

## GEOFÍSICA E VULNERABILIDADE DO SISTEMA AQUÍFERO POROSO-FISSURAL NO MUNICÍPIO DE CAPIM GROSSO-BAHIA

### GEOPHYSICS AND VULNERABILITY OF THE POROUS-FISSURAL AQUIFER SYSTEM IN THE MUNICIPALITY OF CAPIM GROSSO-BAHIA

Susana Silva Cavalcanti<sup>a</sup>, João José Santos Costa<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Universidade Federal da Bahia – UFBA, <sup>b</sup>Geólogo

scavalcanti@ufba.br, costajj4@gmail.com

Submissão: 15 de maio de 2023

Aceitação: 12 de agosto de 2024

#### Resumo

O sistema aquífero poroso-fissural no município de Capim Grosso, Bahia, é formado pelos sedimentos Tércio-Quaternários da Formação Capim Grosso e pelas rochas fraturadas dos terrenos metamórficos de médio e alto grau do Cinturão Salvador-Curaçá e do Bloco Gavião de idade arqueana a proterozóica. O objetivo deste estudo foi caracterizar o sistema aquífero e fazer a análise de vulnerabilidade aquífera para avaliar a possibilidade de se constituir uma fonte de abastecimento de água. O mapeamento da vulnerabilidade é um instrumento de planejamento do uso e ocupação do solo e a compreensão da hidrogeologia do aquífero possibilita uma gestão mais adequada. Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas informações geológicas e hidrogeológicas, mapas e perfis geológicos de poços disponíveis no Sistema de Informações de Água Subterrânea (SIAGAS) e no cadastro de poços da Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia (CERB), bem como foi realizada investigação geofísica com o método da eletrorresistividade. Este método mede diferenças de potencial elétrico devido a injeção de corrente elétrica, a partir da superfície do terreno, e permite o cálculo da resistividade elétrica das camadas geológicas. Foram executadas 40 sondagens elétricas verticais (SEV) com o arranjo Schlumberger de eletrodos. Como produto da interpretação geofísica foram construídos perfis geofísicos-geológicos que revelaram um modelo geológico composto de um regolito que recobre a Formação Capim Grosso, com níveis argilosos, e o substrato rochoso ora fraturado/alterado, ora inalterado. A Formação Capim Grosso representa o aquífero poroso enquanto as rochas cristalinas fraturadas/alteradas formam o aquífero fissural. A vulnerabilidade foi avaliada pelo método MAIA, pensado para expressar a vulnerabilidade intrínseca do aquífero. O índice de vulnerabilidade foi baixo na maior parte da área, porém 4 locais foram mapeados com índices médio e alto.

**Palavras-chave:** método de eletrorresistividade; método MAIA; Formação Capim Grosso.

#### Abstract

The porous-fissural aquifer system in the municipality of Capim Grosso, Bahia, is made up of Tertiary-Quaternary sediments of the Capim Grosso Formation and fractured rocks of the medium and high-grade metamorphic terrains of the Salvador-Curaçá Belt and the Gavião Block of Archaean to Proterozoic age. The aim of this study was to characterize the aquifer system and carry out an aquifer vulnerability analysis to assess the possibility of using it as a source of water supply. Vulnerability mapping is an instrument for planning land use and occupation, and understanding the hydrogeology of the aquifer enables more appropriate management. This research used geological and hydrogeological information, maps and geological profiles of wells available in the Groundwater Information System (SIAGAS) and the well registry of the Bahia Water and Sanitation Engineering Company (CERB), as well as geophysical investigation using the electroresistivity method. This method measures differences in electrical potential due to the injection of an electric current from the ground surface and allows the calculation of the electrical resistivity of the geological layers. A total of 40 vertical electrical surveys were carried out using the Schlumberger electrode array. As a product of the geophysical interpretation, geophysical-geological profiles were built that reveal a geological model composed of a regolith that covers the Capim Grosso Formation, with clayey levels, and a rocky substrate that is sometimes fractured/alterated and sometimes unchanged. The Capim Grosso Formation represents the porous

aquifer while the fractured/altered crystalline rocks form the fissural aquifer. Vulnerability was assessed using the MAIA method, designed to express the intrinsic vulnerability of the aquifer. The vulnerability index was low in most of the area, but four sites were mapped with medium and high indices.

**Key words:** electroresistivity method; MAIA method; Capim Grosso Formation.

## INTRODUÇÃO

A água doce representa o recurso natural mais importante para a sobrevivência da humanidade, condição para a vida em nosso planeta e fator limitante para o desenvolvimento social e econômico. O aproveitamento dos recursos hídricos vem sendo afetado pela degradação das águas superficiais e subterrâneas. As áreas de conhecimento que determinam a acumulação de água subterrânea são especialmente a climatologia e a geologia. No contexto geológico, os aquíferos são classificados como sedimentares ou porosos, cristalinos ou fissurais e cársticos (Feitosa; Manoel Filho, 1997).

O município de Capim Grosso está inserido no polígono das secas, no nordeste da Bahia. Neste município observam-se os domínios hidrogeológicos poroso e fissural. O aquífero poroso é constituído pelas coberturas cenozoicas da Formação Capim Grosso, que formam manchas sobre o embasamento cristalino (Neves; Feitosa, 1969). O aquífero fissural é representado por rochas metamórficas de alto grau dos Complexos Mairi, Caraíba e Tanque Novo-Ipirá, além da suíte São José do Jacuípe (Brasil, 2001), limitadas por faixas estreitas, sinuosas e interconectadas, acompanhadas de zonas de falhas e fraturas.

As águas subterrâneas são menos vulneráveis à contaminação em relação às superficiais, porém, quando contaminadas, a recuperação é mais difícil, por isso é importante o uso cuidadoso desse recurso. As características importantes a serem conhecidas para o manejo sustentável dos aquíferos são a profundidade da água ou nível estático, a espessura do solo, a declividade do terreno, a capacidade específica e a recarga potencial do aquífero (Maia; Cruz, 2013; Maia, 2011). A profundidade da água e a espessura do solo são parâmetros obtidos por meio dos perfis geológicos de poços ou inferidos a partir dos dados geofísicos de eletrorresistividade (Braga, 2016).

Segundo Obiora e Ibuot (2020), o conhecimento das camadas em subsuperfície é importante no estudo da água subterrânea e no uso sustentável dos recursos hídricos

subterrâneos. A avaliação da vulnerabilidade aquífera tem sido reconhecida por indicar as áreas mais susceptíveis à contaminação devido às atividades antrópicas. A vulnerabilidade intrínseca depende das características hidrogeológicas. Ela pode ser mapeada em função da acessibilidade hidráulica dos contaminantes à zona saturada e da capacidade de atenuação da zona não saturada, resultante da diluição, degradação ou retenção do contaminante, devido a reações físico-químicas (Foster; Hirata, 1988). As variáveis utilizadas no Método de Avaliação Intrínseca de Aquíferos (MAIA) estão relacionadas com a infiltração da carga contaminante até a zona saturada (Maia; Cruz, 2013).

O município de Capim Grosso carece de fontes de abastecimento de água potável para suprir as demandas atuais e reserva futura; desta forma, uma pesquisa sobre a Formação Capim Grosso e o embasamento cristalino fraturado, suas potencialidades e suas vulnerabilidades hídricas torna-se necessária e importante. O propósito deste estudo foi caracterizar o sistema aquífero e fazer a análise de vulnerabilidade aquífera, para avaliar a possibilidade dele se constituir uma fonte de abastecimento de água. Casas *et al.* (2008) e Gmail *et al.* (2011) utilizam o método geofísico de eletrorresistividade na determinação dos parâmetros espessura do solo e profundidade da água subterrânea, que são necessários para o cálculo do índice de vulnerabilidade do aquífero. Após identificadas as áreas com maior risco de contaminação, se pode planejar o uso e ocupação do solo com garantia de proteção das águas subterrâneas.

