

Um atípico modelo de acumulação de água subterrânea em terrenos cristalinos no semiárido: bolsão de intemperismo

An atypical model of groundwater storage in hard rock in semi-arid regions: a weathered compartment

Carlos César Nascimento da Silva¹, Walter Eugênio de Medeiros²,
Emanuel Ferraz Jardim de Sá³, Leandson Roberto Fernandes de Lucena⁴

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte- Brasil, cesar.nascimento@ufrn.br

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte- Brasil, walter.medeiros@ufrn.br

³Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte- Brasil, emanuel.sa@ufrn.br

⁴Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte- Brasil, leandson.lucena@ufrn.br

Recebido:

07 de julho de 2025

Recebido no formato de revisão:

04 de agosto de 2025

Aceito:

06 de agosto de 2025

Disponível online:

15 de agosto de 2025

Seção:

Artigos

Palavras-chave:

Água subterrânea.
Semiárido.
Cristalino.
Bolsão de intemperismo.
Eletrorresistividade.

Keywords:

Groundwater.
Semi-arid.
Hard rock.
Weathered compartment.
Electrical resistivity.

<https://doi.org/10.14295/ras.v39i2.30339>



RESUMO

A locação de poços em terrenos cristalinos localizados em região de clima semiárido obedece geralmente a dois modelos de acumulação de água subterrânea: o primeiro, tradicional, denominado de riacho-fenda, que associa drenagens estruturalmente controladas às feições frágeis; e o segundo, chamado de calha elúvio-aluvionar, que associa drenagens estruturalmente controladas às feições dúcteis. Ambos apresentam casos de sucesso em locações; porém, geralmente, resultam em poços com vazões relativamente baixas, da ordem de 2 a 3 m³/h. Na região da Lagoa do Bom Pasto, município de Serrinha, RN, local de substrato cristalino inserido em clima semiárido, há um histórico de poços perfurados desde a década de 1980 com vazões anormalmente elevadas, da ordem de 9 a 12 m³/h, com caso excepcional de 51,4 m³/h, ao longo de uma estrutura diagnosticada em campo como riacho-fenda. Diante das vazões incomuns dos poços ali perfurados perante as características geológicas e climáticas do local, a área tornou-se propícia à idealização de um modelo atípico de armazenamento de água subterrânea no meio fissural em clima semiárido. Para tanto, foi empregado o método geoeletrico integrado a técnicas geológicas de análise estrutural e de feições geomorfológicas do terreno permitindo identificar uma zona de alta condutividade ao longo de descontinuidades de natureza dúctil, denominado bolsão de intemperismo, conectado em subsuperfície ao modelo riacho-fenda. Este modelo, provavelmente não considerado durante o trabalho de locação, caracteriza-se, em profundidade, pela existência de uma pseudo-permosidade secundária gerada pela ação do intemperismo ao longo das anisotropias que compõem o bandamento gnáissico, capaz de incrementar positivamente a capacidade do reservatório de água subterrânea, subsidiando uma explicação alternativa para a ocorrência das vazões explotáveis anômalas locais.

ABSTRACT

Well siting in hard rock terrains within semi-arid regions typically follows two conceptual models of groundwater accumulation. The first, traditionally termed the fracture-controlled stream model, associates structurally controlled drainage networks with brittle structural features. The second, known as the eluvium-alluvium trough model, relates structurally controlled drainages to ductile deformation zones. Both models have demonstrated practical success in groundwater exploration; however, the resulting wells generally exhibit modest yields, typically ranging between 2 and 3 m³/h. In the Lagoa do Bom Pasto area, located in the rural zone of the municipality of Serrinha, Rio Grande do Norte (NE Brazil), within a semi-arid climate and hard rock basement setting, historical records since the 1980s have documented anomalously high well yields, commonly between 9 and 12 m³/h, and an exceptional case reaching 51.4 m³/h. These wells were sited along a structure interpreted in the field as a fracture-controlled stream model. Given the discrepancy between the observed high yields and the expected hydraulic performance in such geological and climatic settings, the area was selected for the development of an alternative conceptual model of groundwater storage in hard rock media under semi-arid conditions. An integrated approach combining geoelectrical surveys, structural geological analysis, and geomorphological mapping enabled the identification of a high-conductivity zone along ductile structural discontinuity. This zone, herein referred to as a weathering compartment, is hydraulically connected in the subsurface to the fracture-controlled stream model. This conceptual model, likely not considered during the original siting efforts, is characterized at depth by the development of pseudo-secondary permo-porosity resulting from weathering processes acting along anisotropic planes associated with gneissic banding. These processes significantly enhance the effective storage capacity of the aquifer, providing an alternative explanation for the anomalously high well yields recorded in the area.

1. INTRODUÇÃO

Em ambiente geológico de rochas cristalinas, de origens ígnea ou metamórfica, em função de sua porosidade primária intergranular desprezível, o armazenamento da água subterrânea se dá essencialmente ao longo das descontinuidades existentes (SINGHAL; GUPTA, 2008). Estas descontinuidades representam anisotropias no substrato geológico, geralmente com geometrias planares, formadas concomitantes ou posteriores ao processo de cristalização da rocha (Fossen, 2010).

Neste contexto, dentre outros elementos, podem ser destacados dois essenciais ao armazenamento e à retenção da água subterrânea durante longos períodos (JARDIM DE SÁ, ET AL. 2008): (a) feições dúcteis, originadas por processos tectônicos e metamorfismo da rocha, em níveis crustais relativamente profundos, associados a condições de elevadas pressão e temperatura, formando diversas estruturas, tais como bandamentos e xistosidades; e (b) feições frágeis, geradas por esforços tectônicos posteriores à formação da rocha, em níveis crustais relativamente rasos, associados a baixas temperaturas e pequenas cargas litostáticas, envolvendo, sobretudo, falhas e fraturas. Destaca-se, ainda, que é possível (e relativamente comum) a coexistência das feições dúcteis e frágeis na mesma rocha, indicando a evolução geológica de uma região que foi afetada por pulsos tectônicos em diferentes níveis crustais até a atual conformação do terreno (FOSSEN, 2010).

Do ponto de vista de prospecção de água subterrânea, estas feições, geralmente planares, tanto dúcteis quanto frágeis, apresentam geometria complexa, geralmente envolvendo mergulhos com intensidades e *trends* variáveis, dimensões e continuidades diversificadas e distintos graus de (inter)conectividade. Em profundidade, dentre diversos parâmetros, a capacidade de servir como reservatório é ditada pelo volume de vazios, apresentando, também, relação direta com a carga litostática acima do nível de interesse, fazendo com que a descontinuidade normalmente apresente uma relação inversamente proporcional entre profundidade e capacidade de armazenamento. Os critérios de locação de poços ao longo do modelo riacho-fenda envolvem a identificação das fraturas e o seu mergulho, na tentativa de localizar aquelas mais promissoras, saturadas em água (MEDEIROS E LIMA, 1990; MEDEIROS, 1987). Ao longo do modelo calha alúvio-aluvionar, deve-se considerar, também, a contribuição dos sedimentos inconsolidados sotopostos às rochas do embasamento (SILVA, 2000).

