares e justaposições espaciais entre anomalias de condutividade, magnéticas e baixos topográficos definidos pelo MDT. Estas anomalias, por sua vez, definem locais em potencial à existência dos modelos riacho-fenda e calha elúvio-aluvionar. Sondagens Elétricas Verticais (SEV's) foram realizadas, utilizando um eletrorresistímetro monocanal, georeferenciadas e justapostas lateralmente e, por fim, interpoladas, permitindo gerar mapas e seções verticais locais, de maior resolução, para comparação com os dados aéreos.

5. RESULTADOS

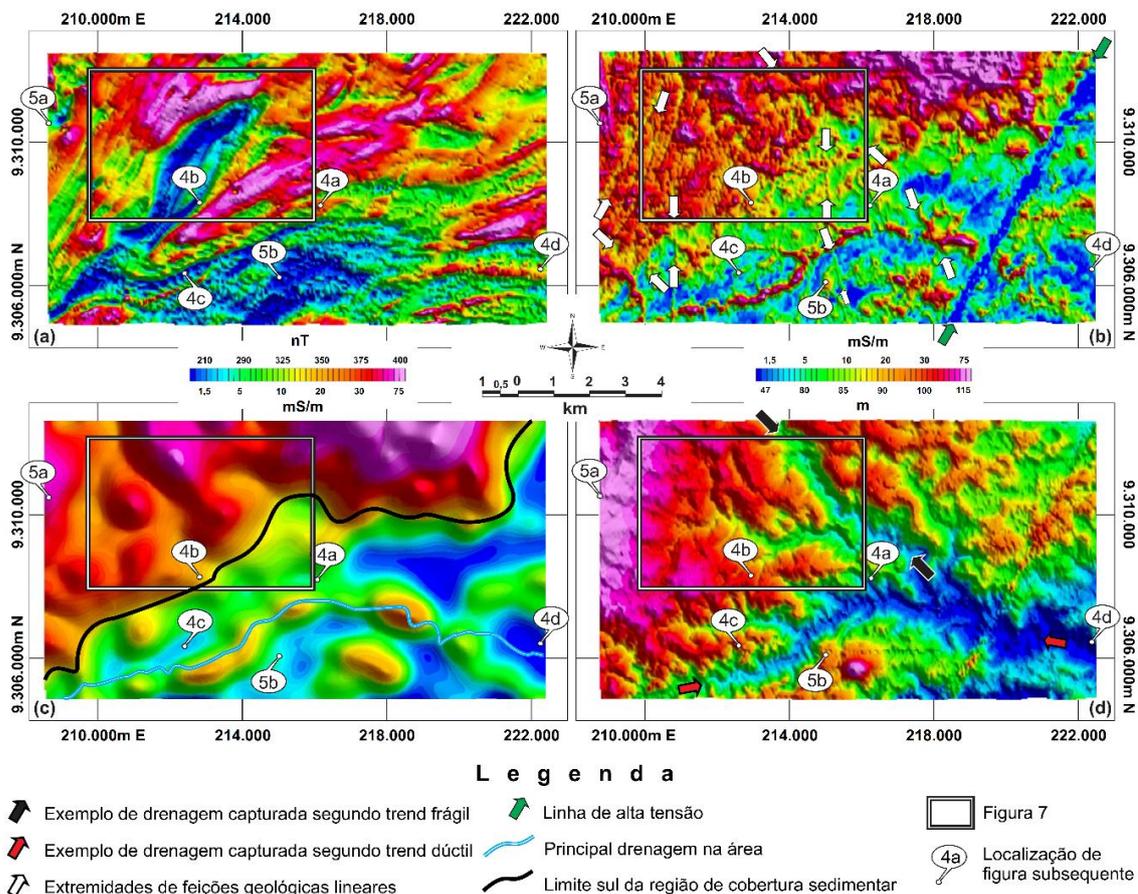
Os resultados obtidos abrangem dois aspectos integrados entre si: geológicos e geofísicos.

5.1. Geologia da área de Serrinha

Foram identificadas cinco unidades litológicas (Figura 2b, LIMA, 2002): (1) ortognaisses bandados tonalíticos a graníticos; (2) ortognaisses sienograníticos; (3) diques de anfibolitos e corpos metabásicos-intermediários; (4) diques e enclaves graníticos porfíricos com quartzo-dioritos e dioritos; e (5) coberturas sedimentares. Foram observados três episódios dúcteis, D₁, D₂ e D₃, com a estruturação em macroescala relacionada ao último, que dobrou, seccionou e provocou inflexões nas estruturas pré-existentes. A principal feição associada a D₃ é a Zona de Cisalhamento Rio Jacu (ZCRJ), gerada sob cinemática distensional, reativada em evento retrometamórfico com cinemática transcorrente sinistral, exercendo forte influência no corpo granítico localizado a SE da área (Figura 2b), imprimindo aspecto de augen-gnaiss às suas bordas.

O mapa de anomalia magnética (Figura 3a) evidencia o trend dúctil D₃, inclusive ao norte da área, onde ocorre uma cobertura sedimentar. Aspectos de campo nas figuras 4a e 4b ilustram zona de cisalhamento e trends E-W e NE de milonito, ambas com forte representatividade no mapa magnético (Figura 3a).

Figura 3 – Mapas geofísicos aeroportados pseudo-iluminados: (a) anomalia magnética; (b) condutividade aparente (4500Hz, arranjo vertical coaxial); (c) condutividade aparente (4500Hz, arranjo horizontal coplanar, filtro passa-baixa de 2km); (d) Modelo Digital do Terreno (MDT). Inclinação da fonte de iluminação: 45°; declinação: 315°Az para (a), 045° para (b), (c) e (d). Localização na Figura 2.



As estruturas frágeis ocorrem como fraturas em macro e meso escalas, correlatas a diversos episódios tectônicos e com trends preferenciais N-S e E-W (rosetas na Figura 2). Um episódio mais antigo, caracterizado por fraturas preenchidas por material ácido (quartzo, pegmatito, aplito e epídoto),

exemplificadas na Figura 4c, representam níveis crustais profundos. Um episódio mais recente, e de nível crustal raso, caracteriza-se pelo preenchimento por material de baixa temperatura (carbonato) ou pelas estrias de abrasão nos planos de movimentação (Figura 4d).

