

Composição de uma cartografia de transmissividade hidráulica exploratória com a utilização do parâmetro resistência elétrica transversal

Composition of an exploratory hydraulic transmissivity map using the parameter transverse electrical resistance

Álvaro Luís Patriota Lima Magalhães¹; Leandson Roberto Fernandes de Lucena²

¹ Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica-PPGG/UFRN, Natal-RN, Brasil. Email: luis.lima.701@ufrn.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6002-7766>

² Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica-PPGG/UFRN, Natal-RN, Brasil. Email: leandson.lucena@ufrn.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7713-861X>

Resumo: O Aquífero Barreiras, de caráter hidráulico não confinado, possui elevado potencial hidrogeológico, abastece aproximadamente 80% das cidades do litoral oriental do Rio Grande do Norte-Brasil. Nesse contexto, a área de pesquisa situa-se na margem esquerda do Riacho Boa Cica, Nísia Floresta-RN. A presente pesquisa objetivou elaborar uma cartografia de transmissividade hidráulica-T exploratória a partir de dados de testes de aquífero e do parâmetro geoelettrico resistência elétrica transversal-RT, este último proveniente de modelos inversos de sondagens elétricas verticais-SEVs. Adicionalmente, subáreas com maiores potencialidades hidrogeológicas foram caracterizadas, com base na correlação direta entre RT e T. Os resultados evidenciaram o emprego satisfatório dessa metodologia de composição de transmissividades a partir da resistência transversal, desde que considerando uma calibração hidrogeofísica prévia, envolvendo perfil litológico-constitutivo, teste de aquífero e modelo inverso da SEV executada adjacente ao poço. Os maiores valores de RT foram caracterizados nas subáreas central e oeste, atingindo 58860 Ohm.m², sendo estas associadas a zonas de maiores potencialidades hidrogeológicas. Nesse aspecto, a análise do fator preponderante no cálculo de RT, através de regressão linear, revelou um coeficiente R² de 0,89, evidenciando a preponderância da resistividade média do aquífero (associado com sua condutividade hidráulica), em detrimento da sua espessura, nos valores de RT.

Palavras-chave: Transmissividade hidráulica; Resistência elétrica transversal; Aquífero não confinado.

Abstract: The Barreiras Aquifer, unconfined in hydraulic nature, has a high hydrogeological potential and supplies approximately 80% of the cities along the eastern coast of Rio Grande do Norte, Brazil. In this context, the research area is located on the left bank of the Boa Cica Stream, in Nísia Floresta, RN. This study aimed to develop an exploratory hydraulic transmissivity (T) map based on aquifer test data and the geoelectric parameter of transverse electrical resistance (RT), the latter obtained from inverse models of vertical electrical soundings (VES). Additionally, sub-areas with higher hydrogeological potential were characterized based on the direct correlation between RT and T. The results demonstrated the satisfactory application of this methodology for determining transmissivities from transverse resistance, provided that prior hydrogeophysical calibration is considered, involving lithological-constructive profiles, aquifer testing, and the inverse model of the VES performed adjacent to the well. The highest RT values were identified in the central and western sub-areas, reaching 58,860 Ohm.m², associated with greater hydrogeological potential zones. In this regard, the analysis of the predominant factor in the calculation of RT, through linear regression, revealed an R² coefficient of 0.89, highlighting the predominance of the aquifer's average resistivity (linked to its hydraulic conductivity) over its thickness in RT values.

Keywords: Hydraulic transmissivity; Transverse electrical resistance; Unconfined aquifer.

1. Introdução

Estudos hidrogeológicos e hidrogeofísicos tornaram-se essenciais para auxiliar na elaboração de estratégias confiáveis para a gestão exploratória dos mananciais subterrâneos. Isso se deve à crescente demanda para o abastecimento público nos grandes centros urbanos e nos setores agropecuários, além de atender regiões que enfrentam sazonalmente escassez hídrica. Diante desse contexto, estudos geofísicos, particularmente utilizando métodos geoelétricos, são decisivos na determinação da geometria do aquífero e na identificação de áreas mais favoráveis para a captação de água, principalmente em locais carentes de informações de poços.

Considerando um modelo de camadas plano paralelas, levantamentos utilizando o método da eletrorresistividade, especialmente com a técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV), é substancial para estudos envolvendo aquíferos clásticos, pois permite distinguir variações de resistividade com a profundidade. Além disso, o parâmetro geoelétrico de Dar Zarrouk resistência elétrica transversal (RT) tem o potencial de desempenhar um papel impressindível na identificação de áreas propícias para captações futuras, permitindo também obter estimativas de transmissividades hidráulicas (ORELLANA, 1972; SILVA E LUCENA, 2021).

O Aquífero Barreiras, alvo desta pesquisa, compreende uma porção significativa da costa leste do Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil, sendo reconhecido pelo seu elevado potencial hidrogeológico. De acordo com Lucena (2005), ele abastece aproximadamente 80% dessa faixa litorânea, incluindo a capital Natal.

A área da presente pesquisa situa-se no município de Nísia Floresta, região do litoral sul do Rio Grande do Norte, compreendendo a margem esquerda do Riacho Boa Cica (Figura 1). Esta região, com uma bateria de poços produtores e de monitoramento já instalada, integra parte do Sistema Adutor Monsenhor Expedito, a qual responde pelo abastecimento de cerca de 300.000 habitantes na região agreste do Estado (oeste da área estudada). Nesse aspecto, a referida bateria de poços possuía uma expectativa inicial de descarga total da ordem de 900 m³/h, fato este não observado ao final do projeto (vazões totais disponíveis de 750 m³/h), em face de litologias locais compostas predominantemente por arenitos finos e argilosos (ALVES E LUCENA, 2021).

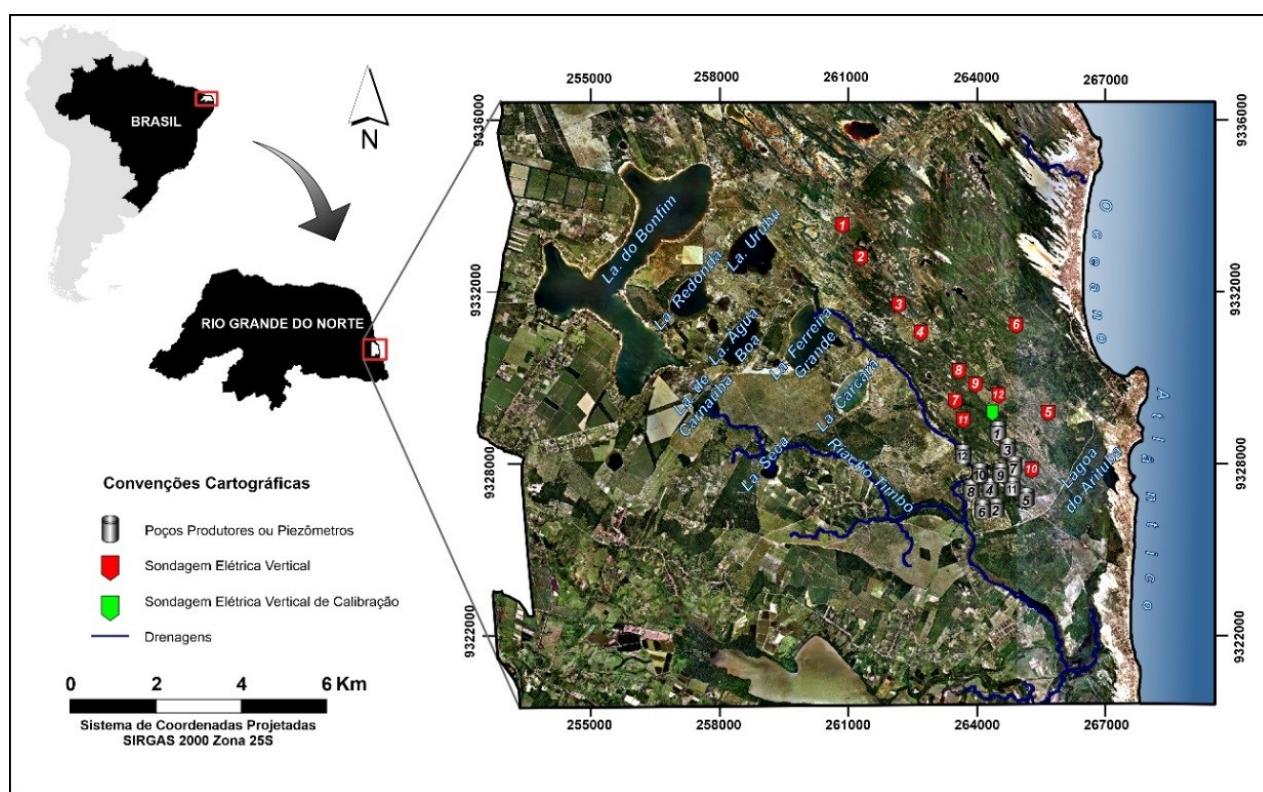


Figura 1 – Localização da área de estudo, dando ênfase para as lagoas que compreendem o Sistema Lacustre do Bonfim, além de destacar a série de poços e as SEVs realizadas na margem esquerda do Riacho Boa Cica.