## METODOLOGIA

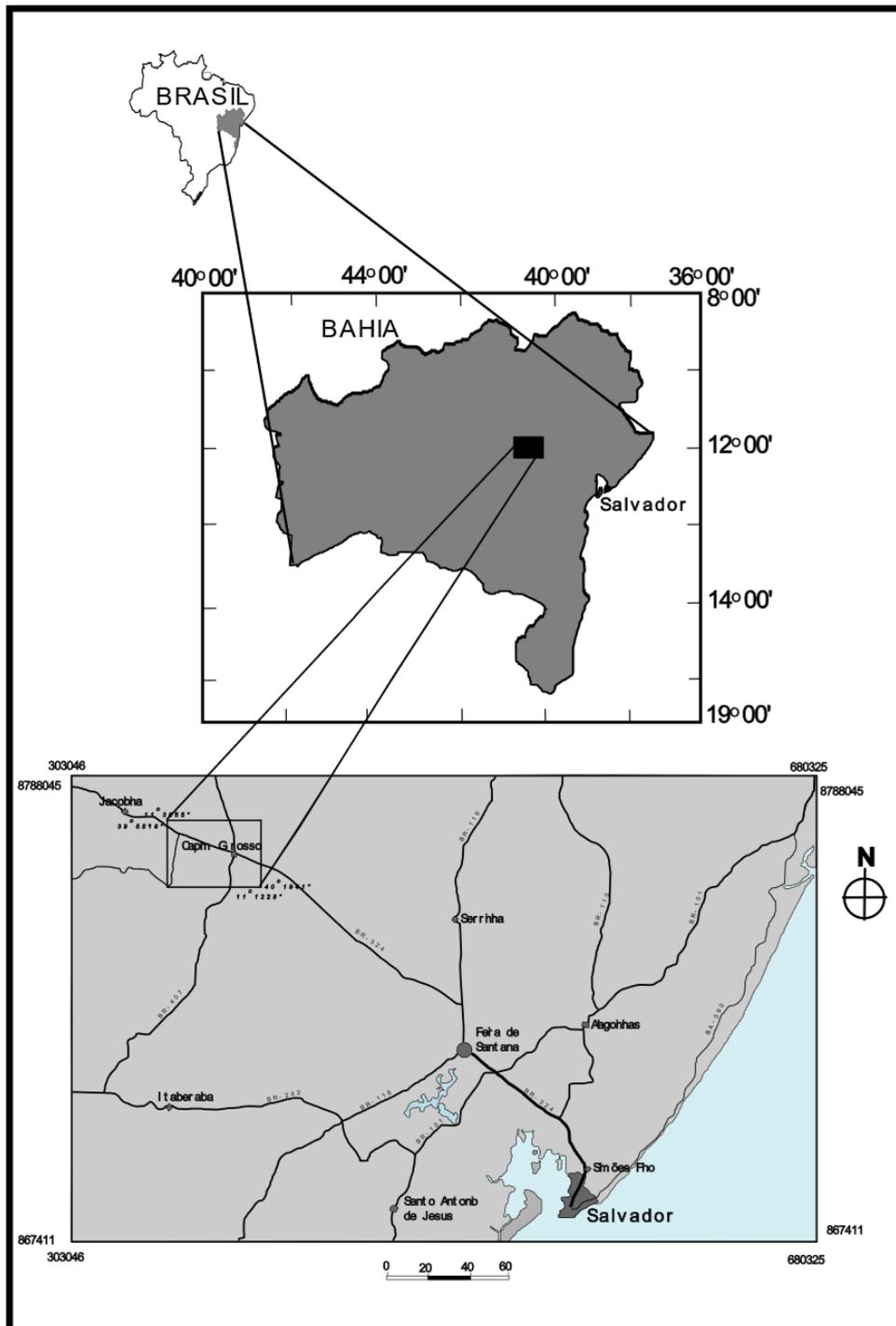
A metodologia aplicada envolve a caracterização geológica e hidrogeológica da subsuperfície na área do município de Capim Grosso, por meio de pesquisa de dados geológicos e de poços, além da investigação geofísica. Os dados obtidos no levantamento geofísico foram processados e interpretados a fim de fornecer, conjuntamente com as demais informações coletadas, os parâmetros para o cálculo do índice de vulnerabilidade aquífera com o método MAIA (Maia, 2011).

**Características da área de estudo**

A área de estudo situa-se no município de Capim Grosso, na porção nordeste do estado da Bahia, definida como o retângulo delimitado pelas coordenadas geográficas 11°12'28" S, 40°19'41" O e 11°30'55" S, 39°55'18" O, que correspondem em UTM (Datum Córrego Alegre) 355.231 m E,

8.761.042 m S e 399.782 m E, 8.726.919 m S, respectivamente (Figura 1). O acesso principal é realizado a partir de Salvador através da rodovia BR-324 até Feira de Santana e da rodovia BR-116 até o entroncamento de Tanquinho, de onde segue novamente pela BR-324 em direção a Jacobina e chega a Capim Grosso. O percurso total tem cerca de 300 km de extensão.

**Figura 1 - Mapa de localização e de acesso à área de estudo no município de Capim Grosso**



Fonte: adaptado de Brasil (2001).

O clima no município de Capim Grosso é quente de caatinga (BSw) segundo a classificação de Köppen, sem estação definida e índice hídrico deficitário, ou seja, a precipitação é menor que a evapotranspiração (Bahia, 2000). As chuvas se concentram nos meses de abril, junho e novembro, com 5 meses de seca, com taxa de precipitação pluviométrica entre 500 mm/ano e 700 mm/ano. A temperatura tem amplitude anual de 11 °C, com registro de média anual mínima de 19,7 °C, nos meses de julho e agosto, e média anual máxima de 30,7 °C, nos meses de janeiro e fevereiro (INPE, 2016).

A rede hidrográfica tem como rio principal o Itapicuru, que drena quase toda região, e seus afluentes os rios do Peixe, Poço Grande e Riacho da Onça, com pequenos tributários intermitentes, com cheias torrenciais no período chuvoso e interrupções nos cursos de água na estação seca. A unidade geomorfológica característica são os tabuleiros interioranos, que apresentam cotas entre 370 m e 500 m de altitude. Eles comportam os depósitos sedimentares arenosos cenozóicos da Formação Capim Grosso e sobrepostos discordantemente sobre os terrenos do embasamento cristalino (Brasil, 2001).

### Geologia e hidrogeologia

O conhecimento da geologia é importante para a caracterização das camadas geológicas em subsuperfície, bem como é necessário para a interpretação das medidas indiretas realizadas com os métodos geofísicos. A ordem de descrição é a partir das camadas profundas, mais antigas com relação ao tempo geológico, até as mais superficiais, recentes (Figura 2). O Complexo Mairi é formado por gnaisses metamorfizados em fácies de alto grau, de idade paleoarqueana. O Complexo Parnaíba é a principal unidade constituído predominantemente por ortognaisses cinza-esverdeados e charnokitos (Kosin *et al.*, 2003). Mineralogicamente estas rochas são compostas principalmente por plagioclásio, quartzo, feldspatos potássicos, hiperstênio e biotita. A apatita e o zircão ocorrem como acessórios (Teixeira, 1997).

A Suíte São José do Jacuípe é formada é constituída de faixas descontínuas e estreitas de direção NNW-SSE, com largura variável entre 10 km de rochas máficas, predominantemente ferrogabros, gabronoritos e leucogabros, e rochas ultramáficas tipo peridotidos e piroxenitos. Sugere-se que a Suíte São José do Jacuípe seja um pedaço da crosta oceânica (Teixeira, 1997). O

Complexo Caraíba é formado de ortognaisses granulíticos com fácies enderbíticas a charnoenderbíticas e lentes gabro dioríticas. O Complexo Tanque Novo-Ipirá é composto por quatro unidades de rochas metavulcanossedimentares de médio a alto grau representadas por gnaisses kinzigíticos, associados a gnaisses bandados, calcissilicáticas, metacarbonatos e quartizitos. As rochas metamáficas e metaultramáficas são representadas por ortoanfibolitos, metagabros, metahornblenditos, hornblenda granulitos e metaperidotitos (Brasil, 2001).