Figura 4 – Descontinuidades em afloramentos: (a) zona de cisalhamento E-W; (b) zona de cisalhamento NE; (c) fraturas N-S preenchidas por quartzo em gnaisses (nível crustal profundo); (d) fraturas N-S com estrias de abrasão em gnaisses (nível crustal raso). Localização nas figuras 02 e 03



Fraturas NE preenchidas por material de baixa temperatura (carbonato) ou caracterizadas por estrias de abrasão denotando nível crustal relativamente raso ilustram o evento tectônico mais recente, compatível com o campo de tensões neotectônico regional, dado por compressão máxima no plano horizontal E-W e distensão N-S (FERREIRA *et al.*, 1998; ASSUMPÇÃO, 1992, ASSUMPÇÃO *et al.*, 2016). Estas tensões podem controlar, mesmo que parcialmente, o comportamento “aberto” ou “fechado” das descontinuidades (JARDIM DE SÁ *et al.* 2008). Desconsiderando outros critérios, como interconectividade ou associação a zonas de recarga, as estruturas mais propícias ao acúmulo de água seriam as E-W, pois estão na mesma direção da compressão (“mais abertas”), enquanto as N-S apresentariam menor potencialidade hidrogeológica, por sua tendência ao fechamento. Em situação intermediária estão as descontinuidades NE e NW.

5.2. Sistema eletromagnético e MDT

Dentre os levantamentos aéreos, os dados eletromagnéticos permitem mapear as anomalias de condutividade, que estão potencialmente associadas às descontinuidades saturadas total ou parcialmente por água. Nos mapas dos arranjos coaxial (Figura 3b) e coplanar (com filtro passa-baixa de 2 km, Figura 3c) na frequência de 4.500 Hz, dois domínios geoeletricos foram identificados: (1) na porção norte, com valores mais elevados de condutividade aparente e; (2) na porção sul, com valores menores de condutividade aparente. Em campo, o domínio (1) representa regiões com coberturas sedimentares expressivas (Figura 5a) ou regiões de lagoas, indicando nível freático raso, enquanto o domínio (2) indica substrato cristalino subaflorante (Figura 5b).

Figura 5 – Aspectos de campo dos domínios geoeletricos contrastantes das figuras 3b e 3c: (a) condutivo Norte, representando coberturas sedimentares arenosas; (b) resistivo Sul, caracterizado por embasamento gnáissico subafiorante. Localização nas figuras 02 e 03.



Anomalias culturais também podem ser identificadas, destacando-se a anomalia linear NNE, associada a uma linha de alta tensão (setas verdes na Figura 03b). Feições superficiais também ocorrem, como aluviões das drenagens saturados em água, identificados nos arranjos coplanar e coaxial, destacando-se o rio paralelo à ZCRJ (Figuras 2, 3b e 3c).

Descontinuidades de interesse hidrogeológico são realçadas no mapa do arranjo coaxial (Figura 3b), através dos seus diferentes trends correlatos à foliação ou às zonas de fraturas. Compare as anomalias condutivas indicadas pelas setas em

No arranjo coplanar (4.500 Hz) com aplicação de filtro passa-baixa de 2 km (Figura 3c), a zona de cobertura sedimentar e as calhas mais espessas de aluviões foram realçadas. Do ponto de vista hidrogeológico, estes capeamentos funcionam como zonas de recarga importantes, principalmente quando são areno-quartzosos.

Em geral, no cristalino, trends frágil e dúctil se refletem no controle estrutural da rede de drenagem, que podem ser

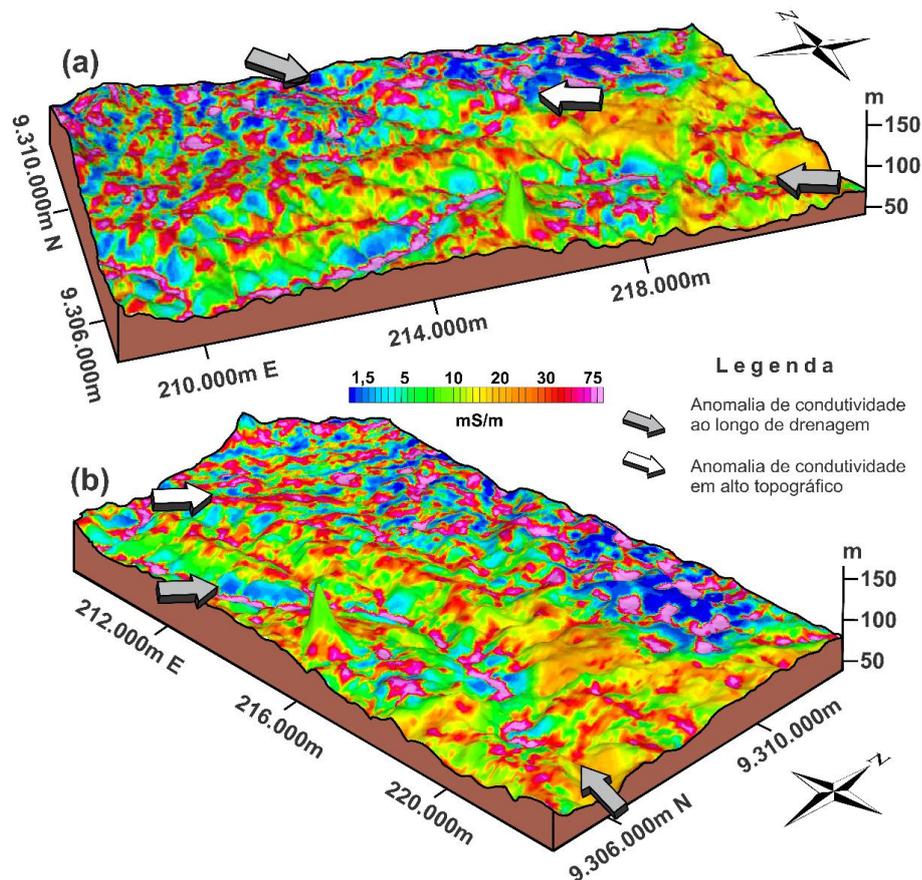
branco na Figura 3b, com dados estruturais na Figura 2b e anomalias magnéticas na Figura 3a. Neste arranjo eletromagnético, foram identificadas anomalias condutivas em alto ângulo ou paralelas à foliação (Figura 3a). No primeiro caso, o modelo riacho-fenda, as anomalias de condutividade associadas às feições frágeis saturadas em água, geralmente NW ou N-S, encontram-se em alto ângulo com as anomalias magnéticas NE a ENE (Figura 3a). No segundo caso, representando o modelo calha elúvio-aluvionar, observam-se anomalias de condutividade indicando zonas saturadas em água, justapostas ao trend dúctil destacado pelas anomalias .