Em terrenos cristalinos, com base na análise da rede de drenagem, pode-se inferir a direção das anisotropias presentes no substrato, muito embora ainda seja ambíguo, ao menos relativamente e sem o trabalho sistemático de campo, distinguir se a feição que controla o curso local d'água local terá natureza dúctil ou frágil. Christofolletti (1980) indica que a rede de drenagem é afetada por diversos fatores, incluindo clima e litologia, porém ditado principalmente pela estruturação geológica, provocando assimetria na bacia de drenagem ou ainda, a mudança brusca de seu padrão. Do ponto de vista geométrico, a rede de drenagem pode ser classificada em diferentes categorias (CHRISTOFOLETTI 1980, SUGIUIO; BIGARELLA, 1990, STEVAUX, ET AL. 2017). Dentre estas, a drenagem retangular, comumente observada em terrenos cristalinos, caracteriza-se por seu aspecto ortogonal, normalmente associada a mudanças bruscas em ângulo reto nos cursos fluviais, tanto principais quanto tributários, obedecendo às direções das principais estruturas dúcteis e frágeis no substrato rochoso.

Neste cenário de drenagem estruturalmente controlada, dois modelos clássicos de acumulação de água subterrânea foram concebidos. O primeiro, denominado riacho-fenda (SIQUEIRA, 1963), que associa trechos retilíneos de drenagens à direção da estruturação frágil do substrato rochoso (Figura 1a). Por sua vez, ao controle da drenagem por feições dúcteis (SILVA 2000, SILVA ET AL., 2023), foi nominado o modelo calha alúvio-aluvionar (Figura 1b). Salienta-se que, a partir da análise puramente de dados de sensores orbitais ou de elementos da paisagem e, principalmente, na ausência de afloramentos em campo que indiquem a direção predominante do que é dúctil ou frágil, é praticamente impossível distinguir entre ambos os modelos. Esta característica é evidenciada na Figura 1, a qual utiliza da mesma imagem no plano horizontal, na forma de mapa, para ilustrar ambos os modelos, riacho-fenda (Figura 1a) e calha alúvio-aluvionar (Figura 1b), orientados segundo uma fictícia rede de drenagem estruturalmente controlada, preferencialmente na direção N-S, com tributários E-W. Critérios de locação de poços produtivos ao longo destes modelos também são distintos, envolvendo a identificação no substrato geológico das descontinuidades saturadas em água, evidenciadas pelas posições sinalizadas pelas setas azuis na Figura 1; setas vermelhas indicam locações de poços improdutivos.

Feitosa e Diniz (2011) executaram um trabalho extensivo na análise de poços perfurados em terrenos cristalinos no Nordeste Brasileiro indicando que as vazões medidas obedecem a uma distribuição *log*-normal, com medianas da ordem de 1 a 2 m³/h. De certa forma, estes valores representam vazões modestas, ao menos quando comparadas a poços perfurados em rochas sedimentares. Contudo, há regiões no semiárido que apresentam poços perfurados em terrenos cristalinos com vazões significativamente anômalas, da ordem de 9 m³/h, 12 m³/h, 16 m³/h, até caso extremo de poço produtor de 51,4 m³/h. Estas vazões diferenciadas, relativamente consistentes durante o período de bombeamento durante longos períodos (meses a anos), podem indicar um modo atípico de armazenamento de água no substrato, ao menos para as condições climáticas de precipitações médias e de evapotranspiração em regiões de clima semiárido, a exemplo da área de estudo.

Nascimento da Silva (2004) e Jardim de Sá et al. (2008) propuseram o modelo bolsões de intemperismo (previamente discutido por Siqueira 1967) para tratar da influência da abertura de planos de anisotropia por ação do intemperismo, que poderia ser induzida, também, por processos de descompressão litostática provocada por alívio de carga em função da exumação ou denudação do terreno, sobretudo ao longo de anisotropias no substrato de baixo ângulo de mergulho. Jardim de Sá et al. (2008) confirmam a propagação desses processos intempéricos em profundidade a partir de observações *in loco* de exposições rochosas em minas profundas, por exemplo.

Dentre os aspectos para a eficácia do modelo bolsões de intemperismo na produtividade de poços com vazões anormalmente elevadas, há a necessidade de uma pseudo permo-porosidade intergranular, capaz de armazenar e reter expressivos volumes de água, além de uma franca condição de reabastecimento do meio aquífero fissural a partir de zonas de recarga em superfície. Um aspecto importante e crucial para este modelo é que não há, necessariamente, indícios de sua ocorrência na superfície do terreno. A sua descoberta poderia se dar a partir da existência de poços com vazões anômalas e/ou, de forma indireta, pelo imageamento do substrato a partir de técnicas geofísicas.

A região da Lagoa do Bom Pasto (Figura 2), situada a noroeste da sede municipal de Serrinha, RN, apresenta um histórico de locações de poços perfurados desde a década de 1980 com altíssimas produtividades, incluindo o poço com maior vazão, à época da perfuração, em todo o Estado, com significativos 51,4 m³/h. Estas informações foram obtidas e catalogadas com base nas fichas de locação dos poços ali existentes, executadas por profissionais da extinta Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais do Rio Grande do Norte (CDM-RN). Essa região em específico, disponível às análises geológica e geofísica aqui apresentadas, tornaram o local propício à avaliação do substrato rochoso com vistas à validação do modelo de armazenamento de água subterrânea aqui tratado.

O objetivo dessa pesquisa visa analisar as características geológicas e geofísicas de uma região no Município de Serrinha, RN, que apresenta histórico de poços perfurados em ambiente de rochas cristalinas e que ostentam vazões anormalmente elevadas para uma região de clima semiárido. Os poços ali perfurados foram locados desde a década de 1980 com base, essencialmente, no modelo de acumulação de água subterrânea em terrenos cristalinos riacho-fenda, que associa o curso da drenagem local a feições estruturais frágeis, conforme reportado. De posse dos dados coletados, análises realizadas e trabalho multidisciplinar integrado, principalmente no que tange à análise de produtos de sensores remotos e da interpretação de dados geológicos e geofísicos, pretende-se expor uma situação particular e atípica na caracterização de modelo de acumulação de água subterrânea em terreno cristalino no semiárido nordestino. Este modelo, por sua vez, pode explicar a anomalia positiva de vazão dos poços ali existentes, servindo, também, de estudo de caso para outras situações que porventura ocorram, mesmo se tratando em região de clima semiárido, o qual, ao menos em teoria, não propicia a ocorrência de mantos de intemperismo significativos, sobretudo em profundidade.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de trabalho (Figura 3) está situada na Província Borborema (ALMEIDA ET AL. 1977; ALMEIDA ET AL. 1981), caracterizada geologicamente por uma complexa herança tectono-metamórfica ao longo do tempo, incluindo extensas zonas de cisalhamento que delimitam terrenos alóctones que foram aglutinados durante a formação do Supercontinente Gondwana (BRITO NEVES ET AL. 2014). A Província Borborema inclui diversos domínios geológicos, dentre os quais o São José de Campestre, evidenciado em campo por um embasamento cristalino de idade arqueira a paleoproterozoica, associado a intrusões neoproterozoicas e cenozoicas.