Fonte: Autores (2025).

Estudos realizados utilizando os parâmetros de Dar Zarrouk (resistência elétrica transversal e condutância longitudinal) ressaltam sua aplicabilidade em diferentes contextos hidrogeológicos. Patil et al. (2018) empregaram ambos os parâmetros na região de Chopda Taluka (Maharashtra-Índia) e indicaram zonas favoráveis para a exploração de águas subterrâneas. Souza et al. (2019) identificaram subáreas mais promissoras em termos hidrogeológicos com base em análises do parâmetro resistência elétrica transversal. Silva e Lucena (2021) utilizaram a resistência elétrica transversal para obter estimativas de transmissividades hidráulicas e, juntamente com outros dados geoelétricos, avaliaram as características hidrogeológicas de um aquífero não confinado localizado na região litorânea leste do Rio Grande do Norte. Além disso, esses autores determinaram que a resistividade média da zona saturada, em detrimento da espessura média da zona saturada, é o parâmetro preponderante na composição da resistência elétrica transversal para aquela área em questão.

Ekanem (2022) investigou o comportamento hidrogeológico de um aquífero que abrange cinco condados no estado de Akwa Ibom, sul da Nigéria, aplicando métodos de correlação entre resistividade elétrica e transmissividade hidráulica, inferindo subáreas de maior produtividade hídrica. Ikard et al. (2023) desenvolveram relações semiempíricas entre transmissividade hidráulica e resistividade elétrica média para caracterizar as propriedades hidráulicas do Aquífero Aluvial do Vale do Rio Mississippi, nos Estados Unidos. O estudo identificou correlações significativas entre parâmetros geoelétricos, como a resistência elétrica transversal, e a transmissividade, destacando regiões promissoras para exploração hídrica.

Frente a esse panorama, a presente pesquisa tem como objetivo principal a elaboração de uma cartografia exploratória de transmissividade hidráulica (T) no contexto hidrogeológico que compreende o Aquífero Barreiras, através de dados adquiridos em testes de aquífero e pelo cálculo que envolve o parâmetro geológico resistência elétrica transversal (RT). Adicionalmente, foi analisado o fator preponderante na composição de RT , ou seja, a espessura ou a

resistividade médias da zona aquífera no contexto reportado, para auxiliar na identificação das áreas promissoras em termos hidrogeológicos.

2. Contexto geológico

A estratigrafia regional inclui duas sequências litoestratigráficas: uma não aflorante, envolvendo o embasamento cristalino Pré-Cambriano e rochas sedimentares mesozoicas, e outra aflorante, abrangendo toda a sedimentação de idade cenozoica. As rochas do substrato cristalino, associadas ao Complexo Caicó, dizem respeito à gnaisses, granitos, migmatitos e granodioritos (LUCENA, 2005; SOUZA et al., 2019).

Sobrepondo discordantemente o embasamento cristalino, encontram-se as rochas sedimentares de idade mesozóica, conforme reportado, divididas em duas unidades: uma arenítica na base e outra carbonática com intercalações areníticas no topo. Ambas estão associadas às Formações Beberibe e Gramame-Maria Farinha da Bacia Costeira Pernambuco-Paraíba (NOGUEIRA et al., 2006).

A sequência aflorante é caracterizada pelas rochas sedimentares da Formação Barreiras e Formação Potengi (Paleógeno-Neógeno); e os sedimentos Quaternários, que incluem a Unidade de Barra de Tabatinga, os beachrocks, depósitos praiais, depósitos fluviais, diversas gerações de dunas, depósitos de mangue e/ou fluvio-lacustrinos e depósitos arenosos (Figura 2) (ROSSETTI et al., 2013; LUCENA E SIMONATO, 2021).

A Formação Barreiras, que constitui a primeira unidade estratigráfica da sequência aflorante e repousa discordantemente sobre as unidades mesozoicas da região, apresenta em sua litologia, da base para o topo, arenitos médios a grossos, eventualmente ocorrendo em níveis conglomeráticos, e rochas arenoso-argilosas ou argilo-arenosas. No entanto, ocorre variações laterais de fácies nas rochas que compõem a formação sedimentar, tanto horizontal, como verticalmente. As falésias, que tem o seu término abrupto ao longo da linha de costa, são os afloramentos mais expressivos desta formação (SOUZA et al., 2019; ALVES E LUCENA, 2021).

Nesse contexto, a bacia é caracterizada por uma deformação rúptil Neógena, representada por três trends de falhas principais com direções 040°-060° (NE-SW), 300°-320° (NW-SE) e outra 350°-010° (N-S), de maneira que os dois primeiros trends são predominantes (BEZERRA et al., 2001; NOGUEIRA et al., 2006; SOUZA et al., 2019). Uma disposição de estruturas com movimentos dextrais (NE-SW) e sinistrais (NW-SE) foram favorecidas pelos campos de tensões neotectônicos (NUNES et al., 2020).

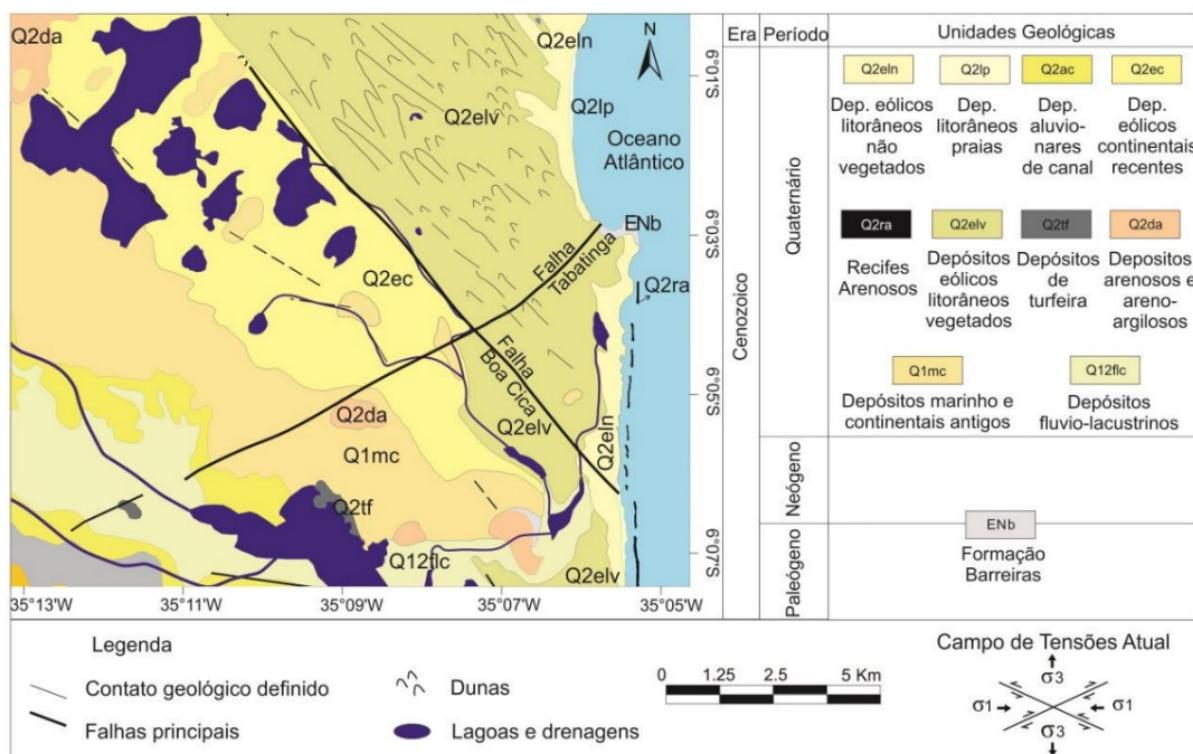


Figura 2 – Mapa geológico da região.