caracterizas na análise geomorfológica e servem como ferramenta de predição. O MDT (Figura 3d) mostra que o gradiente regional diminui de oeste para leste. Os baixos topográficos, que definem a rede drenagem, apresentam um típico padrão de controle estrutural, alternando entre as direções NW (frágil) e NE (dúctil). Na Figura 3d, o Rio Jacu (setas vermelhas) alinha-se com uma zona de cisalhamento, enquanto outro baixo topográfico expressivo NW-SE (setas pretas) é alinhado segundo importante zona de fratura.

A análise anterior foi feita de forma isolada. Contudo, os aspectos mais diagnósticos podem ser obtidos da interpretação integrada. Em um primeiro momento, a associação de anomalias magnéticas (Figura 3a), que definem o trend dúctil, com os baixos topográficos marcados no MDT (Figura 3d), os quais evidenciam o reflexo superficial das descontinuidades do substrato, indica a existência de um determinado modelo da seguinte forma: (a) calha elúvio-aluvionar marcado pela justaposição de anomalia magnética com baixo topográfico, (b) riacho-fenda, baixo topográfico em alto ângulo com anomalia magnética. Contudo, nesta fase, não há ainda como avaliar a potencialidade hidrogeológica de cada caso. Neste contexto, podem ser utilizados dois dados na identificação de zonas potencialmente importantes para o acúmulo de água: (1) mapa de condutividade aparente com frequência de 4.500 Hz, arranjo coaxial (Figura 3b, eficiente no imageamento das descontinuidades condutivas) e (2) MDT (Figura 3d). Com base na integração entre anomalia magnética e baixo topográfico, definindo a ocorrência dos

modelos, nesta nova fase interpretativa, com a superposição dos dados eletromagnéticos com o MDT (figuras 6a e 6b), são indicados elementos para analisar a área de trabalho quanto ao potencial hidrogeológico. Na Figura 6a, a feição NW (setas cinzas) exemplifica um modelo riacho-fenda em potencial, denotado pela justaposição do baixo topográfico com o trend frágil e a anomalia de condutividade associada, ambos em alto ângulo com as anomalias magnéticas locais (Figura 3a). Já as setas cinzas na Figura 6b, indicam o modelo calha alúvio-aluvionar importante, marcado por baixo topográfico sinuoso NE a E-W (trend dúctil denotado pelas anomalias magnéticas na Figura 3a), superposto a anomalia de condutividade. Contudo, neste último caso, a anomalia de condutividade pode indicar água na calha de sedimentos da drenagem e não, na foliação. Nas figuras 6a e 6b também são indicadas anomalias de condutividade em altos topográficos (setas brancas), porém ainda não abordadas por modelos conceituais.

Figura 6 – Visões em perspectiva da composição do dado de condutividade aparente (cores) com o MDT (forma de relevo): (a) anomalias de condutividade NW paralelas a drenagem controlada pelo frágil (setas cinzas) e ao longo de alto topográfico (seta branca); (b) anomalias de condutividade ao longo de drenagem controlada pelo dúctil (setas cinza) e em alto topográfico NE (seta branca). Exagero vertical: 20x



5.3. A geofísica terrestre

Duas anomalias geofísicas de condutividade (Figura 7) foram selecionadas para um levantamento geoeletrico terrestre, sendo uma associada ao frágil e outra, ao dúctil, cujos resultados estão apresentados nas figuras 8 e 9.

No caso da drenagem controlada pelo frágil (modelo riacho-fenda), o mapa para AB/2 de 50 m (figuras 8a e 8a´) indica uma zona condutiva, a SW da drenagem (estação X=0 m), associada ao acúmulo de sedimentos areno-argilosos. Linhas de isovalores de resistividade aparente NE associam-se ao bandamento gnáissico, seccionado em diversas posições por

fraturas marcadas por anomalias NW controlando a drenagem. Na seção Y +90 m (figuras 8b e 8b´), nas imediações da estação X -20 m, a anomalia condutiva indica fraturas subverticalizadas. O mesmo ocorre nas seções Y +60 e 0 m (figuras 8c e 8c´; 8d e 8d´), subverticalizadas nas primeiras e com mergulho para SW, nas seguintes. A Figura 8e representa a interpretação geológica, destacando a foliação NE mergulhando para SE, truncada por fraturas NW subverticais. Este típico modelo riacho-fenda tem a potencialidade hidrogeológica incrementada pela porosidade secundária da foliação, com conectividade vertical condicionada pelas fraturas e distribuição lateral do fluxo de água subterrânea promovida pelo dúctil.