Especificamente ao Domínio São José de Campestre, a área de estudo (Figura 3, modificada de Roig e Dantas, 2013) engloba essencialmente o núcleo Paleoproterozoico, denominado de Complexo Serrinha-Pedro Velho, incluindo migmatitos e rochas gnáissicas de diferentes naturezas. Do ponto de vista estrutural, a área é dominada por um *trend* dúctil NNE, com mergulho intermediário para SE, além de feições de natureza frágil com *trend* preferencial NNW, geralmente subverticalizado, em alto ângulo azimutal com o *trend* dúctil (LIMA, 2002).

Dados geofísicos magnéticos aeroportados levantados na área dão suporte à definição do *trend* dúctil NNE na área trabalhada (NASCIMENTO DA SILVA, 2004; NASCIMENTO DA SILVA, ET AL., 2023), mesmo em regiões onde há capeamentos sedimentares expressivos que mascaram os afloramentos. Localmente, a estruturação de natureza rúptil NW controla a rede de drenagem local (Figuras 2 e 3), segundo a qual os poços foram locados e perfurados na região da Lagoa do Bom Pasto, bem como os trabalhos de naturezas geológico e geofísica tiveram foco.

Os aspectos fisiográficos do Município de Serrinha se caracterizam pelo clima semiárido quente (BSh), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, com estação chuvosa predominantemente durante o outono, apresentando médias anuais de aproximadamente 903 mm. As águas subterrâneas armazenadas no meio aquífero fissural são classificadas como salobras a salgadas, com valores médios de sólidos totais dissolvidos de 3200 mg/l, baseadas ao longo de aproximadamente 90 % dos poços amostrados, de um total de 43 (CPRM, 2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos de trabalho empregados tiveram natureza multidisciplinar e foram empregados de forma integrada entre si, envolvendo o sensoriamento remoto, aspectos geológicos e levantamentos geofísicos.

O primeiro, relacionado à análise de produtos de sensores remotos, principalmente imagens de satélite de diferentes períodos, teve direcionamento à definição do padrão da rede de drenagem local, bem como na identificação das zonas homólogas capazes de estabelecer uma relação direta com as informações disponibilizadas pelo mapeamento geológico da área (LIMA 2002, ROIG E DANTAS, 2013). Para estes fins, foi utilizado o software livre QGIS, versão 3.42.2 (QGIS, 2025), que representa uma multiplataforma de sistema de informação geográfica a qual possibilita a análise integrada e completamente georreferenciada de inúmeros dados espaciais, possibilitando a criação de mapas multicamadas conforme a necessidade do usuário. O QGIS possibilita, ainda, o processamento básico das imagens, manipulando-as de diferentes formas de modo a realçar feições de interesse a partir do uso de filtros e ganhos pré-estabelecidos, ou ainda, processamentos mais elaborados com base em *plugins* que podem ser instalados de acordo com a demanda.

A análise geológica foi realizada de forma a estabelecer uma relação entre litologia identificada em campo, bem como a correlação entre feições de naturezas dúctil (bandamento gnáissico) e frágil (falhas e fraturas) no substrato com o próprio padrão da rede de drenagem interpretada a partir dos produtos de sensores orbitais. Desta forma, permitiu-se validar se o modelo de acúmulo e retenção de água subterrânea localmente era do tipo riacho-fenda ou calha elúvio-aluvionar, muito embora as vazões dos poços ali existentes sinalizassem uma situação específica, provavelmente aditiva aos modelos elencados.

Para o imageamento do substrato, foi utilizado o método geofísico da eletrorresistividade. O procedimento da obtenção de dados geofísicos foi iniciado com a locação em campo de pontos para a execução de sondagens elétricas verticais (SEV's), segundo o arranjo de eletrodos Schlumberger, contemplando estações de leituras equidistantes a 20 m entre si, de forma a contemplarem, por processo posterior de interpolação de dados, uma seção geofísica SW-NE, aproximadamente transversal à direção principal da drenagem (vide localização nas Figuras 3 e 4).

O equipamento utilizado foi o Terrameter SAS 1000, monocanal, que permitiu realizar SEV's com abertura de eletrodos de corrente variando de 4 a 200 m. Os dados geoeletricos foram processados no software IPI2Win, versão 7.01.03 (BOBACHEV ET AL. 2000), o qual permite, de forma bastante intuitiva, a visualização dos dados na forma 1D, da seção geoeletrica composta e interpolada entre SEV's, bem como possibilita o processo de inversão unidimensional, fornecendo informações de resistividade e espessura de camadas para cada SEV de forma individualizada.

Apesar da natureza geológica do terreno cristalino apresentar ampla variação lateral em suas propriedades físicas, para cada modelo de SEV isoladamente, durante o processo de inversão, foi considerado um substrato eletricamente homogêneo e isotrópico, com interfaces planas e horizontais. Ao longo deste processo, pôde-se justapor as SEV's lateralmente, compondo, assim, uma pseudoseção geoeletrica para a área levantada. De forma adicional, os dados de SEV foram tratados e interpolados no software *Surfer for Windows*, permitindo gerar uma seção geoeletrica, embora com informação de abertura de eletrodos ao longo da dimensão vertical, representando uma imagem condizente ao esperado, tanto do ponto de vista geológico quanto hidrogeológico para a área, conforme ilustrado mais adiante.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Os dados obtidos, devidamente processados conforme as boas práticas das áreas da geologia e da geofísica, tornaram possível entender o modo de acúmulo e retenção de água subterrânea localmente, indicando uma explicação plausível e consistente para a alta produtividade dos poços perfurados na área de trabalho.

4.1. Aspectos geológicos e rede de drenagem

A região trabalhada é composta por embasamento cristalino representada por gnaisses de natureza ortoderivada, além de migmatitos, que apresentam *trend* dúctil ao longo da direção predominante NNE com mergulho para SE nas partes central e oeste, invertendo o mergulho para NW nas partes central e leste (Figura 3). Nesta última região, o *trend* dúctil verte para E-W, com mergulho suave a intermediário para norte (Figura 3).