Fonte: Adaptado de Alves e Lucena (2021).

Esses eventos e a reativação de falhamentos causaram blocos estruturais tipo grabens e horsts, associados ao soerguimento e rebaixamento do embasamento hidrogeológico (representado pelo topo da sequência carbonática mesozóica), resultando em variações nas espessuras dos litotipos sobrepostos. Essa estruturação influencia a geometria do Aquífero Barreiras e controla os padrões de drenagem da região (ALVES E LUCENA, 2021). Blocos tipo graben podem resultar em grandes espessuras saturadas e maiores transmissividades hidráulicas (SILVA E LUCENA, 2021).

Lucena e Queiroz (1996) relataram uma anomalia gravimétrica de -4 mGal, descrita como o baixo gravimétrico do Graben Papary, o qual influencia a compartimentação estrutural nas imediações do Riacho Boa Cica e na configuração do Sistema Lacustre do Bonfim, além de controlar os lineamentos NE e NW. Na área, destacam-se as descontinuidades estruturais denominadas Falha Boa Cica (NW-SE) e Falha Tabatinga (NE-SW). A porção sudoeste do Graben Papary, em Nísia Floresta, é delimitada pela Falha Boa Cica, em contato com coberturas Quaternárias e depósitos da Formação Barreiras (ALVES E LUCENA, 2021).

3. Contexto hidrogeológico

No contexto hidrogeológico regional, o litoral oriental do Rio Grande do Norte é caracterizado por alta pluviometria, relevo plano a suavemente ondulado, altas taxas de infiltração e acumulação de água nas formações rochosas. Esses fatores resultam em importantes mananciais subterrâneos, como o Aquífero Barreiras, que abastece uma porção significativa dos municípios dessa faixa litorânea (LUCENA, 2005).

O Aquífero Barreiras, homônimo da unidade estratigráfica, é composto por rochas sedimentares cenozoicas e apresenta uma ampla variação faciológica. Na base, predominam arenitos médios a grossos, com níveis conglomeráticos ocasionais. No topo, encontram-se rochas arenoso-argilosas ou argilo-arenosas. Geralmente classificado como aquífero não confinado, pode apresentar semi-confinamentos localizados devido à presença de níveis argilosos ou siltosos (SOUZA et al., 2019; NUNES et al., 2020).

Os sedimentos quaternários, principalmente de origem eólica, sobrepõem o Aquífero Barreiras e atuam como transmissores pluviométricos que infiltram e recarregam o aquífero (ALVES E LUCENA, 2021). Esse papel das dunas

cria um sistema hidráulico único, por vezes denominado de Sistema Aquífero Dunas-Barreiras (MELO et al., 1994). Sob as rochas sedimentares da Formação Barreiras, formando a base do aquífero, encontram-se arenitos a argilitos calcíferos mesozoicos, os quais atuam como aquitardo devido às suas características hidrodinâmicas (SILVA et al., 2014).

O Aquífero Barreiras apresenta transmissividades hidráulicas (T) locais na ordem de 10^{-4} a $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ e condutividades hidráulicas (K) da ordem de 10^{-4} m/s , valores estes provenientes de testes de aquíferos (ALVES E LUCENA, 2021). As descargas observadas no referido campo de poços apresentam valores individuais de até $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Porosidades eficazes foram estimadas na ordem de 10% (ALVES et al., 2016). Contudo, através de processamentos de lâminas delgadas, Silva et al., (2014) definiram porosidades eficazes de 7,6%. Lucena et al. (2016) encontraram porosidades eficazes acima de 11% em arenitos semelhantes nas regiões circunvizinhas, apesar de serem de idade mesozoica. Essa avaliação foi realizada por meio de análise computacional de imagens obtidas a partir de lâminas delgadas.

4. Metodologia

Dos diversos métodos geofísicos utilizados na investigação de águas subterrâneas, os métodos geoelétricos são amplamente empregados, principalmente o da eletrorresistividade, obtendo alcances expressivos tanto verticalmente como horizontalmente (ORELLANA, 1972; BRAGA, 2016).

O presente estudo foi fundamentado em dados de levantamentos de eletrorresistividade, usando a técnica de sondagem elétrica vertical (SEV) e mediante arranjo de eletrodos Schlumberger (ORELLANA, 1972). A aquisição geoelétrica consiste em uma configuração de quatro eletrodos (AMNB), sendo os eletrodos A e B responsáveis por injetar corrente elétrica (I) no solo, produzindo um campo elétrico que flui através do subsolo em forma de linhas equipotenciais. Dois eletrodos de potencial, denominados de M e N, calculam a diferença de potencial (ΔV) gerada pelo fluxo elétrico (ORELLANA, 1972; BRAGA, 2016).

Assim, pode-se calcular a resistividade elétrica (ρ) utilizando a disposição desses quatro eletrodos, denominado de coeficiente geométrico K , através da equação 1.

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

O desenvolvimento da técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) envolve o deslocamento para sentidos opostos dos eletrodos de corrente (A e B) de forma simétrica em relação a um ponto central fixo, situado entre os eletrodos de potencial (M e N), permitindo a análise em diferentes profundidades (ORELLANA, 1972; KOEFOED, 1979).

Os dados de campo foram reinterpretados por intermédio do software de inversão geoelétrica IPI2Win, da Geoscan-LTDA, versão 2.1 (BOBACHEV et al., 2000).

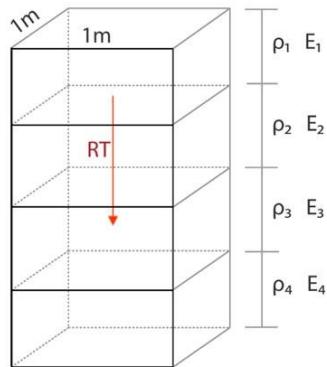
Para suprir informações litológicas e hidrogeológicas em locais com perfis de poços desconhecidos e auxiliar na interpretação quantitativa das sondagens geoelétricas, foi executado uma sondagem de calibração geoelétrica. Essa calibração envolve levantamentos adjacentes a poços com perfis hidroestratigráficos conhecidos, correlacionando descrições litológicas e espessuras das camadas com os dados geoelétricos obtidos. A partir do modelo inverso e do ajuste entre a curva modelada e os dados de campo, são fixados os valores das espessuras das camadas e obtidos os valores de resistividade. Essas informações são então associadas a outras SEVs para interpretação das camadas geoelétricas de maneira mais assertiva (BRAGA, 2016; SOUZA et al., 2019).

Supondo-se uma seção geoelétrica de espessura E_i e resistividade ρ_i , conforme o prisma geológico hipotético ilustrado na Figura 3, a corrente elétrica, ao ser introduzida no substrato rochoso, irá fluir em dois caminhos preferenciais: um fluxo perpendicular e outro paralelo à estratificação. No entanto, devido aos objetivos deste estudo, será abordado apenas o fluxo perpendicular à estratificação. Nesse caso, as várias camadas atuam como condutores em série, resultando na adição das suas respectivas resistências (ORELLANA, 1972; BRAGA, 2016; SILVA E LUCENA, 2021).