Figura 7 - Destaque do mapa de condutividade aparente (Figura 3b), indicando locais dos levantamentos geoeletricos segundo drenagens controladas por fratura (NW) e foliação (NE). Localização nas figuras 2 e 3

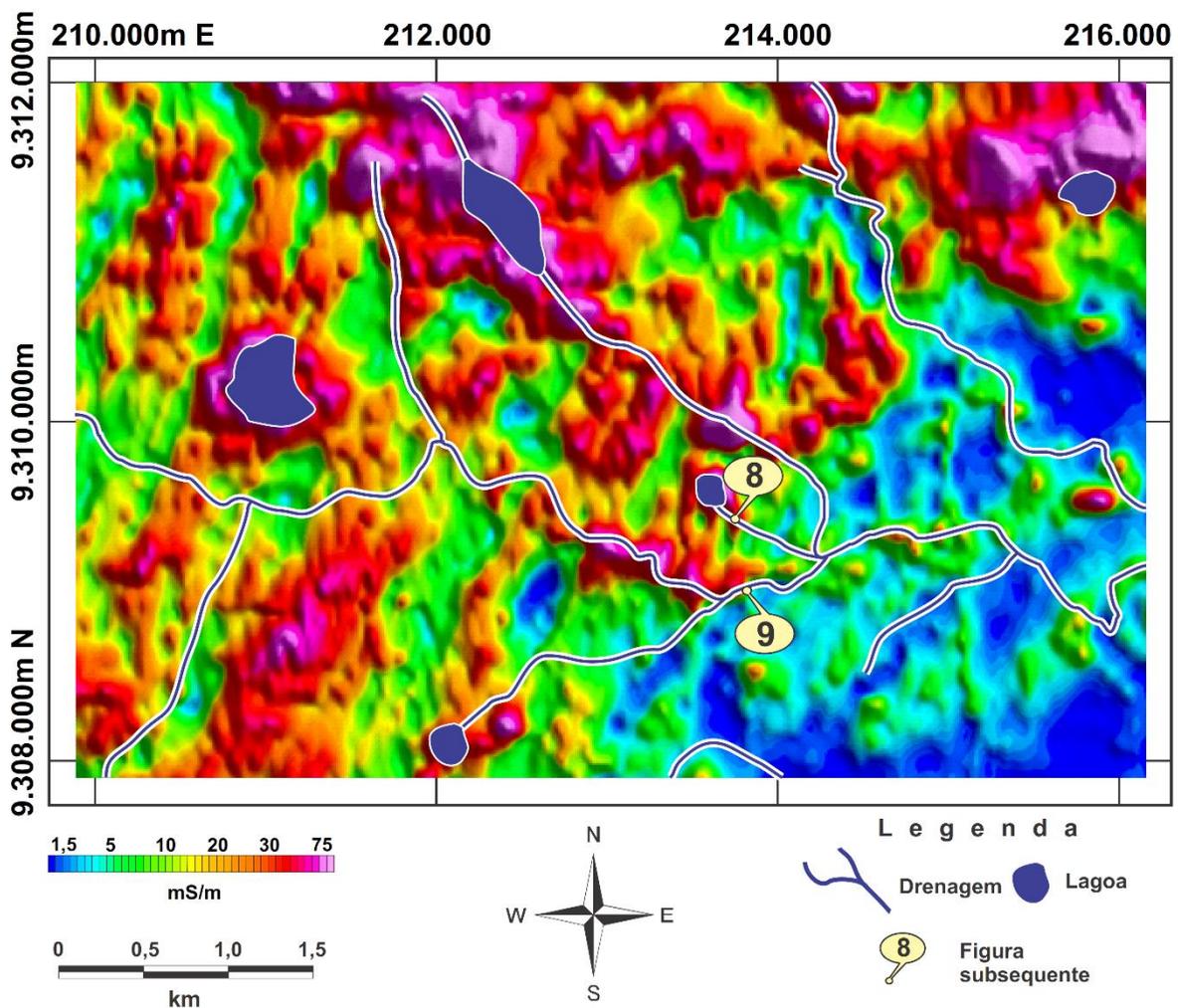


Figura 8 – Imageamento geoeletrico transversal ao modelo riacho-fenda (localização na Figura 7): (a) e (a') mapas de resistividade aparente ($AB/2=50m$); (b)/(b'), (c)/(c') e (d)/(d') seções verticais em diferentes coordenadas locais Y, transversais à descontinuidade; (e) interpretação geológica, destacando a foliação mergulhando para SE e fraturas NW subverticais