A cobertura sedimentar Tércio-Quaternária está depositada discordantemente sobre as rochas do embasamento. Trata-se de depósitos arenosos a areno-argilosos, lateríticos, mal selecionados, de coloração clara e na base destes sedimentos ocorre um nível conglomerático, limonitizado, descontínuo, irregular, com espessura variando entre 1 m e 3 m (Neves; Feitosa, 1969). Estes tabuleiros estão balizados pela cota 500 m; também estão relacionados geneticamente aos ciclos de aplainamento do final do Fanerozóico (Bahia, 1996). Segundo Oliveira, Negrão e Silva (2007), estes depósitos são originados da ação do clima e de eventos tectônicos que erodiram e transportaram grande quantidade de sedimentos do Grupo Barreiras, depositados aleatoriamente em áreas deprimidas. Atualmente, estes depósitos estão em processos erosivos que resultam na diminuição gradual de sua extensão e espessura.

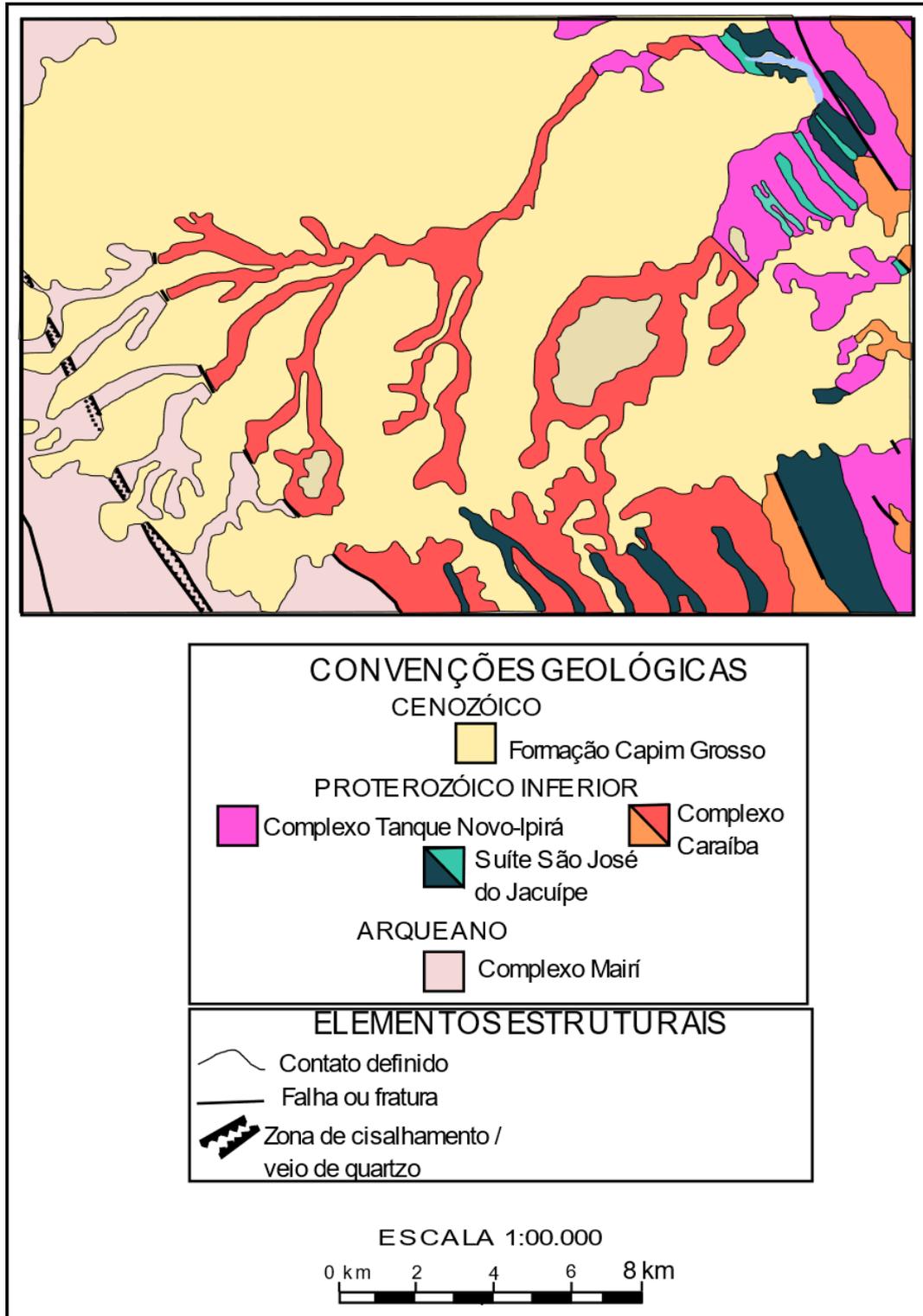
Estruturalmente, as superfícies planares existentes no embasamento cristalino possuem atitudes seguindo um *trend* SE-NW com mergulhos médios a fortes para sudeste; estes planos tendem a uma direção N-S com mergulhos para oeste. Na parte oeste ocorre uma significativa zona de cisalhamento transcorrente dextral, de direção N15°, que corta toda a área, inclusive o povoado de Paraíso. Ainda mais a oeste, paralelo a esta zona, ocorre outro sistema expressivo de falhamentos preenchido por um veio de quartzo (Brasil, 2001).

A hidrogeologia no município de Capim Grosso é caracterizada por um aquífero poroso acoplado a um aquífero fissural que forma um sistema aquífero poroso-fissural (Figura 3). O aquífero poroso representado pela Formação Capim Grosso e pelas coberturas superficiais foi mapeado como domínio sedimentar. O aquífero poroso possui uma alta taxa de infiltração devido à composição litológica formada por areias e siltes

inconsolidados, além de níveis conglomeráticos. Apesar da presença de alguns níveis argilosos, possui uma boa permeabilidade. A espessura média é de 30 m, é um aquífero de baixo potencial de exploração, mas funciona como recarga dos aquíferos fissurais e como formador de fontes, rios

e lagoas. Atualmente o aquífero tem sofrido um processo de dissecação devido ao desmatamento, às práticas agropecuárias sem monitorização monitoramento quanto à degradação do solo e à erosão dos tabuleiros.