As feições dúcteis, em campo, são representadas pelo bandamento gnáissico, o qual caracteriza-se pela alternância de bandas félsicas e máficas, por vezes obliteradas quase que completamente em decorrência de processos de migmatização gerados em níveis crustais profundos, sob ação de altas condições de pressão e temperatura. Feições de natureza rúptil, na forma de fraturas com cinemática indistinta podem ser observadas paralelamente à trama dúctil do embasamento, com mergulhos suaves. A trama frágil principal se dá por fraturas subverticalizadas na direção predominante NW, por vezes gerando vales relativamente incisivos na paisagem e de longa extensão, da ordem de alguns quilômetros. Em geral, a cinemática para essas fraturas é sinistral.

Estes padrões estruturais, dúctil e frágil, nitidamente controlam a rede de drenagem em um padrão retangular, conforme teorizado por Christofolletti (1980). Imagens de sensores orbitais, a exemplo daquela ilustrada na Figura 2, mostram a interpretação dos cursos d'água intermitentes (linhas azuis) ao longo da direção NNE a E-W, controlados pelo *trend* estrutural dúctil. Na direção transversal, NW, trechos de drenagens são controlados pelas feições frágeis (Figuras 2 e 3). Comumente, podem ser visualizados interseções de drenagens fazendo ângulo reto entre si, evidenciando que ora a drenagem flui ao longo do *trend* dúctil, ora flui ao longo do *trend* frágil. Lagoas, a exemplo daquela que foi alvo do trabalho geofísico de campo, também podem ser visualizadas de forma alinhada na direção NW.

Em linhas gerais e de posse das características conceituais dos modelos de armazenamento de água subterrânea em terrenos cristalinos, interpreta-se que drenagens ao longo das direções NNE e E-W contemplam, em sua maioria, modelos calha elúvio-aluvionar. De forma análoga, na área, drenagens fluindo ao longo da direção NW ilustram o modelo riacho-fenda. Evidentemente, estas relações podem mudar localmente em função da variação angular dos *trends* das feições dúcteis e frágeis, bem como em função de aspectos de outras naturezas, que não estruturais, tais como relevo, reologia ou mesmo, ações antrópicas.

4.2. Dados geoeletricos

A Figura 4 ilustra todos os dados de campo obtidos pelas SEV's por meio de gráficos bi-logarítmicos posicionando, para cada caso, valores correspondentes a metade da distância da abertura dos eletrodos de corrente ($AB/2$, em metros) no eixo horizontal, enquanto os valores da resistividade aparentes são representados no eixo vertical (em Ohm.m). Para cada SEV, a sua posição no terreno está discriminada na porção superior esquerda do respectivo gráfico bi-log, estando, no terreno, a estação -160 m na extremidade SW da seção geoeletrica e a 160 m, no extremo NE (Figuras 2 e 3).

Para auxiliar na visualização e interpretação dos dados pelo leitor, ciclos logarítmicos únicos têm a mesma dimensão em X ou Y, apesar do eixo Y contemplar três ciclos, em função da maior variação dos valores de resistividade aparente, quando comparados aos valores de $AB/2$, cujos valores abrangem somente dois ciclos.

Sobrepostos aos dados de cada SEV, na forma de polígonos coloridos, estão representados os modelos inversos de "espessura vs. resistividades", incluindo a curva de ajuste dos dados ao modelo de parâmetros estimados, os quais estão concatenados na pseudo-seção geoeétrica, representada na parte inferior direita da Figura 4.

Analisando a seção geoeétrica em setores, verifica-se que no extremo SW (estações SEV's -160 e -140 m), valores de resistividade aparente indicam uma camada extremamente delgada na superfície, de alta condutividade, seguida, em profundidade, de um embasamento resistivo. Já na região de abrangência da Lagoa do Bom Pasto, delimitada entre as estações -120 e 20 m (compare com o disposto espacialmente nas Figuras 2 e 3), é possível observar um meio extremamente condutivo, de maior espessura, ao topo, seguido de um embasamento relativamente resistivo. Contudo, em ambas as bordas da Lagoa (borda SW na estação -120 m e borda NE na estação 20 m), há indício de substrato relativamente mais condutivo em níveis mais profundos. Esta característica se torna mais evidente na estação -40 m.

Estas feições indicam, de forma interpretativa, a presença em profundidade de zonas saturadas em água preenchendo fraturas, as quais, por sua vez, controlam a direção NW da drenagem local, ao longo da qual a Lagoa encontra-se implantada. Esta análise é importante para comprovar a presença do modelo riacho-fenda localmente, ao longo do qual poços foram locados e perfurados.

Contudo, na porção NE da seção elétrica, já sem a influência dos sedimentos saturados em água que ocorrem sob a Lagoa do Bom Pasto, há um meio de alta condutividade limitado no topo e na base por meios de altas resistividades. Observe estes aspectos tanto ao longo dos gráficos *bi-log* das estações SEV's de 40 a 160 m, como na pseudoseção na parte inferior da Figura 4. Esta feição, representando uma feição condutiva, aproximadamente horizontal, de relativa espessura (da ordem de 10 m quando da análise do modelo de parâmetros estimados) indica, de forma interpretativa, a presença de material saturado em água ao longo do próprio bandamento gnáissico, o qual, neste corte SW-NE, é visualizado com mergulho aparente próximo ao horizontal.

De forma complementar, os dados geoeétricos das SEV's foram dispostos ao longo de uma seção geoeétrica não invertida, com eixo vertical representando os valores de $AB/2$ (em metros), ilustrada pela Figura 5. O processo de interpolação dos dados que foi executado, resultando nesta seção geoeétrica, atesta a interpretação das SEV's isoladamente (Figura 4), além de realçar as seguintes feições: (a) a região da Lagoa do Bom Pasto, entre as estações -120 e 20 m, a partir da zona condutiva (cores frias) com linhas de isoresistividade aparente aproximadamente horizontais, apresentando em suas bordas e centro (estações -120 m, -60 m e 0 m) feições condutivas subverticalizadas indicando zonas de falhas ou de fraturas saturadas em água; (b) a borda SW, a partir da variação lateral da resistividade aparente na estação -120 m (condutivo a NE e resistivo a SW) evidencia a transição abrupta, do ponto de vista de condutividade, indicando substrato geológico afetado por fraturas subverticalizadas que se encontram saturadas em água.