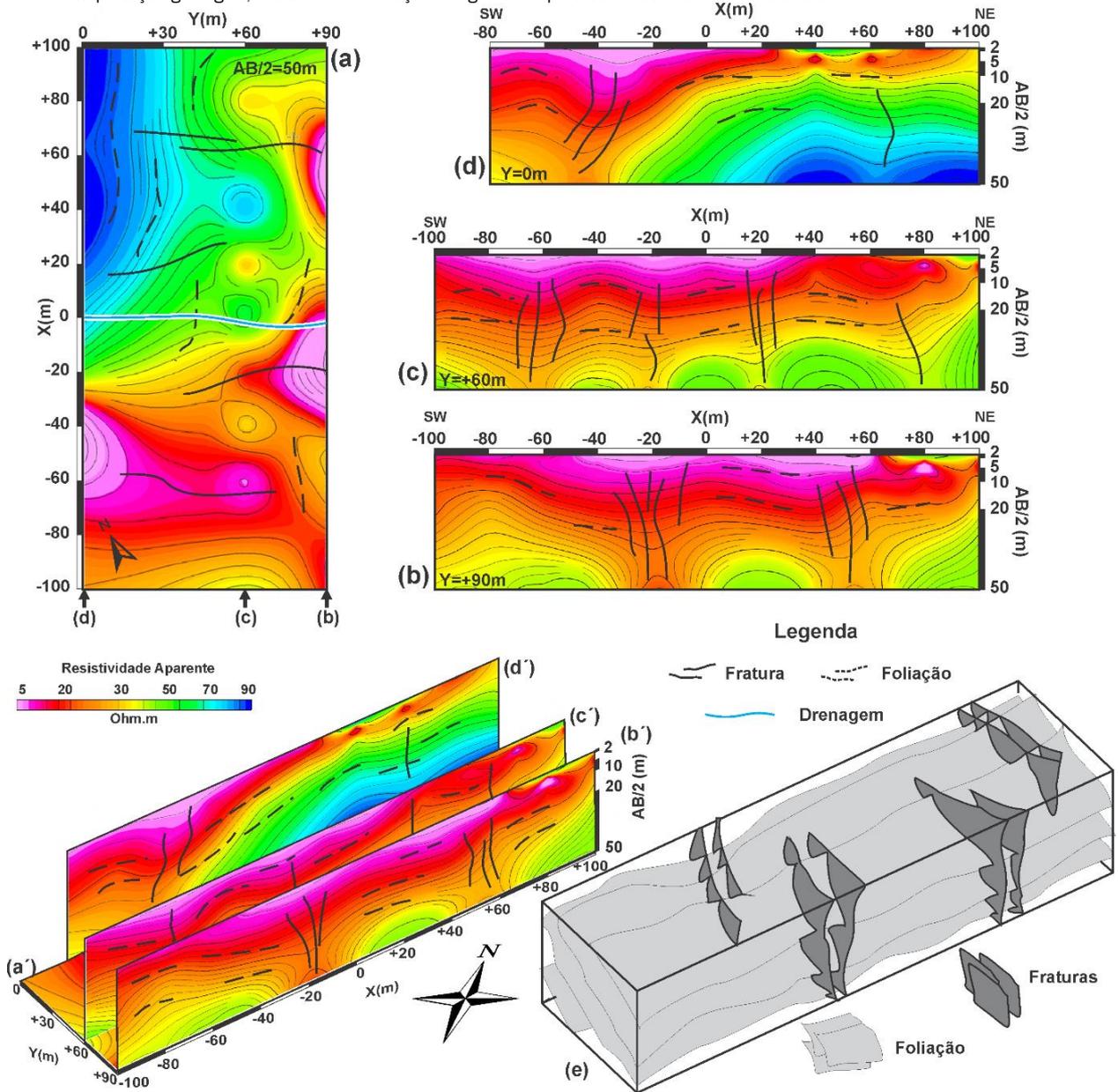
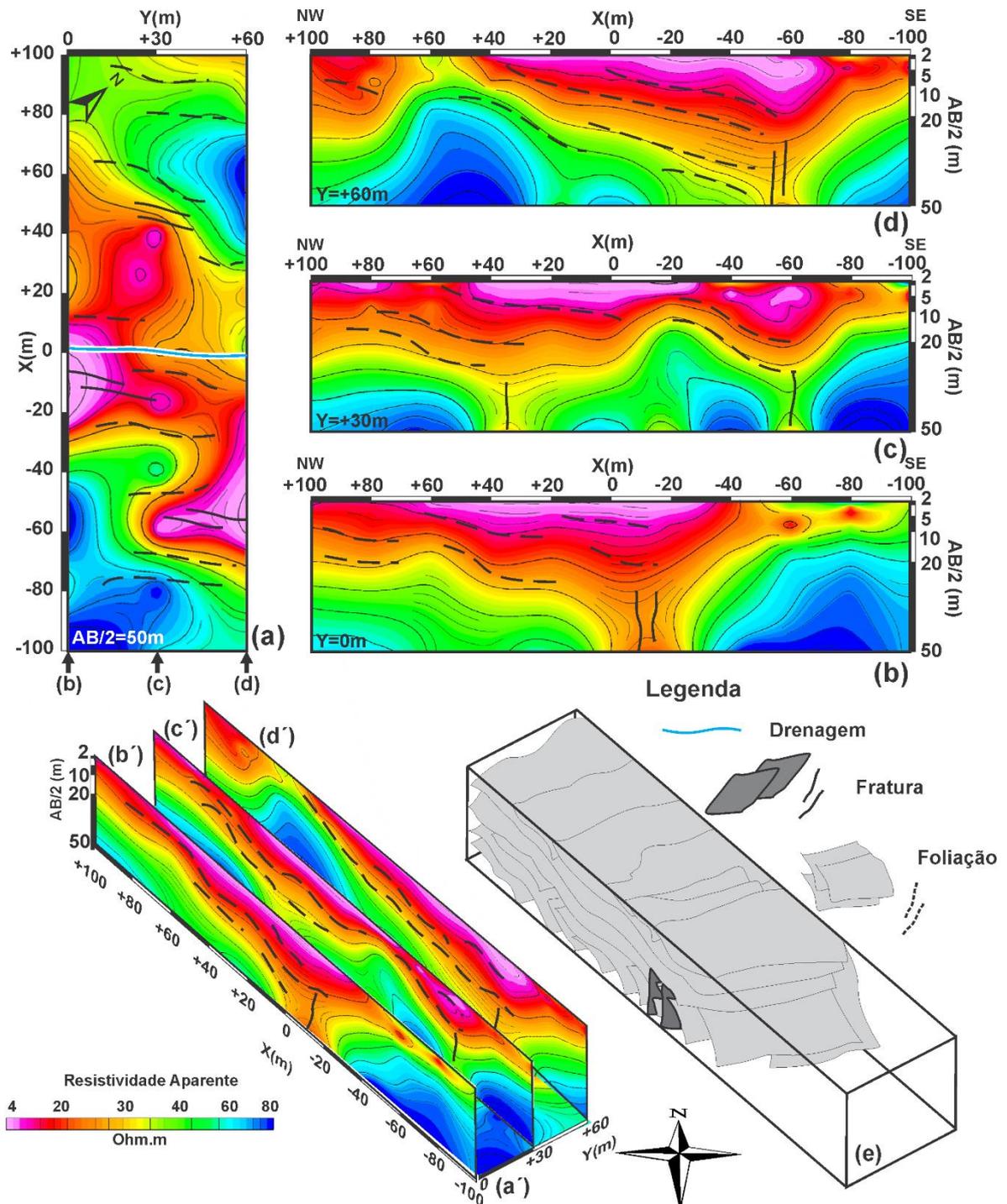


Figura 9 – Imageamento geoeletrico transversal ao modelo calha eluvio-aluvionar (localização na Figura 7): (a) e (a') mapas de resistividade aparente ($AB/2=50m$); (b)/(b'), (c)/(c'), (d)/(d') seções verticais em diferentes coordenadas locais Y, transversais à descontinuidade; (e) interpretação geológica destacando a foliação com mergulho mediano para SE, capeando parcialmente fraturas subverticalizadas



Por outro lado, a Figura 9 mostra um caso de drenagem controlada pela foliação (modelo calha eluvio-aluvionar). Em mapa (figuras 9a e 9a'), ocorre uma zona relativamente condutiva, associada ao leito da drenagem (estação $X=0$ m). No setor SE das seções verticais (figuras 9b e 9b'; figuras 9c e 9c'; figuras 9d e 9d'), os valores mais elevados de resistividade aparente indicam um substrato cristalino subflorante, enquanto que, na porção NW, o setor mais condutivo e com linhas de isovalores de resistividade aparente com mergulho suave para SE, paralelas à foliação,

indica a resposta geofísica da calha sedimentar mais espessa. De forma subordinada, há possivelmente fraturas subverticais NE sob a calha de sedimentos.