**Figura 2 - Mapa geológico da área de estudo no município de Capim Grosso**

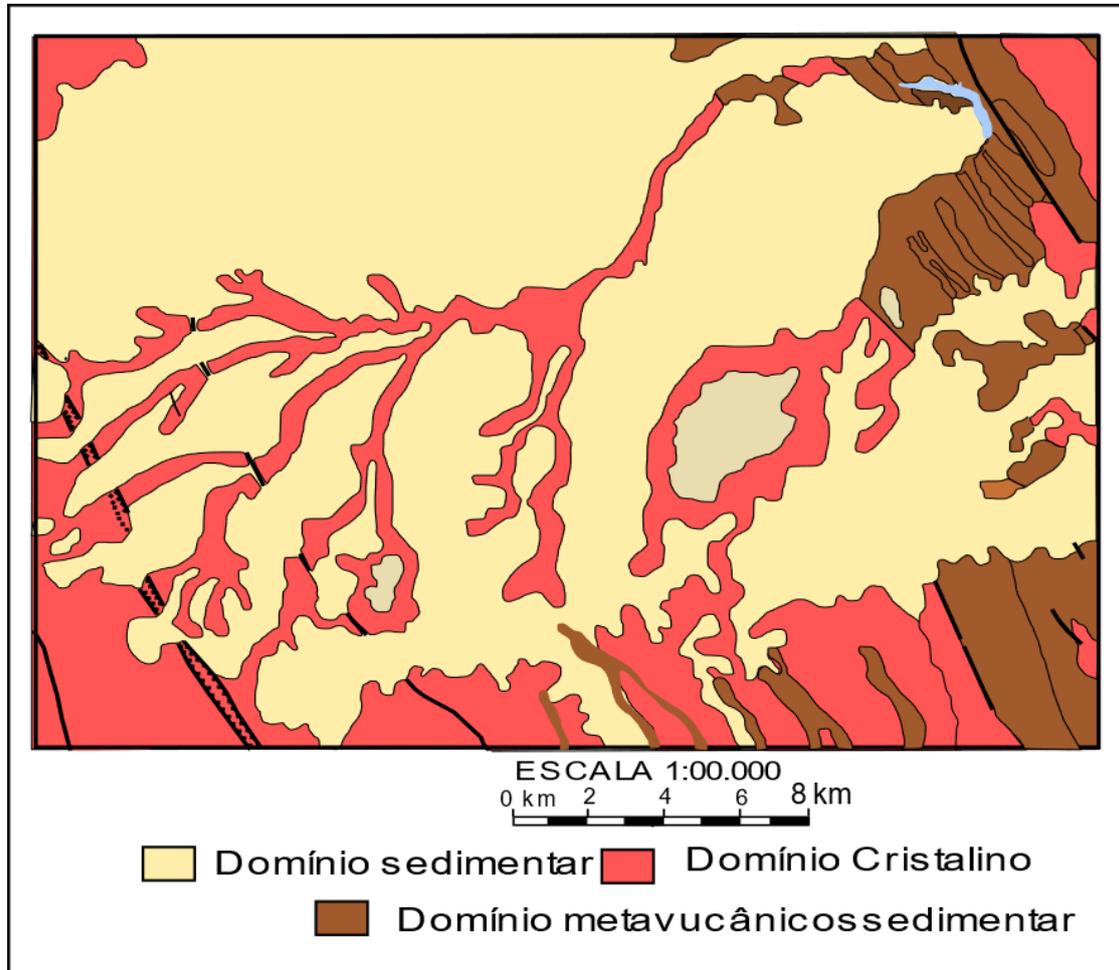


Fonte: adaptado de CPRM/SGB (2005).

O aquífero fissural localizado nas zonas fraturadas e alteradas do embasamento cristalino foi separado em dois domínios. O domínio metavulcânicosedimentar engloba as litologias do Complexo Tanque Novo-Ipirá e Suíte São José do Jacuípe. O outro domínio cristalino é representado

pelas rochas metamórficas dos complexos Caraíba e Mairi (CPRM/SGB, 2005). Esses aquíferos são alimentados por precipitações pluviométricas através de infiltrações por falhas e fraturas ou por recarga do aquífero poroso sedimentar.

**Figura 3 - Mapa dos sistemas aquíferos da área de estudo no município de Capim Grosso**



Fonte: autor (2016).

As águas deste sistema aquífero são geralmente salinizadas e foi observada a quantidade de sólidos totais dissolvidos (STD) de 8.800 mg/L e o valor médio de 3.240 mg/L. A presença de rochas com íons de cálcio, ferro e magnésio, a baixa circulação das águas e fatores climáticos, podem ser a causa da alta concentração de íons que resultam na salinização das águas. Neste estudo, foram analisados 79 poços (Figura 4), cujas informações foram coletadas no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) e no trabalho de Rios e Cruz (2017), que pesquisaram os poços perfurados no município de Capim Grosso. Do total de poços analisados, 53 deles apresentavam informações geológicas e de espessura do solo e

48 poços possuíam dados sobre o nível estático da água subterrânea (NE) e testes de bombeamento.

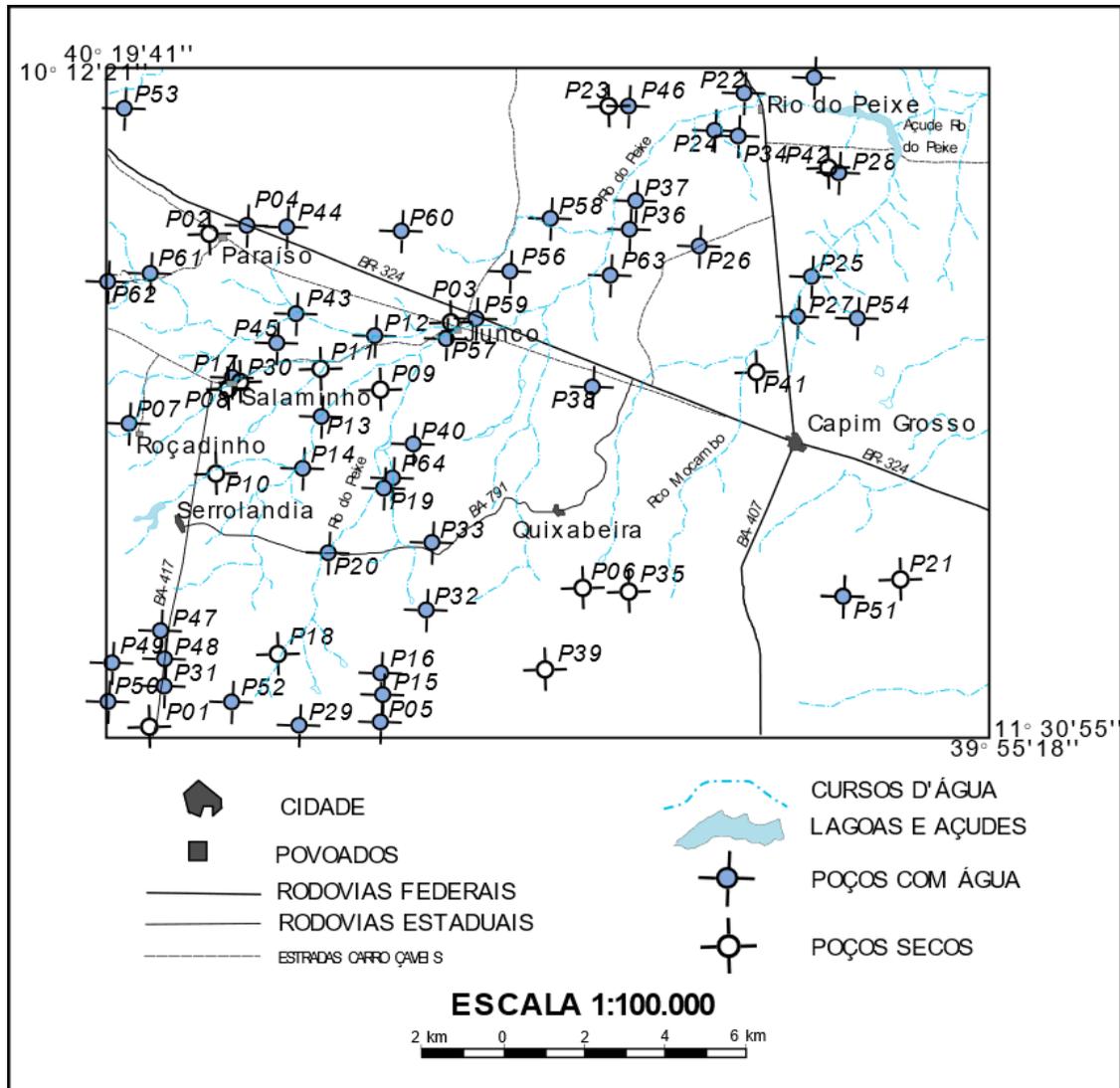
#### **Método geofísico da eletrorresistividade (ER)**

O método da eletrorresistividade consiste na medida da diferença de potencial elétrico entre um par de eletrodos (MN) cravados na superfície da Terra devido à corrente ( $I$ ) gerada por outros dois eletrodos (AB). A técnica utilizada foi a SEV que explora as variações verticais da resistividade. No arranjo Schlumberger empregado, os quatro eletrodos são dispostos simetricamente em relação ao ponto médio do arranjo (centro do arranjo), como mostrado na Figura 5. Os eletrodos M e N são espaçados a uma distância  $b$  e medem a diferença de potencial ( $\square V$ ). Enquanto isso, os

eletrodos A e B são responsáveis por introduzir a corrente elétrica no solo e ficam espaçados entre si a uma distância  $2a$  em relação ao centro do

arranjo. À medida que se expandem as distâncias entre os eletrodos de corrente A e B ocorre o aumento da profundidade de investigação.

**Figura 4 - Mapa de localização dos poços tubulares de água existentes na área de estudo no município de Capim Grosso**



Fonte: O autor 2016.