Desse modo, tomando L como o comprimento e S sua seção transversal, tem-se a expressão da resistência elétrica de uma determinada camada i , dada na Equação 2.

$$R_i = \rho_i \frac{L}{S} = \rho_i \frac{E_i}{1x1} = \rho_i E_i \quad (2)$$

Esse produto é denominado resistência transversal unitária (RT) onde sua unidade de medida é dada em Ohm.m², enquanto a resistividade elétrica é dada em Ohm.m e a espessura da camada saturada em metros.



*Figura 3 – Prisma indicando o fluxo de corrente elétrica no substrato rochoso.
Fonte: Adaptado de Silva e Lucena (2021).*

Diante desse contexto, foi calculado para cada SEV os parâmetros espessura média, resistividade média e a resistência elétrica transversal da zona saturada. A espessura média foi calculada através do somatório das camadas que compõem a zona saturada, como exibe a Equação 3.

$$E_S = \sum E_i \quad (3)$$

A resistividade média da zona saturada, por sua vez, foi determinada por meio da média ponderada das resistividades médias, utilizando a espessura média da zona saturada como fator de ponderação.

$$\rho_m = \frac{RT}{E} \quad (4)$$

O cálculo da resistência elétrica transversal foi realizado individualmente para cada camada geoelétrica e, em seguida, realizou-se o somatório dessas camadas abrangendo toda a zona saturada, conforme indica a Equação 5 (BRAGA, 2016; SILVA E LUCENA, 2021).

$$RT = \sum \rho_i E_i \quad (5)$$

A transmissividade hidráulica (T) representa a quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente através de toda espessura do aquífero. A Equação 6 caracteriza algebraicamente o conceito deste parâmetro (FEITOSA et al., 2008).

$$T = K \cdot E \quad (6)$$

Onde a transmissividade hidráulica (T) é representada em m²/s, e os parâmetros K e E denotam a condutividade hidráulica e a espessura saturada, dadas em m/s e m, respectivamente.

A condutividade hidráulica indica a capacidade do material rochoso de permitir o fluxo de água através dele, ou seja, quanto maior a condutividade hidráulica mais facilmente a água pode se mover no interior do substrato. Nesse contexto, os parâmetros resistividade elétrica e condutividade hidráulica estão intrinsecamente associados em correlação direta, onde, por exemplo, arenitos saturados apresentam resistividades e condutividades hidráulicas mais elevadas, em detrimento de argilitos. Portanto, devido à relação direta entre esses parâmetros, a resistência elétrica transversal e a transmissividade hidráulica (Equações 5 e 6) são igualmente proporcionais, considerando a mesma espessura saturada para ambas as equações (SILVA E LUCENA, 2021; IKARD et al., 2023).

Os dados referentes aos testes de aquífero foram recuperados de SEMARH (2012) e dizem respeito aos testes de bombeamento realizados nos doze poços produtores da captação local, utilizando-se de quatro a seis poços de

observação em cada procedimento. Os bombeamentos envolveram vazões fixas variando de 39,79 a 60,01 m³/h, com duração de 48 h, além de 6 h de recuperação dos níveis dinâmicos. As interpretações dos resultados foram efetuadas mediante o método De Glee, considerando-se o regime estacionário (FEITOSA et al., 2008).

O valor de transmissividade obtido no poço PZ3-PS01, o mesmo da calibração geoelétrica, foi de $1,58 \times 10^{-3}$ m²/s. Usando este valor e o da resistência elétrica transversal adquirida na SEV de calibração (SEVcal-13), foi possível estimar transmissividades hidráulicas para as demais 12 SEVs e juntamente com os dados adquiridos nos poços, possibilitando a elaboração de uma cartografia preliminar exploratória de transmissividade hidráulica.

Adicionalmente, analizou-se qual dos parâmetros que envolvem a resistência elétrica transversal é dominante, através do método dos mínimos quadrados. Este método correlaciona linearmente duas variáveis, entre os eixos X e Y, por meio de uma regressão linear simples. O processo gera em suas linhas de tendências um fator de correlação (R^2), através da equação da reta (Equação 7), onde os valores mais próximos de 1 revelam as melhores correlações (SILVA E LUCENA, 2021).

$$Y = aX + b \quad (7)$$

Onde X representa a variável independente, indicado pela resistividade elétrica média ou espessura média, ambos parâmetros da zona saturada; enquanto Y retrata a resistência elétrica transversal, denotando a variável dependente.

Para a exibição dos parâmetros resistência elétrica transversal e transmissividade hidráulica, as cartografias produzidas foram obtidas aplicando-se métodos geostatísticos e técnicas de interpolação e gridagem (kriging), utilizando um ambiente SIG através do software ArcGis (CHISTAKOS, 2000; SOUZA et al., 2019).

5. Resultados e discussões

A calibração geoelétrica foi executada aproximadamente no centro da área da captação Boa Cica e adjacente ao poço PZ3-PS1 (Figura 4A). Essa sondagem geoelétrica (SEVCal-13) revelou intervalos de resistividades de 320 a 930 Ohm.m, além de uma espessura de 17 metros (averiguada com medição do nível d'água na referida captação) para a zona não saturada, evidenciando presença de umidade superficial. Já na zona saturada, três camadas geoelétricas foram caracterizadas, com resistividades de 360, 40 e 200, e espessuras de 9, 5 e 57 metros, respectivamente do topo para a base (Figura 5). Os valores de resistividades da ordem de 360 Ohm.m estão associados com rochas arenoso-argilosas (condutividade hidráulica relativamente maior), com aumento gradativo do percentual arenoso na mesma proporção do aumento da resistividade, enquanto os valores iguais ou inferiores a 200 Ohm.m estão associados a rochas de natureza mais argilosas (menor condutividade hidráulica) a argilitos mais característicos (40 Ohm.m). A base do modelo geoelétrico evidencia uma resistividade de 1900 Ohm.m, revelando forte influência de rochas carbonáticas mais puras do embasamento hidrogeológico mesozoico do Aquífero Barreiras, em detrimento de arenitos a argilitos de composição calcífera da base do perfil hidroestratigráfico (espessura não representativa no modelo inverso da SEV). Ressalta-se que foi sacrificado um melhor ajuste físico-matemático da curva, em face da melhor incorporação de vínculos hidrogeológicos locais. A Tabela 1 apresenta os dados de campo referentes à sondagem geoelétrica de calibração efetuada adjacente ao PZ3-PS1, na área de captação da CAERN em Boa Cica. A Figura 4B exibe o gráfico do teste de aquífero realizado no referido poço, no qual se obteve, através do método de De Glee, um valor de transmissividade hidráulica de $1,58 \times 10^{-3}$ m²/s.