6. DISCUSSÕES

Em trabalhos de locação de poços em terrenos cristalinos, a variação de poucos metros pode resultar na diferença entre um poço produtivo e um "seco", ilustrando as heterogeneidade e anisotropia do substrato, conforme

discutido por Singhal e Gupta (2008), confirmando o elevado risco exploratório, exemplificado por Medeiros (1987), Medeiros e Lima (1990), Nascimento da Silva *et al.* (2004), Silva (2000), Rodrigues *et al.* (2017) e Alle *et al.* (2018). O conhecimento do substrato e das descontinuidades hidrogeologicamente importantes é imprescindível para locações promissoras, podendo ser realizado através de trabalho multidisciplinar, conforme destacado por Singhal e Gupta (2008). As descontinuidades geológicas, a exemplo das "hidrolinhas" discutidas por Chandra *et al.* (2019), ocorrem na forma de estruturas dúcteis e frágeis, dentre as quais devem ser selecionadas aquelas com maior potencial hidrogeológico, analisando a viabilidade dos métodos de investigação disponíveis.

Os métodos geofísicos aeroportados, em especial os sistemas eletromagnetométricos foram eficazes na determinação das zonas de interesse, conforme estabelecido por Chandra *et al.* (2019), porém o seu alto custo torna esta abordagem impeditiva à atual realidade econômica brasileira. Contudo, o seu emprego, embora localizado, permitiu o estudo aprofundado dos modelos conceituais de percolação e retenção de água subterrânea riacho-fenda (SIQUEIRA, 1963) e calha elúvio-aluvionar (SILVA, 2000), muita embora, provavelmente, devam refletir somente uma parcela de como ocorre a água no meio fissural.

No Brasil, o mapeamento geológico-estrutural, a análise geomorfológica e a interpretação de produtos de sensores remotos ainda são considerados os métodos tradicionais na locação de poços. Todavia, especialmente nos locais que apresentam coberturas sedimentares que mascaram os afloramentos, há a necessidade de técnicas que permitam a visualização do substrato, em um trabalho integrador entre geologia e geofísica, conforme discutido por Medeiros (1987), Nascimento da Silva *et al.* (2004) e Sá e Elis (2017). Desta forma, pode-se minimizar a ambiguidade interpretativa pela capacidade em adicionar informações relevantes à hidrogeologia, principalmente na avaliação do nível relativo de saturação de água nas descontinuidades ou mesmo no diagnóstico do seu grau de interconectividade, em acordo ao discutido por Francés *et al.* (2014).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em rochas cristalinas a porosidade primária é desprezível e a água é armazenada nas descontinuidades, de caráter dúctil ou frágil, sendo assim, de fundamental importância, distinguir entre estes dois tipos de descontinuidades, de modo a otimizar a locação de poços. Neste contexto, a análise multidisciplinar minimiza a ambiguidade interpretativa quando do uso isolado de técnicas geológicas ou geofísicas.

O mapeamento geológico-estrutural de campo distinguiu os litotipos existentes, bem como identificou os diversos episódios de deformações dúcteis e frágeis que os afetaram. O mapa do campo magnético foi capaz de discernir o trend dúctil representativo da deformação dúctil brasileira, sendo especialmente importante nos locais ausentes de

afloramentos em função de capeamentos sedimentares expressivos. A correlação com os dados neotectônicos indica que as feições E-W têm relativo maior potencial hidrogeológico, apesar da estruturação frágil principal ocorrer na direção N-S, podendo apresentar importante papel na interconectividade entre setores ao longo do trend dúctil ou frágil.

O sistema eletromagnético aeroportado e sua integração aos outros dados disponíveis permitiu a análise abrangente dos modelos de percolação e acumulação de água riacho-fenda e calha elúvio-aluvionar. Anomalias foram detalhadas pelo emprego do método geoeletrico, avaliando o grau de interconectividade das descontinuidades e verificando que, comumente, um modelo coexiste com o outro.

Verificou-se, portanto, que o procedimento mais confiável a ser empregado na análise de terrenos cristalinos é a interatividade das técnicas disponíveis, baseado no conhecimento geológico do alvo exploratório. Cada método, quando analisado individualmente, apresenta a sua própria deficiência, a qual pode ser contornada pela análise de uma outra técnica de forma integrada. Além disto, do ponto de vista de acumulação de água subterrânea em terrenos cristalinos, sempre haverá a interferência, normalmente positiva e em diferentes proporções, de mais de um modelo, normalmente associado a distintos níveis de interconectividade de descontinuidades dúcteis e frágeis, incrementando a porosidade secundária e a permeabilidade do meio aquífero e, por conseguinte, no aumento da potencialidade hidrogeológica do setor estudado.

8. AGRADECIMENTOS

Autores agradecem ao PPGG-UFRN e ao PROASNE pela disponibilidade dos dados e à CAPES e ao CNPq pelas bolsas concedidas, bem como aos revisores anônimos desta publicação.

REFERÊNCIAS

- ACHARYA, T., NAG, S.K., BASUMALLIK, S. Hydraulic significance of fracture correlated lineaments in precambrian rocks in Purulia district, West Bengal. *J Geol Soc India*, v. 80, p. 723–730, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12594-012-0198-5>
- ALLE, I.C., DESCLOITRES, M., VOUILLAMOZ, J.-M., YALO, N., LAWSON, F.M.A., ADIHO, A.C. Why 1D electrical resistivity techniques can result in inaccurate siting of boreholes in hard rock aquifers and why electrical resistivity tomography must be preferred: the example of Benin, West Africa, *Journal of African Earth Sciences*, v. 139, p. 341–353, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.12.007>.
- ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., FUCK R. A. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8, 1977. *Anais* [...]. Recife, PE, SBG, Núcleo Nordeste, 1, 363-392, 1977.
- ALMEIDA, F.F.M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B.B., FUCK, R.A. Brazilian structural provinces: An introduction, *Earth-Science Reviews*, v. 17, n. 1–2, p. 1-29, 1981.