O valor da resistividade medida em cada posição e/ou orientação dos eletrodos será a resistividade aparente ( $\rho_a$ ). Ela não representa necessariamente a resistividade verdadeira de algum elemento da subsuperfície terrestre. Somente nos casos de meios homogêneos, as resistividades aparente e verdadeira são iguais (Telford; Geldart; Sheriff, 1990). Os dados de resistividade aparente são representados por uma curva em função da distância entre os eletrodos de corrente ( $AB/2$ ) em um gráfico com escala bilogarítmica. As rochas do embasamento cristalino resistivas são visualizadas na curva de resistividade aparente quando esta curva forma

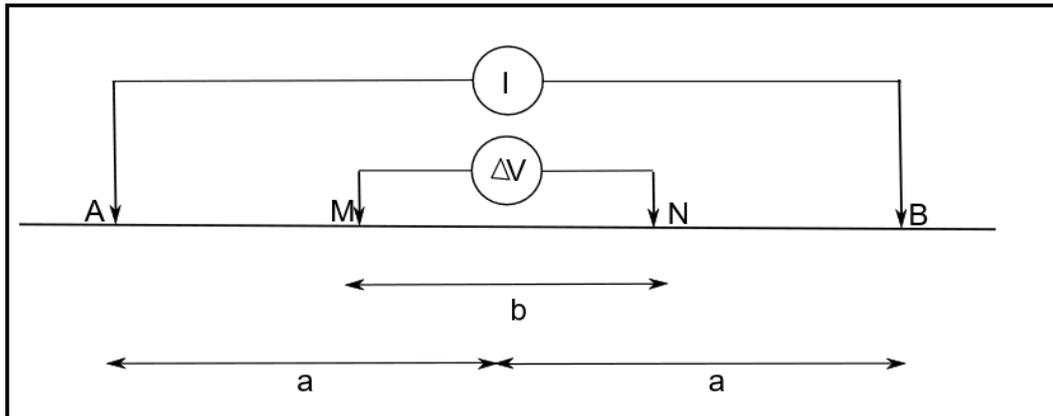
uma reta a  $45^\circ$  neste gráfico, o que facilita a identificação do topo desta camada e o final da SEV. Vale salientar, que devido às características físicas das camadas geológicas nem sempre esta profundidade de investigação é alcançada, neste caso a interpretação contempla as camadas geológicas que compõem a curva.

A técnica da SEV apresenta boa resposta para a pesquisa de água subterrâneas em meios estratificados. A interpretação da SEV fornece informações qualitativas sobre teor de argila nas formações arenosas, variação de espessura dos sedimentos, qualidade da água subterrânea e feições estruturais das rochas do embasamento

crystalino. Além disso, pode inferir a presença da água nos poros da rocha e a profundidade do nível estático da água subterrânea (Feitosa; Manoel Filho, 1997). Os melhores resultados são obtidos em terrenos com camadas horizontais ou com mergulhos suaves e com pouca variação lateral. Segundo Orellana (1972), para camadas com até 27° de inclinação são obtidas medidas de

resistividades aparentes aceitáveis. As variações laterais pequenas nas propriedades elétricas da rocha e o comportamento anisotrópico da Terra conduz a erros na estimativa dos parâmetros espessura e resistividade, uma vez que é utilizado o modelo convencional de camadas horizontais, homogêneas e isotrópicas na interpretação das SEVs (Telford; Geldart; Sheriff, 1990).

**Figura 5 - Esquema ilustrativo do arranjo Schlumberger de eletrodos**



Fonte: adaptado de Cavalcanti (2006).

O equipamento utilizado foi o resistivímetro Syscal R2 da *Iris Instruments*, o qual é alimentado por uma bateria de 12 V e os resultados são processados em tempo real (Figura 6). Para agilizar o levantamento geofísico no campo, foi confeccionado, por técnico do Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia (CPGG), um sistema multicabos, o qual possibilitou colocar todos os eletrodos de corrente em suas diferentes posições simultaneamente e/para? executar a leitura de

cada valor de resistividade aparente ao mudar a posição dos eletrodos por meio de um sistema de comutação. Em média, foram obtidas 20 medidas de abertura de eletrodos de corrente (AB) em cada SEV. A abertura mínima foi 3,2 m e a abertura máxima foi 260 m. A SEV-20, foi uma exceção e alcançou uma abertura máxima de 400 m. A abertura dos eletrodos de potencial (MN) foi de 1 m inicialmente e foi expandida para 10 m, posteriormente.

**Figura 6 - Foto do equipamento Syscal R2 da *Iris Instruments***



Fonte: <https://www.iris-instruments.com/syscal-r2.html>.

Os resultados de todas as SEVs foram plotados manualmente durante o levantamento de campo em um gráfico de  $\rho_a$  versus  $AB/2$ , em escala bilogarítmica. Este gráfico serve como controle de qualidade para detectar anomalias instrumentais ou erro no posicionamento dos eletrodos. O processo de tratamento dos dados geofísicos para a interpretação envolveu o descarte de pontos anômalos isolados, pois a resposta geofísica esperada na SEV consiste em curvas contínuas. A inversão dos dados de SEV é feita interativamente com modelos de curvas teóricas baseados no modelo de Terra formado por camadas plano-paralelas, homogêneas, isotrópicas e infinitas, e denominado Modelo 1D, no qual o parâmetro resistividade elétrica varia apenas em uma dimensão, neste caso a direção do eixo z que aponta da superfície para o interior da Terra.

Os dados de eletrorresistividade foram invertidos unidimensionalmente com o programa RES1D disponibilizado pela Geotomo Software Inc. Este programa determina automaticamente um modelo 1D de resistividade para o subsolo, com a inversão matemática não linear pela otimização de Gauss-Newton juntamente com a suavização por meio dos mínimos quadrados. A inversão automática do RES1D gera um modelo inicial inicialmente. Neste modelo inicial, cada medida de resistividade aparente ( $\rho_a$ ) está associada a uma camada geoeétrica e as espessuras das camadas correspondem à abertura de eletrodos ( $AB/2$ ). Na sequência, o programa RES1D fez um processo iterativo de ajuste da curva de  $\rho_a$  obtida em campo com a curva do modelo calculado. Esse processo se repetiu, um outro modelo foi gerado e utilizado para uma nova inversão até a obtenção do modelo final, aquele que melhor se ajustou à curva de dados medidos. A partir de então é realizada uma interpretação quantitativa, por meio da observação da curva e informações de poço e geológicas existentes.

Nessa pesquisa foram executadas 40 SEVs, com o arranjo Schlumberger de eletrodos. O mapa da Figura 7 mostra a localização dos centros das sondagens. A maioria das SEVs realizadas apresentaram o mesmo comportamento da curva  $\rho_a$  versus  $AB/2$ . No exemplo da Figura 8, na SEV-03 é possível visualizar que foram gerados 14 estratos geoeétricos com resistividade e espessura. Este é o modelo inicial gerado pelo RES1D. Após a interpretação, o modelo final para essa SEV resultou em 5 estratos geoeétricos, o

qual foi o modelo que melhor se ajustou à curva registrada em campo (Figura 9). As demais informações de poços e geológicas possibilitam relacionar os estratos geoeétricos às camadas geológicas, nível estático da água subterrânea, zonas fraturadas/alteradas.

Na área de estudo no município de Capim Grosso não havia registro de levantamentos geofísicos durante a realização desta pesquisa. Silva *et al.* (2023), recentemente, obtiveram bons resultados no embasamento cristalino no semiárido do Rio Grande do Norte ao detectar falhas e fraturas com o emprego de métodos geofísicos elétricos. Lima (2010) utilizou métodos geofísicos aéreos e terrestres, para obter informações sobre o aquífero no município de Pilar, semiárido da Bahia. Esse estudo teve o objetivo de analisar uma estratégia geofísico-hidrogeológica proposta para explorar racionalmente a água subterrânea armazenada nos terrenos cristalinos semiáridos.

### Vulnerabilidade de aquíferos

O estudo de vulnerabilidade das águas subterrâneas deve ser executado para prevenir a ocorrência de contaminação dos aquíferos. O mapeamento e o monitoramento dos aquíferos fornecem ferramentas para gestão do uso das águas subterrâneas e o controle das áreas vulneráveis às cargas contaminantes (Metni *et al.*, 2004). Quando o sistema aquífero é atingido por uma carga contaminante, é difícil tecnicamente e economicamente a sua recuperação.