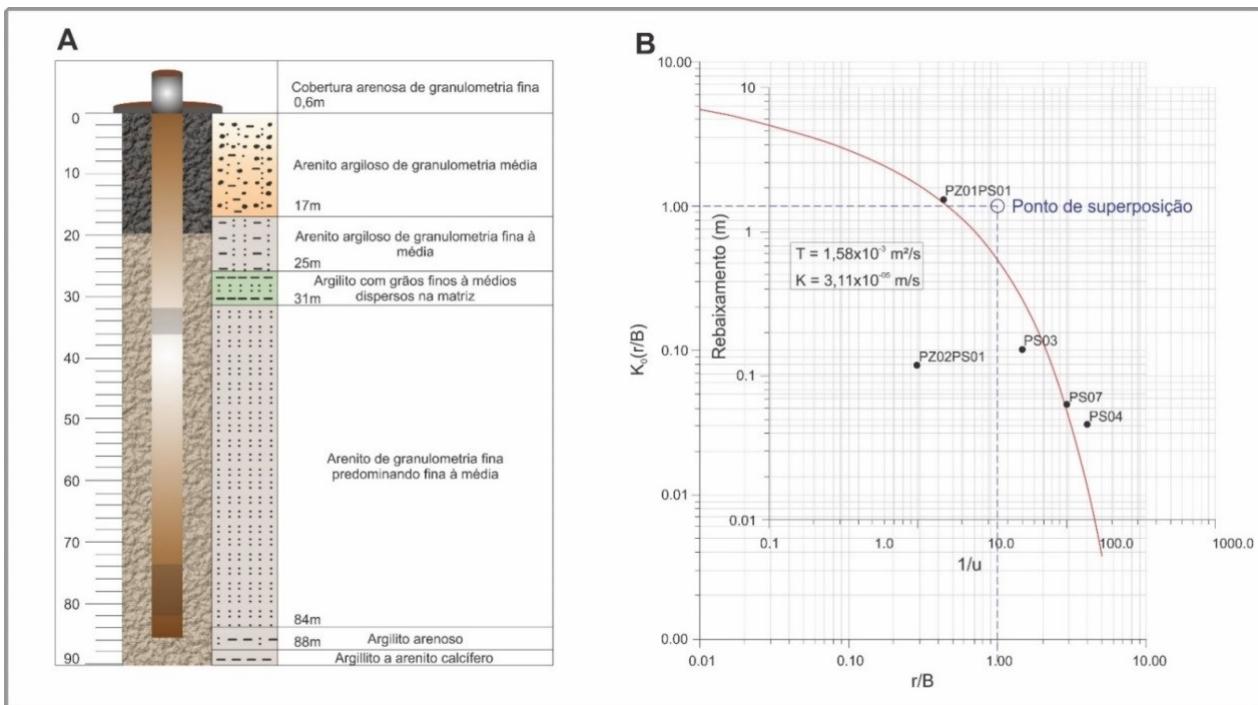


Figura 4 – Perfil litológico-construtivo simplificado do poço PZ3-P01 (A); gráfico do teste de aquífero realizando no referido poço utilizando o método de De Glee (B).

Fonte: Autores (2025).

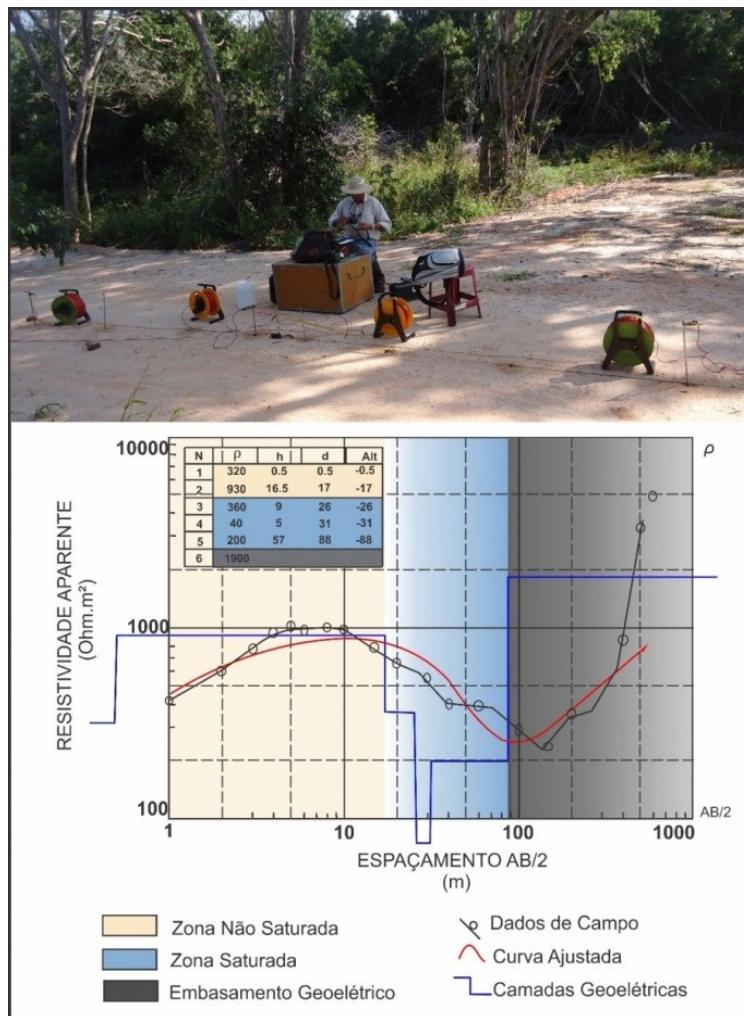


Figura 5 – Sondagem elétrica de calibração (SEVcal-13), mostrando o ajuste da curva modelada (em vermelho) aos dados de campo (em preto).

Fonte: Autores (2025).

A Figura 6A e 6B apresenta duas outras SEVs executadas (ver Figura 1), enfatizando-se o procedimento de ajuste das curvas de campo e aquelas modeladas, bem como os modelos geoelétricos interpretados.

Tabela 1 – Sondagens elétricas verticais realizadas na área da margem esquerda do Riacho Boa Cica, com as respectivas espessuras saturadas e não saturadas, além da resistividade média e a resistência elétrica transversal, provenientes dos modelos geoelétricos interpretados.

SEV's	Coordenadas		Elevação (m)	Espessura não saturada (m)	Espessura saturada (m)	Res. Elétrica Transversal (Ohm.m ²)
	UTM X	UTM Y				
SEV 1	260850	9333570	40,97	3,5	54,0	16864
SEV 2	261277	9332831	44,70	1,3	62,5	24500
SEV 3	262169	9331704	41,12	20,0	65,2	22168
SEV 4	262670	9331074	42,19	4,5	72,0	58680
SEV 5	265664	9329193	25,93	12,0	80,0	18800

SEV 6	264920	9331242	37,89	3,7	65,0	7220
SEV 7	263687	9329015	38,22	8,8	71,8	45593
SEV 8	263575	9330192	32,39	4,5	59,5	23734
SEV 9	263940	9329868	35,77	3,6	47,0	28859
SEV 10	265120	9327858	22,46	7,0	50,3	24903
SEV 11	263499	9329502	33,22	8,7	60,7	35509
SEV 12	264496	9329556	37,38	9,0	65,6	40219
SEVCal 13	264439	9329096	37,43	17,3	70,6	14840

Fonte: Autores (2025).

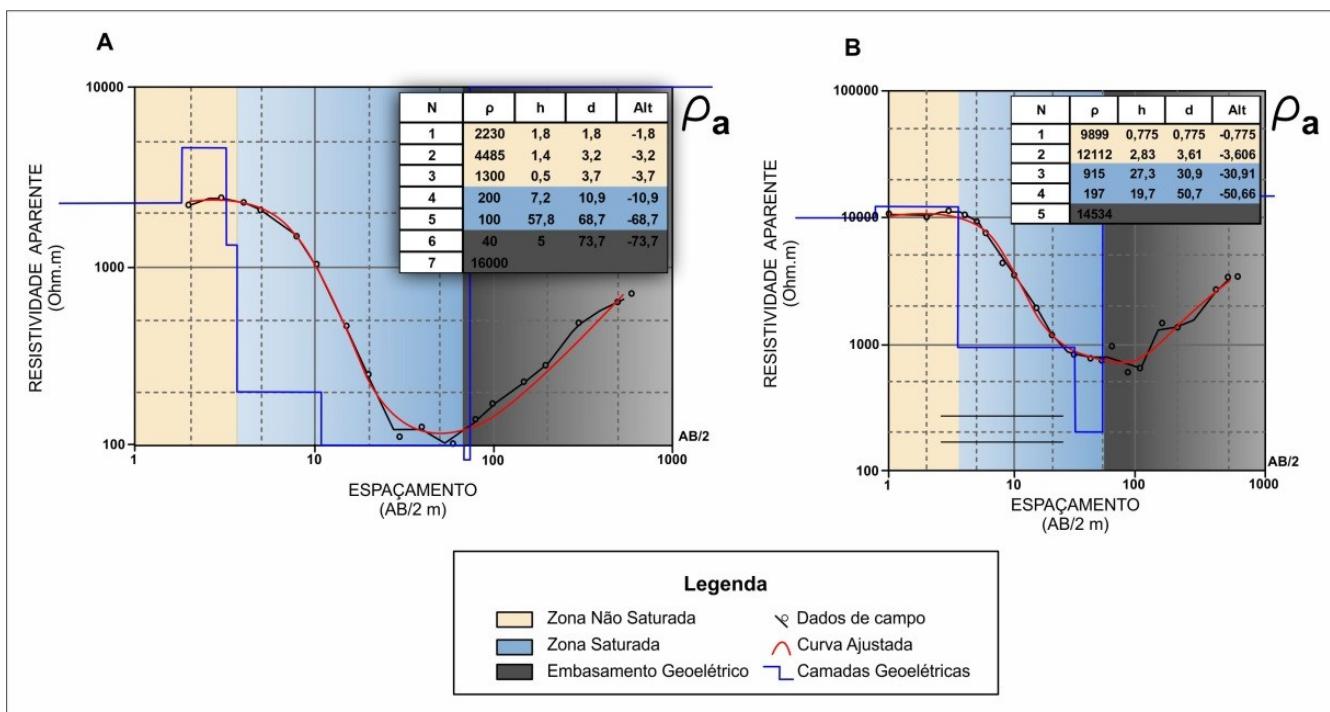


Figura 6 – SEVs 6 e 9 (A e B, respectivamente), enfatizando o ajuste das curvas de resistividade aparente, além dos respectivos modelos geoelétricos.