[https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)

ASSUMPCÃO, M. The regional intraplate stress field in South America. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, p. 11.889-11.903, 1992. <https://doi.org/10.1029/91JB01590>

ASSUMPCÃO, M., DIAS, F.L., ZEVALLOS, I., NALIBOFF, J. Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 71, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.005>

BEZERRA, F.M., NASCIMENTO, G.I.L.A., OLIVEIRA JÚNIOR, J.A.S., SILVA, J.L.A., CANEL, L.X.C., CALADO, L.O., BARREIROS, M.F.C.S., BRAGA, M.S., SISTÊLOS, M.G.C.M., BEZERRA, M.J.G., SOUTO, M.L.P., SOUZA, P.A., SILVA, V.U.F. *Delimitação do semiárido 2021*. Relatório Final. SUDENE, Recife, PE, 2021. https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/8-relatoriometodologia_semiarido2021_v9_verseo definitiva_1.pdf/v.iew. Acesso em: 09 set. 2022.

BRITO NEVES, B.B. DE. *O Mapa Geológico do Nordeste Oriental do Brasil, Escala 1/1.000.000*. Tese (Livre Docência em Geologia Estrutural) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983. <https://doi.org/10.11606/T.44.2013.tde-30102013-131731>

CASSIDY, R. COMTE, J., NITSCHKE, J. WILSON, C.E., FLYNN, R., OFFERDINGER, U. Combining multi-scale geophysical techniques for robust hydro-structural characterization in catchments underlain by hard rock in post-glacial regions. *Journal of Hydrology*, 517:715-731, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.004>

CHANDRA, S., AUKEN, E., MAURYA, P.K., AHMED, S., VERMA, S.K. Large Scale Mapping of Fractures and Groundwater Pathways in Crystalline Hardrock By AEM. *Scientific Reports* 9: 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36153-1>

COURTOIS, N., LACHASSAGNE, P., WYNS, R., BLANCHIN, R., BOUGAÏRÉ, F., SOMÉ, S., TAPSOBA, A. Large-Scale Mapping of Hard-Rock Aquifer Properties Applied to Burkina Faso. *Ground water*, v. 48, p. 269-83, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00620.x>

CPRM. *Projeto aerogeofísico água subterrânea no nordeste do Brasil: blocos Juá (CE), Samambaia (PE) e Serrinha (RN): relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e eletromagnetométricos e seleção das anomalias eletromagnéticas*. Rio de Janeiro: Lasa Engenharia e Prospecções. Volume 1, Texto Técnico, 2001. 82 p. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/21693>. Acesso em 2022-09-09

DANTAS, E.P. *Gravimetria e sensoriamento remoto: uma aplicação ao estudo da tectônica recente entre Macau e São Bento do Norte (RN)*. M. Sc. Thesis, Pós-Grad. Geodinâmica e Geofísica, UFRN, Natal, 97p, 1998. disponível em http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/370/1/diss_eugeniodantas.pdf. Acesso em: 09 set. 2022.

DANTAS, E.L., HACKSPACHER, P.C., VAN SCHMUS, W. R., BRITO NEVES, B.B. Archean Accretion in the São José do Campestre Massif, Borborema Province, Northeast Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, v. 28, n. 2, p. 221-228, 1998. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1998221228>

DEWANDEL, B., LACHASSAGNE, P., WYNS, R., MARÉCHAL, J.C., KRISHNAMURTHY, N.S. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by

single or multiphase weathering." *Journal of Hydrology*, v. 330, p. 260-284, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.026>

DEYASSA, G., KEBEDE, S., AYENEW, T., KIDANE, T. Crystalline basement aquifers of Ethiopia: their genesis, classification and aquifer properties. *Journal of African Earth Sciences*, v. 100, p. 191-202, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.06.002>.

FERREIRA, J.M., OLIVEIRA, R.T., TAKEYA, M.K. E ASSUMPCÃO, M. Superposition of local and regional stresses in northeast Brazil: evidence from local mechanisms around the Potiguar marginal basin. *Journal of Applied Geophysics*, v. 134, p. 341-355, 1998. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00563.x>

FRANCÉS, A. P., LUBCZYNSKI, M.W., ROY, J. SANTOS, F.A.M, ARDEKANI, M.R.M. Hydrogeophysics and remote sensing for the design of hydrogeological conceptual models in hard rocks – Sárdón catchment (Spain). *Journal of Applied Geophysics*, v. 110, p. 63-81, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.08.015>

GONZÁLEZ, J.A.M., COMTE, J-C., LEGCHENKO, A., OFFERDINGER, U. HEALY, D. Quantification of groundwater storage heterogeneity in weathered/fractured basement rock aquifers using electrical resistivity tomography: Sensitivity and uncertainty associated with petrophysical modelling, *Journal of Hydrology*, v. 593, 125637, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125637>

JARDIM DE SÁ, E.F., MATOS, R.D.M., MORAIS NETO, J.M. SAADI, A., PESSOA NETO, O.C. Epirogenia cenozóica na Província Borborema: síntese e discussão sobre os modelos de deformação associados. In: SIMP. NAC. EST. TECT., 7., 1999. *Anais [...]*. Lençóis, p. 58– 61, 1999.

JARDIM DE SÁ, E.F.; NASCIMENTO DA SILVA, C.C; CORIOLANO, A.C.; MEDEIROS, W.E. de. Conceito de análise estrutural aplicados à hidrogeologia de terrenos cristalinos. In: FEITOSA, A.C, MANOEL FILHO, J., FEITOSA, E.C., DEMETRIO, J.G.A., *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*, Rio de Janeiro, CPRM, 3. ed., p. 97-120, 2008. <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/14818>. Acesso em: 09 set. 2022.