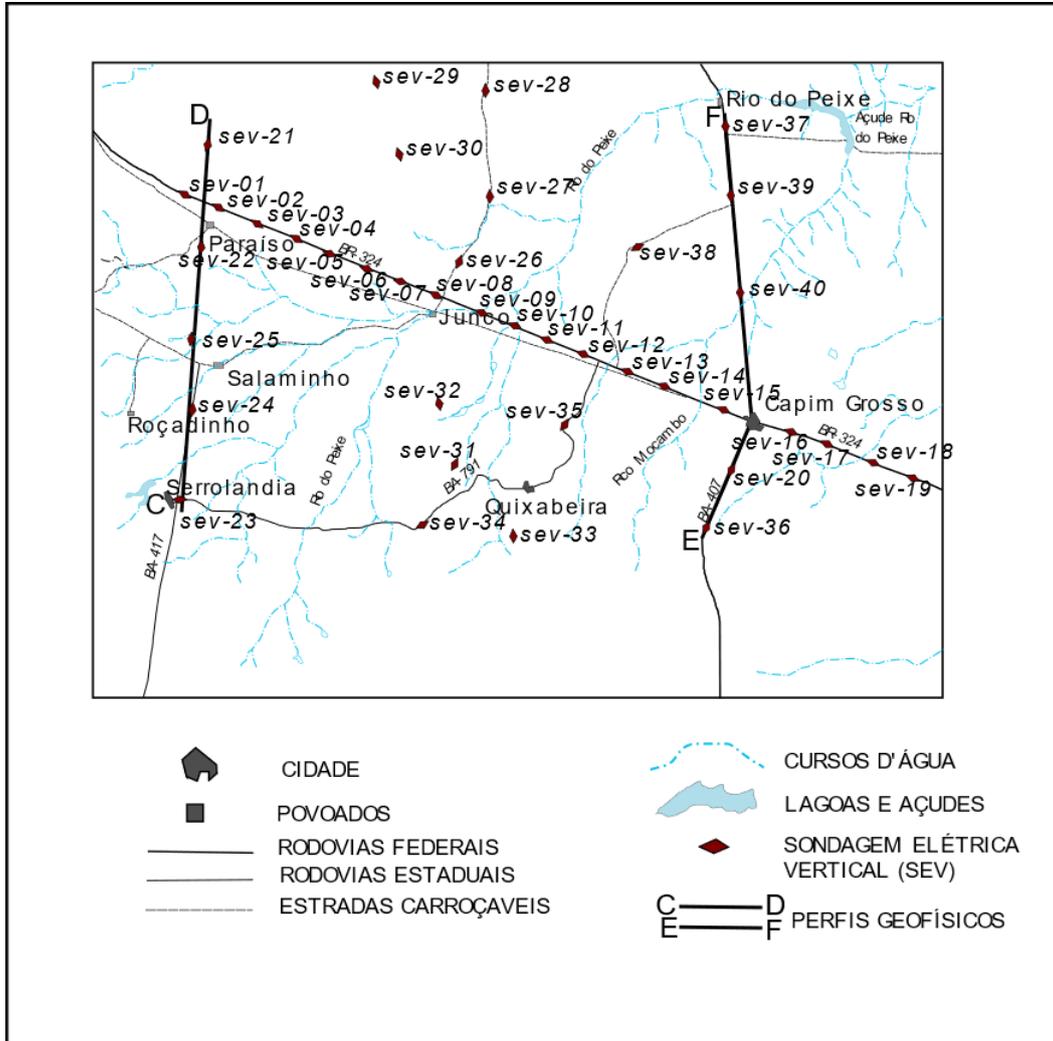
Os graus de dificuldade ou facilidade de difusão da percolação de cargas contaminantes superficiais, antropogênicas ou naturais, em reservatórios de águas subterrâneas, definem o nível de vulnerabilidade deles. Existem características do ambiente como cobertura vegetal, declividade do terreno, espessura do solo, que exercem algum nível de proteção aos aquíferos contra a percolação e difusão de contaminantes. A tendência ou probabilidade de um contaminante chegar a um reservatório de água subterrânea é definida pelo Nacional Research Council como vulnerabilidade (NRC, 1993).

Diversos métodos são utilizados para avaliação de vulnerabilidade de aquíferos. A avaliação da vulnerabilidade é obtida a partir de uma fórmula matemática em que os termos vão ser direta ou indiretamente proporcionais ao índice de vulnerabilidade. O método é baseado na combinação de mapas de diferentes parâmetros

fisiográficos, em que é atribuído um índice numérico ou pontuação para cada um dos

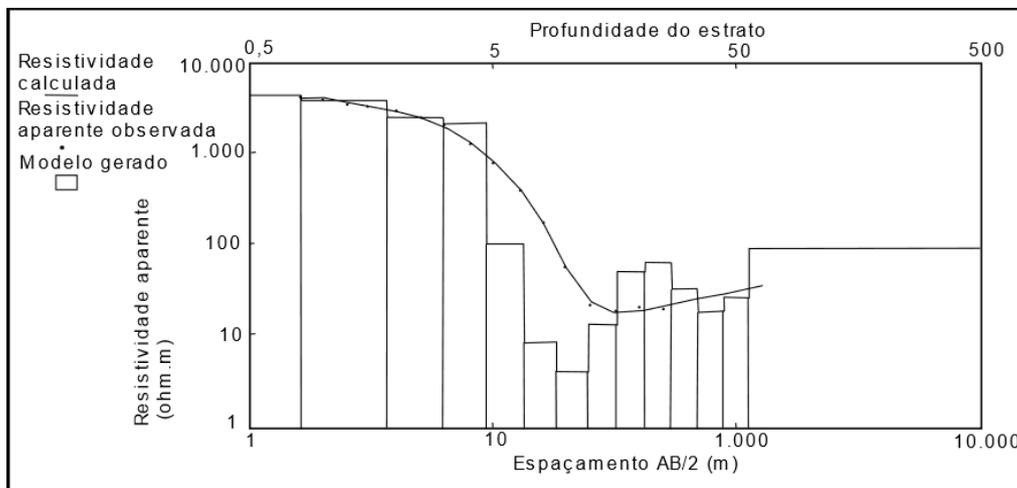
atributos considerados para se obter uma classificação final para toda área.

**Figura 7 - Mapa de localização do centro das SEVs e direção dos perfis geofísicos/geológicos na área de estudo no município de Capim Grosso**

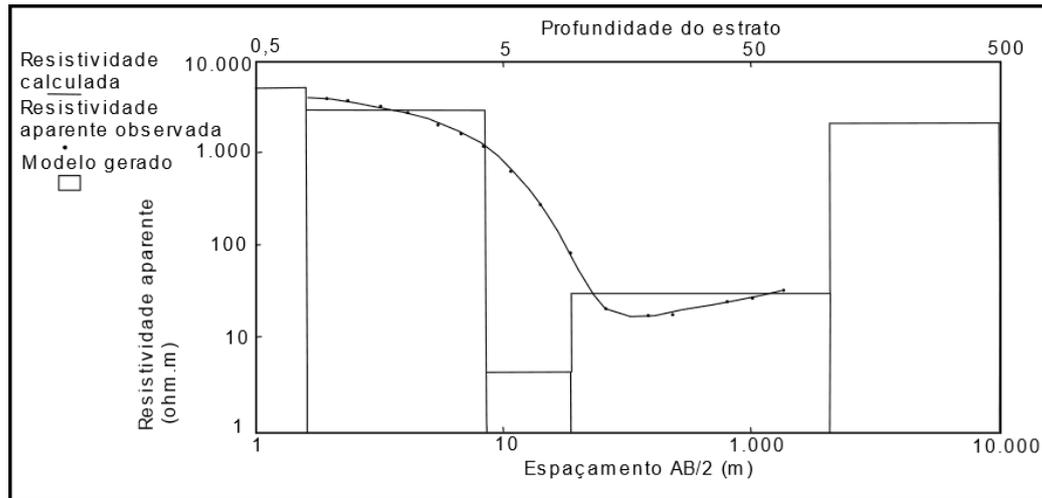


Fonte: autor (2016).

**Figura 8 - Modelo inicial gerado pela inversão automática da SEV-03**



Fonte: autor (2016).

**Figura 9 - Modelo final invertido da SEV-03**


Fonte: autor (2016).