Fonte: Autores (2025).

A partir dos valores calculados da espessura média, resistividade média e a resistência elétrica transversal, no que abrange toda a zona saturada, foram analisados a distribuição espacial desses resultados. A Figura 7 exibe o mapa de resistência elétrica transversal (RT) obtido, mediante interpolação e gridagem, conforme reportado.

De modo geral, os valores de resistência elétrica transversal (RT) variaram de 7220 Ohm.m² a 56680 Ohm.m², com uma mediana de 24500 Ohm.m². A resistividade média da zona saturada (ρ_m) apresentou valores na faixa de 111 Ohm.m a 815 Ohm.m e a mediana de 399 Ohm.m. A espessura saturada, no entanto, denotou valores entre 47 m e 80 m e mediana de 65 m.

A correlação e análise do fator preponderante entre os parâmetros espessura e resistividade média, ambos da zona saturada, compondo a resistência elétrica transversal, revelaram resultados das regressões lineares (R^2) de 0,03 e 0,89 para as espessuras e resistividades médias, respectivamente. O gráfico inserido na Figura 7 expõe o processo realizado, ressaltando-se a relação entre resistividade média da zona saturada e a Resistência Elétrica Transversal (RT).

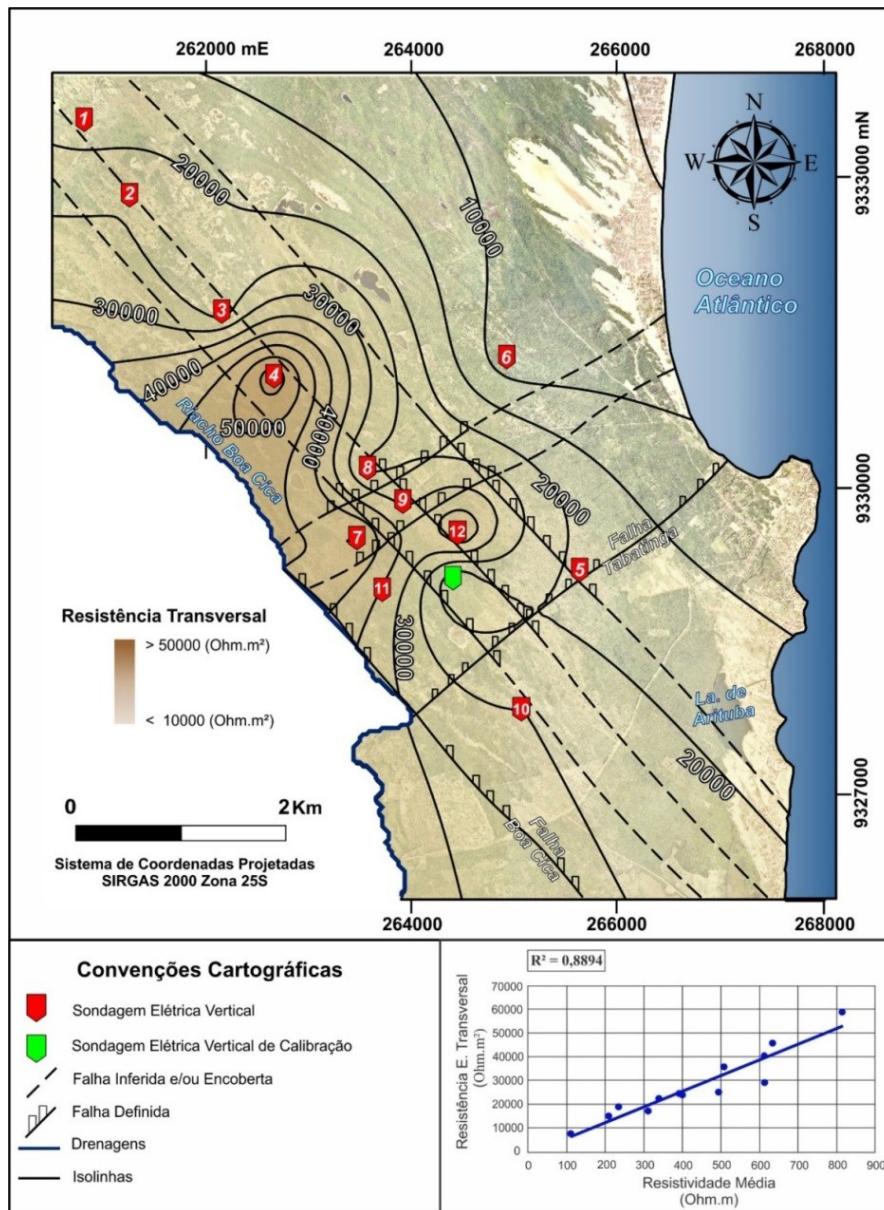


Figura 7 – Mapa de resistência elétrica transversal e o gráfico RT x Resistividade média da zona saturada.

Fonte: Autores (2025).

Analizando-se a cartografia de resistência elétrica transversal da zona saturada (Figura 7), verifica-se que os valores mais elevados ocorrem nas porções sul e oeste, em torno das SEVs 4, 7, 9, 11 e 12, com valores alcançando até 58680 Ohm.m². Portanto, atesta-se essas subáreas como as mais promissoras em termos de potencialidades hidrogeológicas.

Os resultados obtidos entre a RT e resistividade média da zona saturada contemplam semelhanças, onde os valores mais elevados entre esses parâmetros se deram nas porções sul e oeste da área. Essa similaridade se confirma também na análise do grau de dependência, em que o fator de correlação R^2 entre esses parâmetros é substancialmente superior em detrimento ao adquirido entre as espessuras médias e RT. Desse modo, aponta-se que a resistividade elétrica média da zona saturada é o fator preponderante no cálculo de RT, podendo-se inferir que os locais de potenciais hidrogeológicos mais proeminentes acham-se associadas com maiores resistividades médias da zona saturada. Nesse contexto, ressalta-se

que, embora se tenha uma compartimentação de natureza estrutural do Aquífero Barreiras em termos regionais (SOUZA et al., 2019; NUNES et al., 2020, ALVES E LUCENA, 2021), na atual área de estudo, a composição litológica de granulometria mais fina e associada com resistividades menores, preponderam nas transmissividades hidráulicas locais e, consequentemente, nas resistências elétricas transversais.

A Tabela 2 exibe os resultados das estimativas de transmissividades hidráulicas (T), adquiridas por meio da relação direta entre RT e T e em testes de aquíferos. Analisando a disposição dos resultados interpolados, verifica-se que as regiões de maiores valores de transmissividade hidráulica estão localizadas nas porções sul e oeste (Figura 8). Esses resultados se aproximam dos adquiridos no cálculo da resistência elétrica transversal, denotando seus maiores valores também nessas respectivas áreas. Os valores de T variaram de $0,76 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ a $9,96 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, com uma mediana de $2,58 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tabela 2 – Síntese dos valores de transmissividades hidráulicas obtidas por SEMARH (2012) para os doze (12) poços produtores originais (PS) da captação Boa Cica, além daqueles estimados para as imediações das SEVs 1 a 12 e SEV de calibração 13 (SEVcal).