KEAREY, P, BROOKS, M., HILL, I. *An introduction to geophysical exploration*, 3. ed., Blackwell Science Ltd. Oxford, 272p, 2002.

LACHASSAGNE, P., BENOIT, D., ROBERT W. Review: Hydrogeology of weathered crystalline/hard-rock aquifers—guidelines for the operational survey and management of their groundwater resources. *Hydrogeology Journal*, v. 29, p. 2561 – 2594, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02339-7>

LIMA, M.G. *Mapeamento geológico-estrutural na região de Serrinha (RN), para apoio à interpretação de dados aerogeofísicos na pesquisa hidrogeológica*. Relatório de Graduação, UFRN/CCET/DG, 81p, 2002.

MATOS, R.M.D. The northeast brazilian rift system. *Tectonics*, v. 11, n. 4, p. 766-791, 1992. <https://doi.org/10.1029/91TC03092>

MAURICE, Y., E LIMA, E. DE A. M. O projeto água subterrânea no nordeste do brasil (PROASNE-Brasil) traz tecnologias inovadoras para ajudar ao desenvolvimento dos recursos hídricos do Nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2022. *Anais [...]*, Florianópolis, SC, 10p, 2002. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22820>. Acesso em: 14 set. 2022.

MAURICE L, TAYLOR R.G., TINDIMUGAYA C, MACDONALD A.M., JOHNSON P., KAPONDA A., OWOR M., SANGA H., BONSOR H.C., DARLING W.G., GOODDY D. Characteristics of high-intensity

- groundwater abstractions from weathered crystalline bedrock aquifers in East Africa. *Hydrogeol J.* v. 27, n. 459, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1836-9>
- MEDEIROS, W. E. de. *Eletro-resistividade aplicada à hidrogeologia do cristalino: um problema de modelamento bidimensional*. Dissertação de Mestrado, UFBA/PPPG, 162p, 1987. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1990.tb01707.x>
- MEDEIROS, W. E. de; LIMA, O.A.L. de. A geoelectrical investigation for ground water in crystalline terrains of Central Bahia, Brazil: *Ground Water*, 28: 518-523, 1990, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1990.tb01707.x>
- MEDEIROS, W.E. de; LIMA, O.A.L. de. Origem do potencial elétrico espontâneo em rochas cristalinas fraturadas e sua utilização na locação de poços. *Brazilian Journal of Geophysics*, [S.l.], v. 17, n. 2 e 3, p. 103-116, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X1999000200001>
- MOORE, D.L., STEWART, M.T. Geophysical signatures of fracture traces in a karst aquifer (Florida, U.S.A.), *Journal of Hydrology*, v. 61, n. 1-3, p. 325-340, 1983. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90256-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90256-1)
- NASCIMENTO DA SILVA, C.C., MEDEIROS, W.E. DE, JARDIM DE SÁ, E.F. XAVIER NETO, P. Resistivity and ground-penetrating radar images of fractures in a crystalline aquifer: a case study in Caiçara farm-NE Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, v. 56, n. 4, p. 295-307, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.08.001>
- PRABU, P., RAJAGOPALAN, B. Mapping of Lineaments for Groundwater Targeting and Sustainable Water Resource Management in Hard Rock Hydrogeological Environment Using RS- GIS, In: ZHANG, Y.; RAY, P. (eds.), *Climate change and regional/local responses*, IntechOpen, London, 2013. <https://doi.org/10.5772/55702>
- RODRIGUES, R. S., SILVA, C.D.A., LISBOA, L.H.D. Locações de poços em ambiente cristalino: da análise estrutural aos dados de eletroresistividade. Estudo de caso nos municípios de São Gonçalo do Amarante e Aratuba, Ceará. *Águas Subterrâneas*, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.28788>
- SÁ, H.S., ELIS, V.R. Aplicação de imageamento elétrico multi-eletrodos para auxílio na locação de perfuração de poços tubulares - estudo de casos em aquíferos fraturados. *Águas Subterrâneas*, 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.28738>
- SANTOS, F.G., PINÉO, T.R.G., MEDEIROS, V.C., SANTANA, J.S., MORAIS, D.M.F., VALE, J.A.R., Wanderley, A.A. *Mapa Geológico da Província Borborema*. Projeto Geologia e Potencial Mineral da Província Borborema. Escala 1:1.000.000. Recife: SGB/CPRM, 1 mapa, 2021. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22508>. Acesso em: 09 set. 2022.
- SIQUEIRA, L. *Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino*. Recife: Grupo de Trabalhos em Águas Subterrâneas - GTAS, Departamento de Recursos Naturais, DEN, SUDENE, relatório interno, 1963. 51p.
- SILVA, J.A. *Estruturas de acumulação de água subterrânea em rochas cristalina: estudo geofísico e geológico de casos no Estado do Rio Grande do Norte*. 100p. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000. <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18806>. Acesso em: 09 set. 2022.
- SINGHAL, B.B.S. E GUPTA, R.P. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. second ed., Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2008.
- SPIES, B.R., 1989. Depth of Investigation in Electromagnetic Sounding Methods. *Geophysics*, v. 54, p. 872-888, 2010. <https://doi.org/10.1190/1.1442716>
- SUR, T., ACHARYA, T. Filtering of hydraulically significant lineaments from lineament map of precambrian metamorphic terrain in NE India using set theory, *Groundwater for Sustainable Development*, v. 11, n. 100469, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100469>
- TAYLOR, R.G., SCANLON, B., DÖLL, P., RODELL, M., VAN BEEK, R., WADA, Y., LONGUEVERGNE, L., LEBLANC, M., FAMIGLIETTI, J.S., EDMUNDS, M., KONIKOW, L., GREEN, T.R., CHEN, J., TANIGUCHI, M., BIERKENS, M.F.P., MACDONALD, A., FAN, Y., MAXWELL, R.M., YECHIELI, Y., GURDAK, J.J., ALLEN, D.M., SHAMSUDDUHA, M., HISCOCK, K., YEH, P.-J.-F., HOLMAN, I., TREIDEL. Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, v. 3, p. 322-329, 2013. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>