Estas feições geoeétricas indicam o esperado para o imageamento de um modelo de acumulação de água subterrânea do tipo riacho-fenda e com potencial exploratório satisfatório. À exemplo do exposto na Figura 4, agora mais realçada ainda, observa-se na seção geoeétrica da Figura 5, uma anomalia de condutividade extremamente expressiva, contrastante em geometria com as outras anomalias de condutividade, estas subverticalizadas, que se encontra imersa em meio resistivo (no topo e na base) entre as estações 40 e 160 m, com mergulho aproximadamente subhorizontal. Há uma nítida conectividade entre a feição condutiva subhorizontal com as anomalias associadas ao próprio modelo riacho-fenda, através da posição indicada pelo cruzamento da estação 20m e $AB/2$ de 50m. Salienta-se que não há expressão desta feição condutiva subhorizontal na superfície. A esta feição, presume-se a presença de um expressivo grau de alteração de anisotropias do embasamento cristalino, notadamente o bandamento gnáissico, gerando uma pseudo-porosidade capaz de armazenar água em profundidade, alimentando de forma autônoma o próprio modelo riacho-fenda imageado a SW e, também, retroalimentada em períodos sazonais, nominada de bolsão de intemperismo.

Para melhor ilustrar a interpretação e expressividade do modelo bolsões de intemperismo, a Figura 6, foi gerada na forma de blocos diagramas esquemáticos compostos por elementos reais da área estudada, tanto na ótica da geofísica, quanto na geológica e de produtos de sensores orbitais. A Figura 6a superpõe a imagem de satélite da área da Lagoa do Bom Pasto, orientada segundo a drenagem estruturalmente controlada de direção NW-SE, indicando o modelo riacho-fenda em potencial, atestado tanto a partir de poços produtivos, quanto pelas anomalias de condutividade subverticalizadas e dados geológicos de superfície.

As suas bordas NW e SE apresentam anomalias condutivas de alto ângulo indicando o esperado para o modelo riacho-fenda, a partir da resposta geolétrica de zonas de fraturas saturadas em água. Por sua vez, a resposta geofísica do modelo bolsão de intemperismo, provavelmente responsável pelo fornecimento anômalo de água aos poços de relativa alta vazão situados na área, se dá em profundidade, do ponto de vista geofísico, pela anomalia de condutividade de geometria planar subhorizontal. Lateralmente, ao longo do plano vertical de orientação SE-NW, na borda do bloco diagrama da Figura 6a, imagina-se, de forma puramente interpretativa, que o bolsão de intemperismo venha a acompanhar o mergulho local do bandamento gnáissico.

A conectividade do modelo bolsão de intemperismo ao modelo riacho-fenda pode ser ilustrada, também, a partir do bloco interpretativo da Figura 6b. Nesta figura, fraturas subverticalizadas saturadas em água limitam as bordas SW e NE da Lagoa do Bom Pasto, indicando o modelo riacho-fenda a partir do controle frágil NW-SE da rede de drenagem local.

Por fim, a Figura 6c representa as feições estruturais isoladas e enfatizadas sem o arcabouço litológico, o qual foi propositalmente removido. Nesta ilustração, estão realçados: (a) os planos de falha (em vermelho) que compõem o próprio modelo riacho-fenda; (b) o bandamento gnáissico (em cinza) indicando o mergulho verdadeiro para SE, porém, com mergulho aparente subhorizontal no plano SW-NE, o qual representa a seção geolétrica e (c) as zonas saturadas em água (em azul) contemplando as anisotropias estruturais frágeis ao longo do modelo riacho-fenda e a pseudo porosidade intergranular gerada ao longo do bandamento gnáissico alterado.

5. DISCUSSÃO

Tradicionalmente, em função da geometria das anisotropias presentes em terrenos cristalinos em região de clima semiárido, há dois modelos clássicos utilizados para a locação de poços para água subterrânea: riacho-fenda e calha elúvio-aluvionar. Apesar de ambos apresentarem a semelhança de estarem associados a cursos de drenagens estruturalmente controladas, eles diferem entre si em seus critérios de locação uma vez que um encontra-se associado a feições frágeis e o outro, a dúcteis.

A própria natureza e geometria das discontinuidades geram critérios distintos. Contudo, em função dos fatores climáticos do semiárido, a formação de mantos intempéricos expressivos não é favorecida, os quais seriam capazes de promover condições permo-porosas que incrementam a dimensão do reservatório em subsuperfície, à exemplo de outras regiões de clima mais úmido. Com isto, poços de alta vazão (superiores a 9 m³/h) são raros. Na região estudada, na Lagoa do Bom Pasto, embora em região de clima semiárido, há uma anomalia positiva considerável quanto à vazão dos poços lá existentes, muito embora os critérios de locação utilizados presumissem a presença única e tão somente do modelo riacho-fenda.

Como o modelo bolsões de intemperismo aqui discutido não apresenta, necessariamente, exposição na superfície e a sua existência no clima da área é controversa, havia a necessidade de comprovação através de técnicas de imageamento do substrato. Levantamentos geofísicos, notadamente os geolétricos, já têm a sua eficácia comprovada neste ambiente geológico, tanto no que tange à profundidade de investigação dos poços a serem perfurados (da ordem máxima de 60 m), como nas resoluções vertical e horizontal dos dados resultantes, a partir, geralmente, de anomalias de condutividade.

Apesar da rotina de trabalho do geofísico atualmente fazer uso de equipamentos robustos, multicanais e multiarranjos de eletrodos, a técnica de levantamento a partir de SEV's ainda permanece eficiente, sobretudo quando trabalhada em uma margem de segurança, com parametrizações de aquisição compatíveis às características do alvo a ser prospectado e, principalmente, fazendo uso de outros dados, não somente geofísicos, capazes de

mitigar a ambiguidade interpretativa. Neste caso em específico, trabalhos prévios de cunho geológico-estrutural, bem como a análise detalhada de produtos de sensores orbitais.

Entende-se, contudo, que a comprovação de tal modelo precisa de uma análise mais precisa, principalmente no que tange à perfuração de poços ao longo das anomalias geofísicas observadas relacionadas ao modelo bolsão de intemperismo. Entretanto, dados de vazão de poços, em teoria, incompatíveis com os modelos tradicionais de locação no ambiente estudado, bem como a própria análise do imageamento, condiz para uma realidade atípica de armazenamento de água subterrânea em terrenos cristalinos, robusta o suficiente para ser explicada com base nos critérios geológicos e geofísicos até aqui discutidos. Ademais, o grau de conectividade entre ambos os modelos, riacho-fenda e bolsão de intemperismo, favorecido com a zona de recarga promovida sazonalmente pelo próprio curso da drenagem e coberturas sedimentares localizadas, permite a coexistência deste complexo meio aquífero e favorece a sua permanência ao longo do tempo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A região da Lagoa do Bom Pasto apresenta histórico de locação de poços em terrenos cristalinos com vazões anômalas para regiões de clima semiárido, dificilmente explicadas com base nos modelos tradicionais de locação riacho-fenda ou calha elúvio-aluvionar. O mapeamento geológico da área identificou rochas gnáissicas e migmatitos com bandamento ao longo do *trend* NNE, enquanto zonas de fraturas subverticalizadas apresentam direção predominante NW.