Poço/SEV	Coordenadas	$T (\text{m}^2/\text{s}) \times 10^{-3}$	
	UTM X	UTM Y	
PS 01	264.452	9.328.912	1,58
PS 02	264.398	9.327.116	3,26
PS 03	264.696	9.328.472	1,56
PS 04	264.249	9.327.545	3,70
PS 05	265.152	9.327.243	3,68
PS 06	264.172	9.327.125	2,33
PS 07	264.875	9.328.005	1,74
PS 08	263.863	9.327.543	9,96
PS 09	264.611	9.327.747	2,41
PS 10	264.077	9.327.845	3,25
PS 11	264.775	9.327.554	2,58
PS 12	263.720	9.328.250	2,45
SEV 1	260.850	9.333.570	1,79
SEV 2	261.277	9.332.831	2,61
SEV 3	262.169	9.331.704	2,36
SEV 4	262.670	9.331.074	6,25
SEV 5	265.664	9.329.193	2,01
SEV 6	264.920	9.331.242	0,76
SEV 7	263.499	9.329.502	4,85
SEV 8	263.575	9.330.192	2,53
SEV 9	263.940	9.329.868	3,07
SEV 10	265.113	9.327.858	2,65
SEV 11	263.687	9.329.015	3,78
SEV 12	264.496	9.329.556	4,28
SEVcal	264.439	9.329.096	1,58

Fonte: Autores (2025).

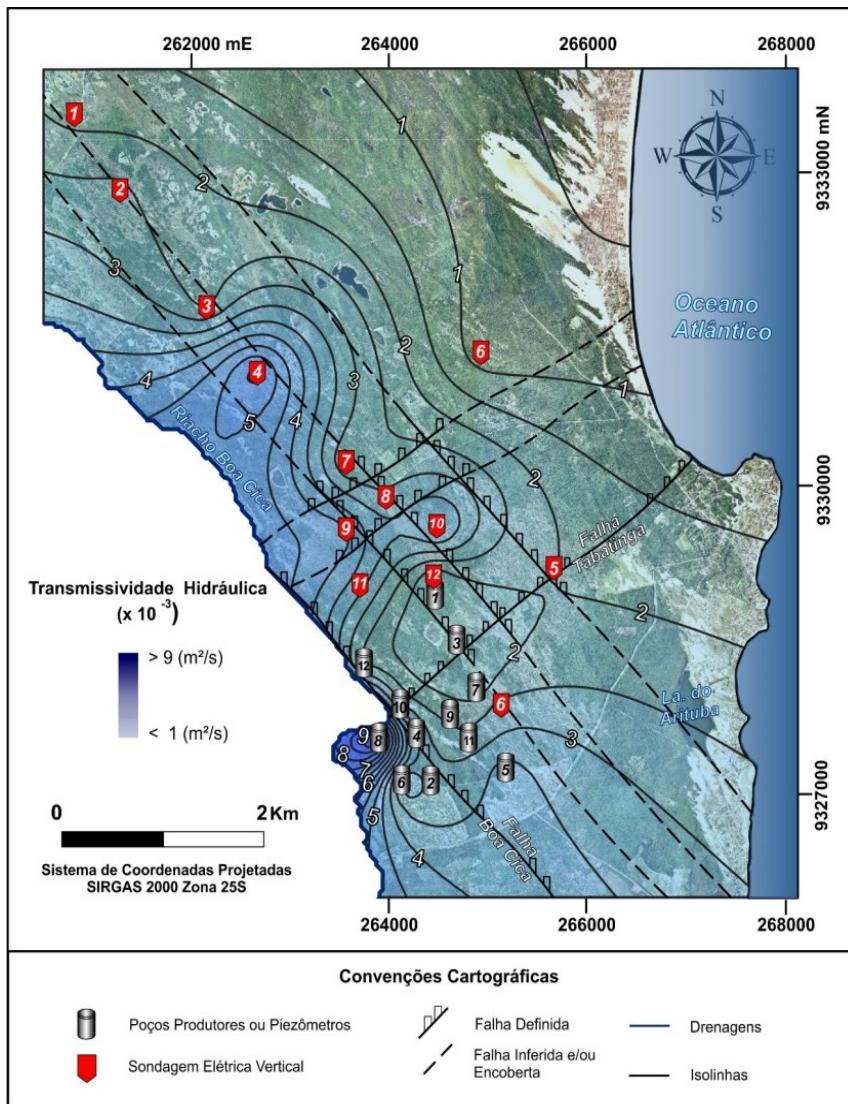


Figura 8 – Estimativas de transmissividade hidráulica utilizando em conjunto dados de resistência elétrica transversal e de poços.

Fonte: Autores (2025).

A análise conjunta dos mapas das figuras 7 e 8 (resistência elétrica transversal e transmissividade hidráulica, respectivamente), evidencia uma convergência dos mesmos, embora com o respaldo de uma calibração geoelétrica prévia, sobretudo entre “RT” e “T”. Esse aspecto dessa correlação direta entre tais parâmetros mostra-se fundamental quando se busca estimar transmissividades hidráulicas em áreas com reduzidas informações disponíveis de poços.

A análise hierárquica entre resistividade e espessura média, por sua vez, requer estudos mais abrangentes no Aquífero Barreiras, devido a resultados divergentes em diferentes áreas de ocorrência. Em certos contextos, a resistividade média pode ser mais influente que a espessura média da zona saturada, especialmente em rochas areníticas limpas com maior condutividade hidráulica. Por outro lado, espessuras saturadas maiores relativamente podem revelar baixo potencial hidrogeológico devido à presença de sequências argilosas. Diante disso, uma análise espacial detalhada da distribuição de valores de resistência elétrica transversal, bem como dos parâmetros que a compõem, deve ser considerada previamente para cada contexto hidrogeológico abordado, com vistas a subsidiar a identificação de áreas de maiores potencialidades.

6. Conclusões

Abordagens hidrogeofísicas alternativas são essenciais para suprir lacunas em regiões com poucas ou nenhuma informações de poços. A aplicação do método geoelétrico, sobretudo no cálculo que envolve resistência elétrica transversal por meio de modelos interpretativos inversos calibrados, permite avaliar zonas promissoras para captações futuras no contexto que envolve aquíferos rasos. Portanto, essa metodologia foi empregada visando auxiliar na otimização de áreas mais favoráveis para exploração hídrica na área que compreende a margem esquerda do Riacho Boa Cica, situado no município de Nísia Floresta – RN.

O sucesso da utilização do parâmetro RT, além de ser proveniente de levantamentos não invasivos, decorre principalmente devido ao fato de envolver conjuntamente dois parâmetros inerentes a zona saturada, a espessura e resistividade média, onde este último detém relação direta com o parâmetro condutividade hidráulica que compõe a transmissividade hidráulica. Nesse caso, em função dessa proporcionalidade, rochas areníticas limpas apresentam valores elevados de resistividade elétrica e condutividade hidráulica em detrimento a rochas com alto teor de argila.

As estimativas de T, adquiridas em testes de aquíferos e através do cálculo utilizando RT baseando-se em uma calibração geolétrica previamente realizada, denotaram as porções sul e oeste como as zonas de alto potencial exploratório, com valores alcançando até $9,96 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Os resultados de RT corroboram com a relação direta entre estes parâmetros, apresentando também seus maiores valores nessas subáreas, atingindo $58680 \Omega\text{m}^2$ e certificando-as como mais promissoras em relação ao potencial hidrogeológico. Isso destaca o sucesso da metodologia adotada para as estimativas de T derivados de RT e, consequentemente, na elaboração de uma cartografia exploratória preliminar de transmissividade hidráulica. A referida abordagem dá suporte para áreas que contém pouca ou nenhuma informação de dados de poços, principalmente na formulação de estratégias para auxiliar as gestões públicas no gerenciamento para a exploração dos mananciais subterrâneos.