O método de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos proposto por Maia (2011) utiliza variáveis que podem ser mensuradas para evitar o uso de ábacos e tabelas. A equação empregada pelo método é um somatório das contribuições das variáveis ou parâmetros, que são características intrínsecas do aquífero e se sobrepõem aos efeitos de proteção do aquífero (Maia, 2011; Maia; Cruz, 2011; Maia; Cruz, 2013).

As variáveis utilizadas são a profundidade da água (PA), a espessura do solo (ES), a declividade do terreno (DT), a capacidade específica (CE), a recarga potencial (RP) e a transmissividade (TA). As três primeiras são inversamente proporcionais ao índice de vulnerabilidade, porém as outras três estão diretamente relacionadas com a acessibilidade dos contaminantes ao aquífero. A recarga potencial, em pequenas áreas, pode ser mensurada pelas estatísticas da pluviosidade média anual.

A profundidade da água é a distância da superfície do solo até o nível freático do aquífero e constitui um dos fatores mais importantes para proteção do aquífero, quanto mais profundo mais protegido ele será, assim como a espessura do solo que é definida como a medida vertical da superfície do terreno até o topo do substrato rochoso. Os parâmetros PA e ES são obtidos por meio de perfis geológicos, dados geofísicos e ou dados de poços. A declividade do terreno (DT) é a inclinação da superfície em relação ao plano horizontal, ela controla o índice de infiltração e o escoamento superficial. Esta última é determinada por meio de mapas topográficos. A capacidade específica (CE) é o volume de água produzido por um aquífero em  $m^3/h.m^{-1}$ , mensurada pela relação

de Logan (Equação 1),

$$CE = \frac{Q}{s}, (1)$$

Onde:

Q: a vazão em  $m^3/h$ ;

S: o rebaixamento em metros (Equação 2);

NE: nível estático;

ND: nível dinâmico.

$$s = NE - ND. (2)$$

Além dos parâmetros já citados, tem-se a recarga potencial (RP) que corresponde a taxa de infiltração máxima que chega ao aquífero e a transmissividade ( $TA=T$ ), que é a quantidade de água que atravessa a espessura saturada do aquífero em  $m^2/s$  ou  $m^2/dia$  (Equação 3),

$$T = K.e (3)$$

Onde:

K: condutividade hidráulica em  $m/s$  ou  $m/dia$ ;

E: espessura do aquífero em metro.

Pode-se, assim, aplicar a equação 4 para o cálculo da vulnerabilidade aquífera (V) cujos parâmetros já foram descritos.

$$V = \left[ \left( \frac{1}{PA} \right) + \left( \frac{1}{ES} \right) + \left( \frac{1}{DT} \right) + CE + \mathfrak{R} + TA \right]. (4)$$

Para evitar o efeito indesejável de escalas de grandezas com amplitudes muito grandes. Maia (2011) propôs uma escala única de 1 a 10, na qual o valor mínimo de cada conjunto de dados corresponde a 1 e o valor máximo corresponde a 10. Os demais valores foram interpolados com a equação 5, que representa a equação de uma reta,

$$y = ax + b \quad (5)$$

Onde:

Y: valor real;

X: valor ponderado;

a e b: dependem dos valores das variáveis.

Em pequenas áreas é possível obter uma aproximação razoável da recarga potencial ao considerar a pluviosidade média anual da região em milímetros. Como não foi possível calcular valores pontuais da recarga na região, se adotou um valor único para todos os pontos. Neste caso foi considerado o valor médio ponderado equivalente a 5. Os valores ponderados serviram para resolver a equação 4 e obter os índices de vulnerabilidade para cada poço selecionado, que posteriormente foram utilizados para confecção do mapa de vulnerabilidade.

Para a determinação dos parâmetros PA e ES foram selecionados 64 poços na área de estudo em função dos dados geológicos, hidrogeológicos e testes de bombeamento existentes nas fichas de poços analisadas. Os valores dos parâmetros foram também inferidos por meio da interpretação de dados geofísicos.

Para determinar as faixas de vulnerabilidade utilizaram-se os valores máximos e mínimos de cada parâmetro e, ao final, obtiveram-se os limites inferior e superior do grau de vulnerabilidade. Maia (2011) propôs quatro faixas de vulnerabilidade: baixa, média, alta e extrema. Com todos os valores calculados, foi construído o mapa de vulnerabilidade.

## RESULTADOS

A Figura 4 mostra os poços existentes na área de estudo no município de Capim Grosso e a localização dos centros das SEVs e dos perfis geofísicos estão ilustrados na Figura 6. A partir das fichas de poços foram obtidas as informações geológicas, a espessura do solo e o nível estático (profundidade da água). Esses dados serviram para caracterizar a área de estudo, para orientar e calibrar o processo de inversão das sondagens elétricas, bem como para o cálculo do índice de vulnerabilidade e construção do mapa.

As 40 SEVs foram executadas em 2 etapas, nos meses de julho e setembro de 1998, períodos marcados por pouca ou nenhuma precipitação pluviométrica e altas temperaturas. As SEVs foram invertidas para interpretação final, após correlações entre elas. O resultado obtido se constitui em um modelo com assinatura definida de resistividade elétrica e espessura de camadas em

5 estratos geoeletricos. Cada um desses estratos pode ser associado a mudanças na geologia, à presença de estruturas de falhas e fissuras, ao nível de saturação e a alterações na qualidade da água (salinidade). A Tabela 1 mostra os resultados das inversões das SEVs em termos de resistividades ( $\Omega$ ) e espessura de camadas (h).

A partir da interpretação dos dados geológicos e geofísicos, foram construídos dois perfis representativos da área de estudo na direção N-S. O perfil 02: C-D incluiu os resultados das SEV-01, SEV-21, SEV-22, SEV-23, SEV-24 e SEV-25 e o perfil 03: E-F incluiu os resultados das SEV-20, SEV-16, SEV-36, SEV-37, SEV-39 e SEV-40 (Figuras 10 e 11).

Superficialmente existe um estrato bastante resistivo de espessura variando de 0,3 m a 2,7 m com resistividade média de 3.559  $\Omega$ .m, que foi associado ao regolito. As resistividades superficiais, bastante altas, podem representar um solo areno-argiloso, bastante seco. Durante as medidas, muitos eletrodos apresentaram resistências de contato bastante elevadas e isso pode contribuir para os valores excepcionalmente altos de até 34.740  $\Omega$ .m. Na base do solo, foram obtidos valores baixos de resistividade, mínimos de 411  $\Omega$ .m, que foram interpretados como variações no teor de argila e saturação do solo, relacionadas a lentes de argila saturadas.

Subsequente a este estrato, ocorre uma faixa descontínua com espessura média de 2,9 m até 6,7  $\Omega$ .m e resistividades entre 40  $\Omega$ .m e 221  $\Omega$ .m. Estes valores de resistividade, diante do contexto da região, foram associados a níveis argilosos saturados ou secos (Figura 10 conferir). O terceiro estrato é caracterizado geoeletricamente como um pacote quase contínuo interrompido apenas onde aflora o embasamento cristalino com espessura de 2,7 m a 44,1 m e resistividades baixas, 1,9  $\Omega$ .m a 28,8  $\Omega$ .m. Trata-se de uma formação arenosa saturada de água bastante salgada que corresponde ao aquífero poroso na Formação Capim Grosso.

Na base desse aquífero intercalam-se dois estratos geoeletricos. Um estrato possui resistividade média de 158  $\Omega$ .m e espessuras entre 4 m e 80 m, interpretados como as rochas do embasamento fraturadas e/ou intemperizadas e saturadas que formam o aquífero fissural. As resistividades de grandeza entre 70  $\Omega$ .m e 150  $\Omega$ .m correspondem às rochas do embasamento cristalino alteradas. As resistividades de grandeza entre 200  $\Omega$ .m e 400  $\Omega$ .m consistem na assinatura elétrica do embasamento fraturado e saturado. O

estrato com resistividades superiores a 783  $\Omega \cdot m$  equivale às rochas inalteradas do embasamento cristalino.