A análise de produtos de sensores orbitais, principalmente imagens de satélite manipuladas para realçar a rede de drenagem, indicaram um padrão retangular para a área, ressaltando o controle estrutural dos cursos d'água ora pelo *trend* dúctil (NNE a E-W), ora pelo *trend* frágil (NW).

Aquisições geoeletricas devidamente parametrizadas, executadas ao longo de SEV's dispostas em campo de modo a compor uma seção geoeletrica transversal ao modelo riacho-fenda da Lagoa do Bom Pasto comprovaram a existência por via da identificação de fraturas subverticalizadas controlando o curso da drenagem, por vezes saturadas em água, evidenciadas, no dado geofísico, por zonas condutivas de alto ângulo de mergulho definindo as bordas da estrutura. O traço do bandamento de mergulho aparente subhorizontal também foi imageado, denotado pelas respectivas linhas de iso-resistividade aparente de baixo ângulo visualizadas na seção geoeletrica.

Uma anomalia expressiva de condutividade e espessura considerável, subhorizontalizada, paralela ao traço do bandamento gnáissico, imersa em ambiente de alta resistividade (no topo e na base) indica uma zona com pseudo-permo-porosidade acentuada, de forma semelhante ao que ocorre em rochas sedimentares. Neste caso, a pseudo-permo-porosidade indica a "abertura" do próprio bandamento gnáissico, intensificado pelo intemperismo, associado ou não a outras estruturas, sendo capaz de incrementar positivamente as zonas de fraturas associadas ao modelo riacho-fenda, segundo as quais os poços foram locados, explicando, desta forma, a vazão anômala dos poços ali existentes.

A análise e interpretações aqui apresentadas podem, além de fornecer uma explicação plausível ao caso de estudo, ser ampliada para outras situações que compartilham de características geológicas e hidrogeológicas semelhantes. Além disto, as características do modelo bolsão de intemperismo ilustram um caso de necessidade e importância no uso de técnicas geofísicas previamente ao trabalho de locação de poços, permitindo o imageamento de feições geológicas que não apresentam reflexo em superfície, somente podendo ser descobertas de forma prévia à perfuração de poços através destas técnicas não invasivas. Indica, também, a necessidade do trabalho integrado e multidisciplinar para mitigar a ambiguidade interpretativa e, desta forma, minimizar o risco exploratório na exploração de recursos hídricos subterrâneos em terrenos cristalinos, caracterizados, sobretudo, por suas heterogeneidade e anisotropia.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; NEVES, B. B. B.; FUCK R. A. Províncias Estruturais Brasileiras. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE*, 8., Anais [...], Campina Grande, Atas. Recife, PE, SBG, Núcleo Nordeste, 363-392, 1977.
- ALMEIDA, F.F. M.; HASUI, Y.; NEVES, B. B. N.; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews*, v. 17, n. 1-2, p. 1-29, 1981. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)
- BOBACHEV A. A.; MODIN I. N.; SHEVNIN, V. A. *IPI2Win v. 2.1, IPI_RES2, IPI_RES3, User's Guide*. Geoscan-M Ltd. Moscow. Russia, 2000.
- NEVES, B. B. B.; FUCK, R. A.; PIMENTEL, M. M. The Brasiliano collage in South America: a review. *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 3, 2014, p. 493-518. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400030010>
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 188p, 1980. ISBN 9788521217572
- CPRM. *Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Serrinha, Estado do Rio Grande do Norte*. Organização: MASCARENHAS, J. C.; BELTRÃO, B. A.; SOUZA JUNIOR, L. C.; PIRES, S. T. M.; ROCHA, D. E. G. A.; CARVALHO, V. G. D. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. DOI: <https://doi.org/10.5327/z1679443520190385>
- FEITOSA, F. A. C.; DINIZ, J. A. O. Água subterrânea no cristalino da região semiárida brasileira. Águas Subterrâneas. *In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO*, 2., 2011. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28026>. Acesso em: 05/ago/2025.
- FOSSEN, H. *Structural Geology*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 463. 2010 DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511777806>
- JARDIM DE SÁ, E. F.; SILVA, C.C; CORIOLANO, A. C.; MEDEIROS, W. E. 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*. 3 ed. Rio de Janeiro, CPRM, 2008, p. 97-120. DOI: <https://doi.org/10.11606/d.14.2019.tde-25052018-150315>
- 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, 81 p., 2002. DOI: <https://doi.org/10.11606/d.44.2023.tde-16012024-101310>
- MEDEIROS, W. E. de. *Eletro-resistividade aplicada à hidrogeologia do cristalino: um problema de modelamento bidimensional*. 1987. 162 f. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1987. DOI: <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, Groundwater, v. 28, n. 4., p. 518-523, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1990.tb01707.x>
- SILVA, C. C. Caracterização geológica-geofísica do meio aquífero fissural: uma contribuição aos modelos de fluxo e armazenamento de água subterrânea. 2004. 179 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004. DOI: <https://doi.org/10.22239/2317-269x.01743>
- SILVA, C. C.; MEDEIROS, W. E.; JARDIM DE SÁ, E. F.; LIMA, M. G. O aquífero fissural no semiárido: análise de modelos com base em dados geológico-estruturais e métodos geofísicos aeroportados e terrestre. *Águas Subterrâneas*, v. 37, n. 2, e-30197, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v37i2.30197>
- QGIS Development Team. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. 2025. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 05/ago/2025.
- ROIG, H. L.; DANTAS, E. L. *Folha SB.25-Y-A-I São José do Campestre*: carta geológica - escala 1:100.000. [Brasília]: CPRM, 2013. 1 mapa, color. Escala 1:100.000. <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/17669>
- SILVA, J. A.; MEDEIROS, W. E.; JARDIM DE SÁ, E. F.; SILVA, C. C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. G.; SILVA, I. D. R. Ensaio geofísicos em um aquífero fissural do tipo calha elúvio-aluvionar. *Águas Subterrâneas*, v. 37, n. 3, e-30236, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v37i3.30236>
- SILVA, J. A. Estruturas de acumulação de água subterrânea em rochas cristalinas: 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: 25 jul. 2025.

SINGHAL, B. B. S.; GUPTA, R. P. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. 2 ed. [S.l.]: Springer Dordrecht, 20084. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8799-7>

SIQUEIRA, L. *Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino*. Recife: Grupo de Trabalhos em Águas Subterrâneas, 1963. 51 p. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v9i1.11263>

SIQUEIRA, Luís. *Contribuição da geologia à pesquisa de água subterrânea no cristalino*. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste, 1963.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. *Ambientes fluviais*. 2 ed. Florianópolis, Editora da UFSC, Editora UFPR, 1990. 183p.

STEVANUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M.; MENDONÇA, F. A. *Geomorfologia fluvial*. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 1 recurso online. (Geografia).