As regressões lineares geradas para analisar o grau de influência entre a espessura e resistividade média da zona saturada que constituem o parâmetro RT, no contexto que envolve o Aquífero Barreiras para a área de estudo, revelaram um fator de correlação de $R^2 = 0,89$ para a resistividade média, substancialmente superior ao da espessura média. Esse resultado demonstra que a resistividade média da zona saturada impõe total domínio no cálculo de RT, comprovado pela similaridade entre os resultados obtidos para ambos os parâmetros ao analisar seus dados interpolados. No entanto, não se deve utilizar esse resultado como absoluto para todo o aquífero, tendo em vista que em outro estudo de mesma natureza no mesmo contexto hidrogeológico, constatou que a espessura média saturada imprimia maior influência em detrimento a resistividade média. Diante do exposto, recomenda-se expandir essas análises para outras regiões onde ocorre o Aquífero Barreiras. O objetivo é obter uma tendência mais ampla em termos da predominância da espessura ou da resistividade média do aquífero, este último associadas às suas condutividades hidráulicas, na caracterização da resistência elétrica transversal e, consequentemente, na identificação de subáreas hidrogeologicamente mais promissoras.

Agradecimentos

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”. Os autores agradecem à Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte-CAERN pelo compartilhamento de dados de poços.

Referências

- ALVES, R. S., MELO, J. G., SILVA, C. T. X. L., OLIVEIRA, C. C. C. *Recursos Hídricos Subterrâneos da Região de Parnamirim, RN: uso das águas e potencialidades*. Revista Águas Subterrâneas, v. 30, p. 37-52, 2016. <https://doi.org/10.14295/ras.v30i1.28486>.
- ALVES, R. S., LUCENA, L. R. F. *Uso de dados hidrogeofísicos e modelos numéricos como alternativa na otimização de locação de poços em um aquífero não confinado*. Revista Águas Subterrâneas, v. 35, n. 1, p. 51-64, 2021. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v35i1.29987>.
- BEZERRA, F. H. R., AMARO, V.E., VITA-FINZI, C., SAADI, A. *Pliocene-quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil*. Journal of South American Earth Sciences. 14:61-75, 2001. doi 10.1016/S0895-9811(01)00009-8.

- BOBACHEV, A. A., MODIN, I. N., SHEVNIN, V. A. IPI2Win v. 2.1, IPI_RES2, IPI_RES3, *User's Guide*. Geoscan-M Ltd, 2000.
- BRAGA, A.C.O. *Geofísica aplicada: métodos geoelétricos em hidrogeologia*. Oficina de textos. 157 p, 2016.
- CHRISTAKOS, G. *Modern Spatiotemporal Geostatistics*. New York: Oxford Univ. Press, 312 p, 2000.
- EKANEM, A. M. *Georesistivity modelling and mapping of aquifer geometry and hydraulic characteristics in a sedimentary environment*. Water Conservation Science and Engineering, v. 7, n. 4, p. 585-598, 2022. <https://doi.org/10.1007/s41101-022-00166-9>.
- FEITOSA, F. A. C., MANOEL FILHO, J., FEITOSA, E. C., DEMETRIO, J. G. A. *Hidrogeologia - conceitos e aplicações*. 3a ed. rev. CPRM: LABHID, Rio de Janeiro, 2008.
- IKARD, S. J., MINSLEY, B. J., RIGBY, J. R., KRESS, W. H. *A model of transmissivity and hydraulic conductivity from electrical resistivity distribution derived from airborne electromagnetic surveys of the Mississippi River Valley Alluvial Aquifer, Midwest USA*. Hydrogeology Journal, v. 31, n. 2, p. 313-334, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02590-6>.
- KOEFOED, O. *Geosouding Principles, 1: Resistivity Souding Measurements*. ELVESier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Oxford, New York, 1979.
- LUCENA, L. R. F., QUEIROZ, M. A. *Considerações sobre as influências de uma tectônica cenozóica na pesquisa e prospecção de recursos hídricos - o exemplo do litoral sul de Natal-RN, Brasil*. Revista Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 1, n. 15, p. 81-88, 1996. <https://doi.org/10.14295/ras.v15i1.28579>.
- LUCENA, L. R. F. *Implicação da compartimentação estrutural no Aquífero Barreiras na área da bacia do Rio Pirangi – RN*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Curitiba-PR, 2005.
- LUCENA, L. R. F., DA SILVA, L. R. D., VIEIRA, M. M., CARVALHO, B. M., XAVIER JÚNIOR, M. M. *Estimating hydraulic parameters of Açu-Brazil aquifer using the computer analysis of micrographs*. Journal of Hydrology, v. 535, p. 61-70, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.025>.
- LUCENA, L. R. F., SIMONATO, M. D. *Considerações Sobre a Conexão Hidráulica de um Aquífero Não Confinado em Zonas de Falhas a Partir de Dados Isotópicos, NE/Brasil*. Geo-Ambiente Online, Revista Eletrônica do Curso de Geografia Graduação e Pós-graduação, n. 40, maio-agosto, 2021.
- MELO, J. G., REBOUÇAS, A. C., QUEIROZ, M. A. *Análise dos componentes hidrogeológicos da área de Natal – RN*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, VIII. Anais. Recife, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. 471-480, 1994.
- NOGUEIRA, F. C. C., BEZERRA, F. H. R., CASTRO, D. L. *Deformação Rúptil em Depósitos da Formação Barreiras na Porção Leste da Bacia Potiguar*. Geologia USP-Série Científica. v.6, n. 2, p. 51-59, 2006. doi 10.5327/S1519-874X2006000300007.
- NUNES, L. M. G., LUCENA, L. R. F., SILVA, C. C. N. *Reserve evaluation of a faultconditioned aquifer: the Barreiras Aquifer in the coastal region of NE Brazil*. Brazilian Journal of Geology, v. 50, n. 1, p. e20180127, 2020. <https://doi.org/10.1590/2317-04889202020180127>.
- ORELLANA, E. *Prospección geoelectrónica en corriente continua*. Ed. Paraninfo, Madrid. 523 p., 1972.
- PATIL, S. N., KACHATE, N. R., INGLE, S. T. *Estimation of Dar-Zarrouk Parameters for Groundwater Exploration in Parts of Chopda Taluka, Jalgaon district, Maharashtra (India)*. J. Ind. Geophys. Union, v. 22, n. 4, p. 425-435, 2018.

-
- ROSSETTI, D. F., BEZERRA, F. H. R., DOMINGUEZ, J. M. L. *Late Oligocene – Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil.* Earth-Science Reviews, v. 123, p. 87–112, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.005>.
- SEMARH. *Estudo Hidrodinâmico com Modelagem Numérica para Definição das Condições de Exploração - Projeto Executivo das Subadutoras para Suprimento do Reservatório de Reunião dos Poços da Área Boa Cica para Reforço do Suprimento da Adutora Monsenhor Expedito.* Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos, TECHNE-Engenheiros Consultores. SEMARH, Natal. 147 p., 2012.
- SILVA, L. R. D., LUCENA, L. R. F., VIEIRA, M. M., NASCIMENTO, A. F. *Estimativa de parâmetros hidráulicos do Aquífero Barreiras-RN a partir de análise computacional de 51 imagens de láminas delgadas.* Águas Subterrâneas, v. 28, n. 2, p. 14-27, 2014. <https://doi.org/10.14295/ras.v28i2.27873>.
- SILVA, J. V., LUCENA, L. R. F. *Estimativas de potencialidades hidrogeológicas em um aquífero não confinado a partir do parâmetro resistência elétrica transversal.* Águas Subterrâneas, v. 35, n. 3, e-30092, 2021. <http://doi.org/10.14295/ras.v35i3.30092>.
- SOUZA, I. V. F., LUCENA, L.R.F., BEZERRA, F. H. R., FILHO, J. B. D. *Use of hidrogeophysical data to determine the role of faults in the geometry of the Barreiras Aquifer, Brazil.* Brazilian Journal of Geology, v. 49, n. 2, p. e20170141, 2019. <http://doi.org/10.1690/2317-4889201920170141>.