FIGURAS

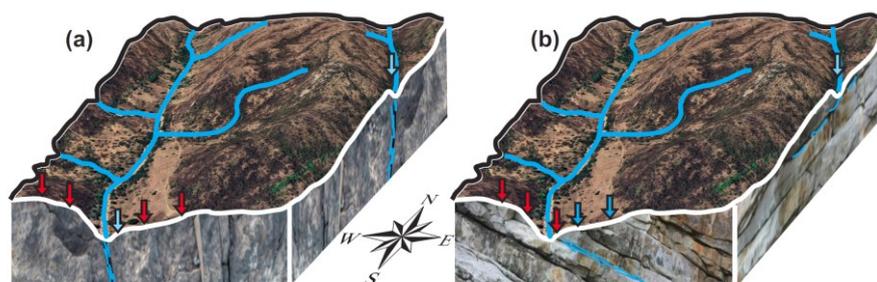


Figura 1. Modelos clássicos de armazenamento de água subterrânea em terrenos cristalinos: (a) riacho-fenda (modificado de SIQUEIRA, 1963) e (b) calha elúvio-aluvionar (modificado de SILVA 2000). Em ambos os casos, a imagem na dimensão em mapa é a mesma, indicando que a drenagem estruturalmente controlada N-S não permite distinguir se o substrato é afetado por feição frágil (a) ou dúctil (b). Setas azuis representam locais de poços produtivos; vermelhas, indicam poços improdutivos.

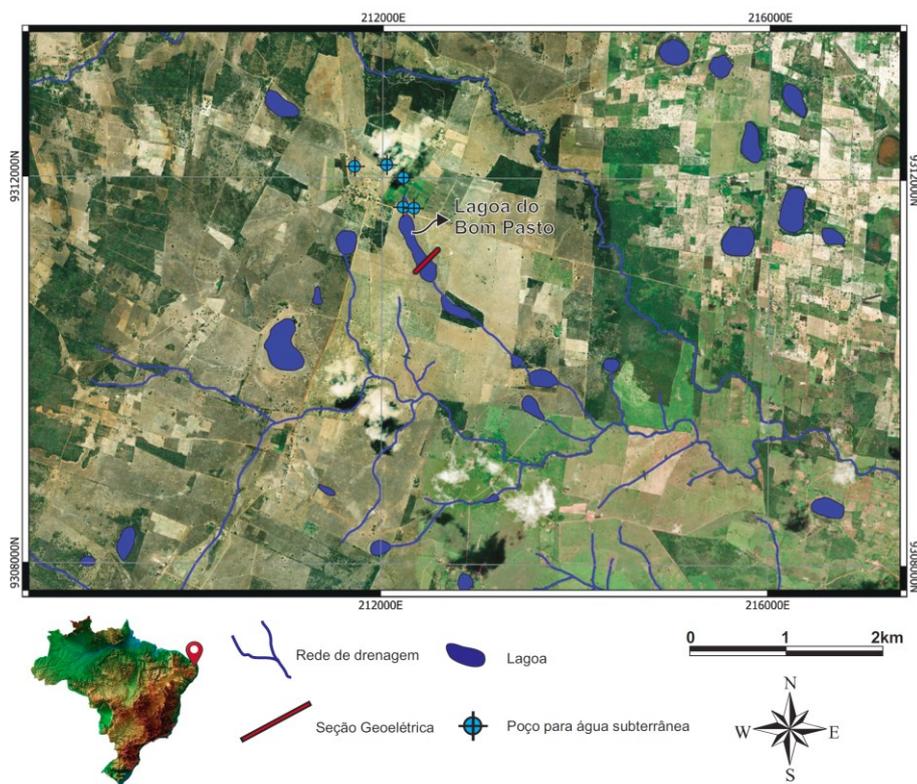


Figura 2. Mapa de localização geográfica da Lagoa do Bom Pasto, município de Serrinha, RN. A Lagoa do Bom Pasto está situada na porção central da imagem, de direção NW-SE, transversal a qual a linha vermelha indica levantamento geoeletrico realizado (visualizado em figuras subsequentes). Datum SIGAS2000, zona UTM 25S.

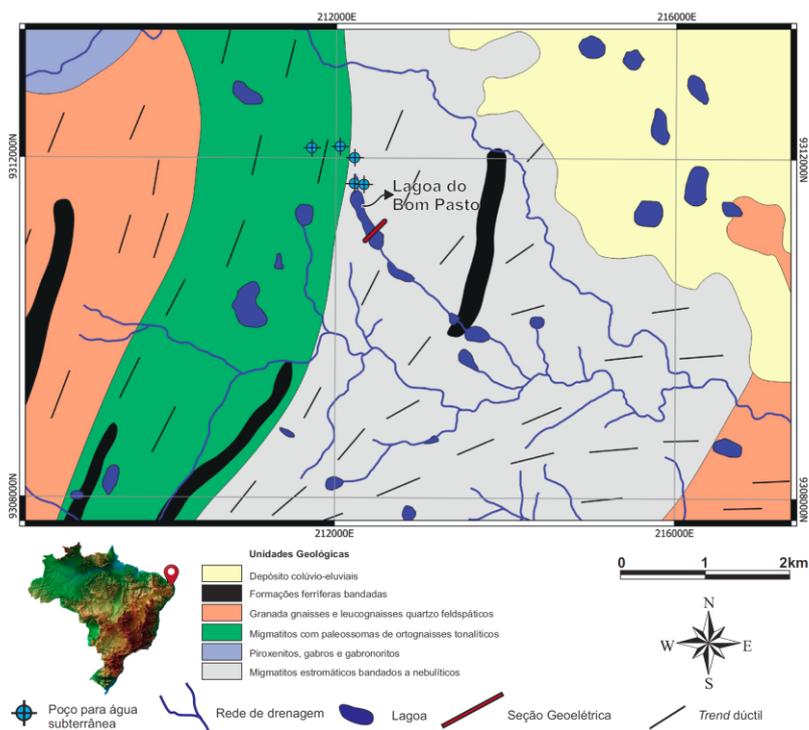


Figura 3. Mapa geológico da região da Lagoa do Bom Pasto, município de Serrinha, RN (modificado de ROIG E DANTAS, 2013). A Lagoa do Bom Pasto está situada na porção central da imagem, de direção NW-SE, transversal a qual a linha vermelha indica levantamento geolétrico realizado (visualizado em figuras subsequentes). Datum SIGAS2000, zona UTM 25S.

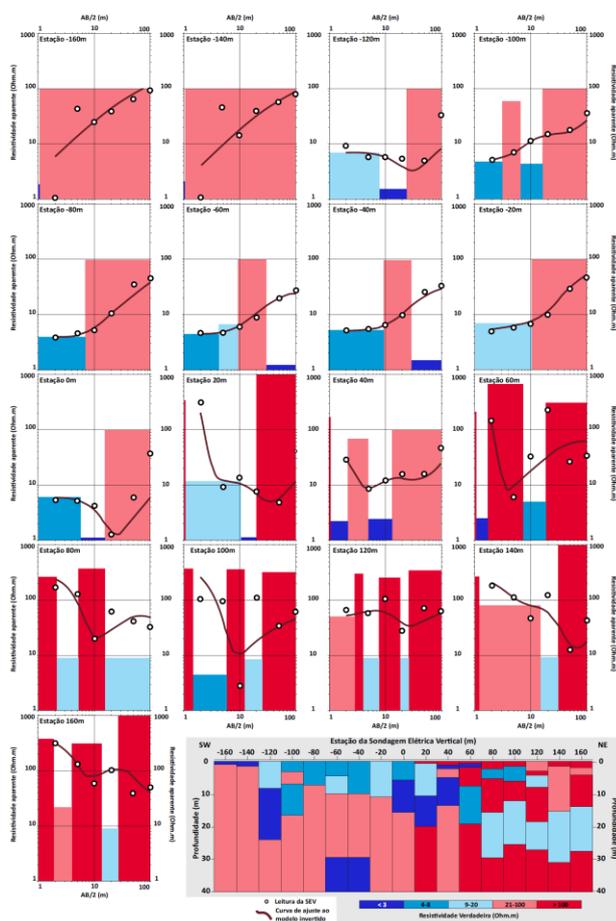


Figura 4. SEV's executadas na região estudada, superpostas aos modelos de parâmetros estimados de espessura e resistividade verdadeiras, incluindo a respectiva curva de ajuste. Na parte inferior à direita, a pseudoseção de resistividade.

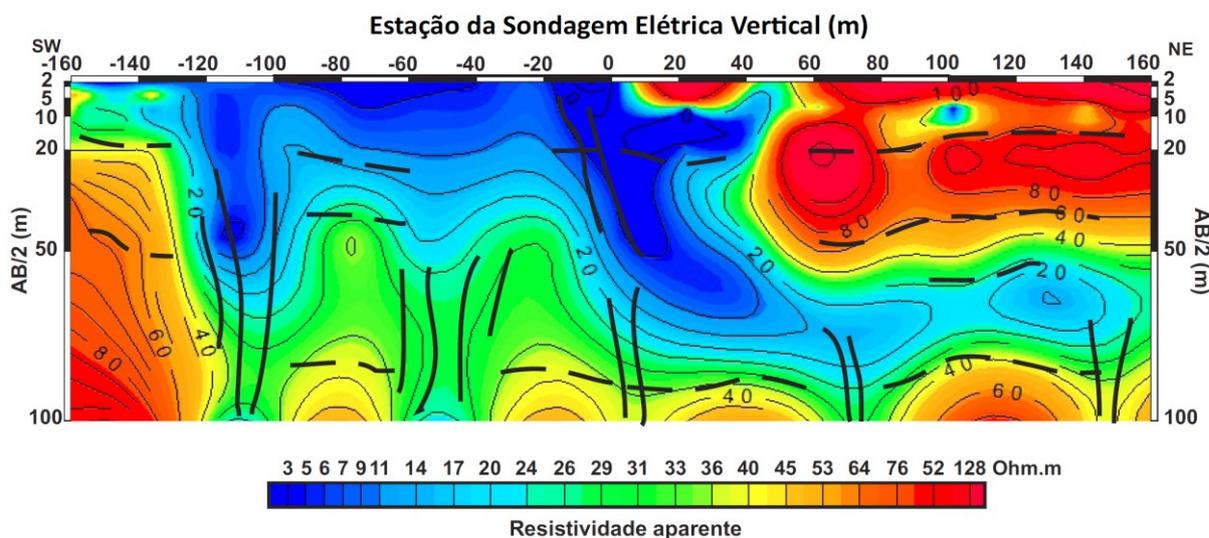


Figura 5. Seção de resistividade aparente transversal à Lagoa do Bom Pasto, Serrinha, RN (vide localização nas figuras 2 e 3). Linhas pretas contínuas indicam zonas de fratura; linhas pretas descontínuas indicam o traço do bandamento gnáissico. Maiores detalhes no texto.

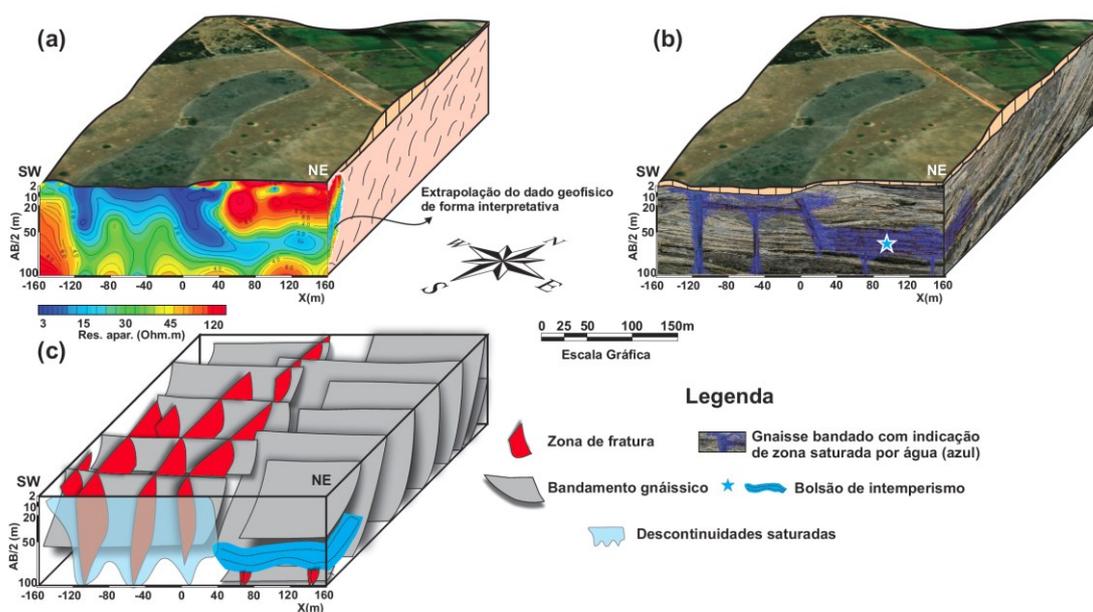


Figura 6. Blocos diagramas esquemáticos mostrando os comportamentos geofísico e geológico do substrato cristalino da região da Lagoa do Bom Pasto. (a) imagem de satélite (mapa) e seção geoeétrica; (b) imagem de satélite (mapa) e seções esquematizadas mostrando o bandamento gnáissico com indicativos de porções saturadas em água (em azul), incluindo os modelos riacho fenda e bolsão de intemperismo conectados; (c) realce aos elementos estruturais frágeis (vermelho) e dúcteis (cinza), com indicativo de zonas saturadas (azul).