A caracterização do sistema aquífero poroso-fissural na área de estudo no município de Capim Grosso compreende o aquífero poroso, formado pela camada arenosa da Formação Capim Grosso associada aos níveis alterados das rochas do

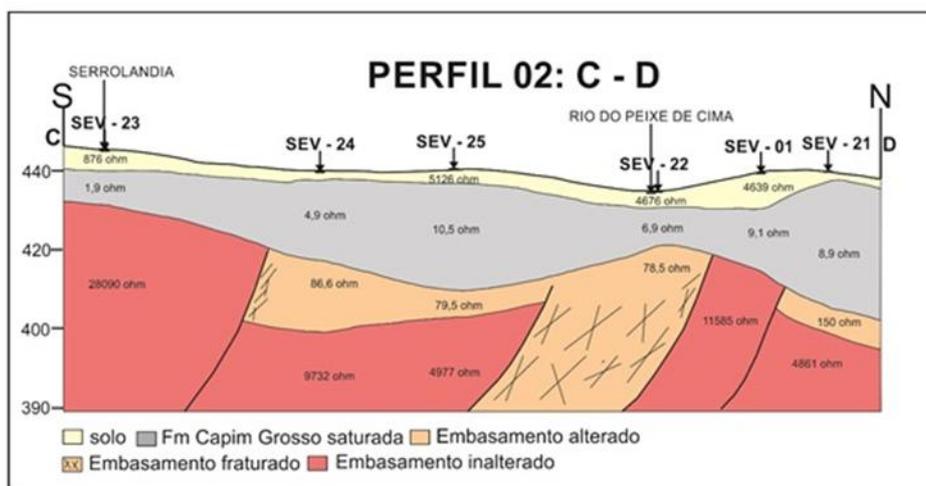
embasamento e o aquífero fissural representado pelas rochas fraturadas do embasamento. O nível estático variou entre 3,2 m e 13,4 m que coincide com o topo da formação porosa representada pela camada arenosa da Formação Capim Grosso. O fluxo subterrâneo acompanha a topografia local (Figura 12).

**Tabela 1 - Resultados das inversões das SEV**

SEV	$\Omega \cdot m$	h (m)	SEV	$\Omega \cdot m$	h (m)	SEV	$\Omega \cdot m$	h (m)	SEV	$\Omega \cdot m$	h (m)
01	4639	3,0	12	414,5	0,5	21	144,2	0,2	30	2285,2	1,6
	517,9	6,9		3188,6	1,7		2115,9	2,5		708,7	1,6
	11,9	16,9		12,4	9,4		8,0	20,9		1431,0	2,8
	3006,5			2814,3			2992,8			20,1	16,3
02	2655,2	0,5	13	1000,2	3,5	22	1360,8	1,2	32	2976,8	
	2531,5	5,8		220,0	7,9		4474,9	2,2		557,4	0,2
	10,2	19,9		8,0	11,9		7,1	11,9		1047,3	3,3
	3027,3			2941,8			2914,3			21,0	28,0
03	4321,9	1,7	14	1014,6	0,3	23	1584,6	0,2	33	2458,2	
	1938,5	3,6		2809,2	4,0		491,3	2,8		652,5	0,3
	10,6	16,3		18,8	7,5		960,5	2,9		998,8	1,8
	2857			3029,2			4,8	18,8		10,6	12,3
04	468,7	0,2	15	883,6	0,4	24	594,4	2,2	34	2703,9	2,7
	3674,7	4,2		257,4	1,9		6,1	17,9		25,0	23,9
	12,1	8,6		558,2	3,7		3000,0			1726,6	
	66,9	107,7		12,0	11,7		5084,5	0,2		1498,7	1,9
05	850,9	1,1	16	469,9	0,3	25	1604,9	2,1	35	210,3	4,8
	7,7	28		3024,5	3,3		2800,3	3,0		9,4	19,7
	3000,7			11,6	14,0		6,2	12,0		2968,1	
				3000,6			2955,5			163,3	0,1
06	446,7	0,3	17	253,8	0,3	26	492,4	0,3	36	732,6	3,7
	6958,8	2,1		501,6	1,9		1830,9	3,6		20,0	25,4
	8,3	26		258,3	2,9		17,0	24,6		2796,8	
	3005,4			9,3	17,7		2786,5			737,8	0,3
07	2591,9	5,0	18	1110,5	0,3	27	0,3	0,9	37	6073,3	2,7
	183,1	3,7		449,0	0,5		3,6	2,5		9,2	14,4
	5,9	11,9		2079,3	2,1		24,6	24,9		2992,8	
	2999,8			12,0	17,7		2976,8			25317,0	0,4
08	1106,9	0,8	19	1274,0	0,3	28	2436,0	1,9	38	1155,4	5,3
	9,6	7,1		511,6	0,8		876,1	3,7		7,7	19,0
	2997,5			4213,0	2,2		10,6	23,1		5007,8	
				9,0	14,6		2963,5			1468,6	0,2
09	1807,7	1,3	20	547,6	0,3	29	1138,6	0,2	39	3619,7	3,1
	43,2	13		1367,7	3,8		3106,2	3,4		16,4	23,2
	1385,9			54,0	1,8		15,8	25,5		2659,8	
				132,9	113,7		2798,9			731,9	0,3
10	628,7	0,6	31	1367,7	3,8	30	79,1	0,2	40	444,3	2,1
	45,1	13		54,0	1,8		34,0	0,2		91,3	7,1
	2866,5			132,9	113,7		8,1	6,2		10,8	10,4
				506,8			169,3			2995,0	
11	413,0	0,9									
	1383,1	2,3									
	18,2	30,0									
	2811,5										

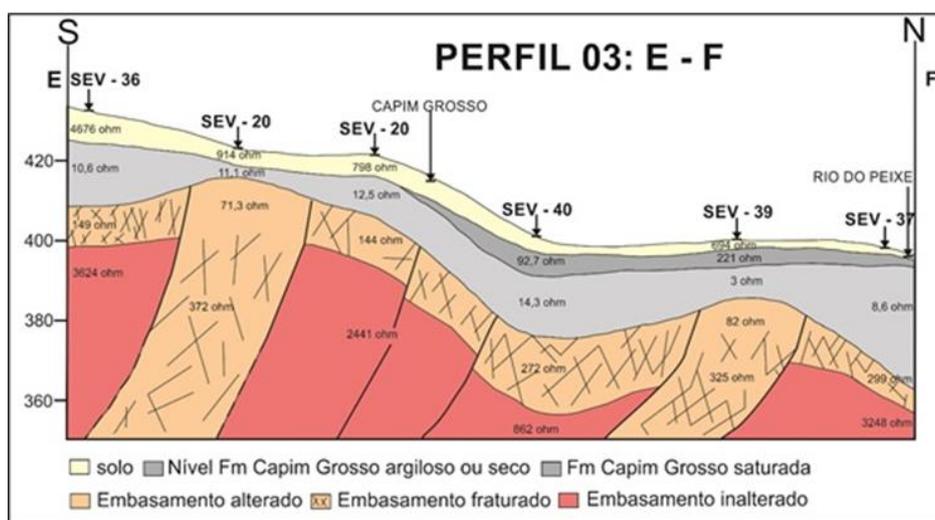
Fonte: autor (2024).

**Figura 10 - Perfil 02 - Geológico-geofísico da área de estudo no município de Capim Grosso**



Fonte: autor (2016).

**Figura 11 - Perfil 03 - Geológico-geofísico da área de estudo no município de Capim Grosso**



Fonte: autor (2016).

Os parâmetros utilizados para determinar os índices de vulnerabilidade foram calculados conforme a equação proposta por Maia (2011). Os parâmetros da equação, neste método, têm dimensões e unidades diferentes. Dessa forma, para normalizar essas medidas foi necessário ponderar os dados, ou seja, colocar todos os parâmetros no mesmo nível de grandeza. Definiu-se para cada conjunto de parâmetros o valor máximo e o valor mínimo distribuídos em uma escala de 1 a 10. O valor mínimo corresponde a 1 e o valor máximo corresponde a 10. A equação da reta  $y=ax+b$  é utilizada, onde  $a$  é o coeficiente angular da reta,  $b$  é o coeficiente linear da reta,  $y$  é o valor real medido e  $x$  é o valor ponderado/normalizado.

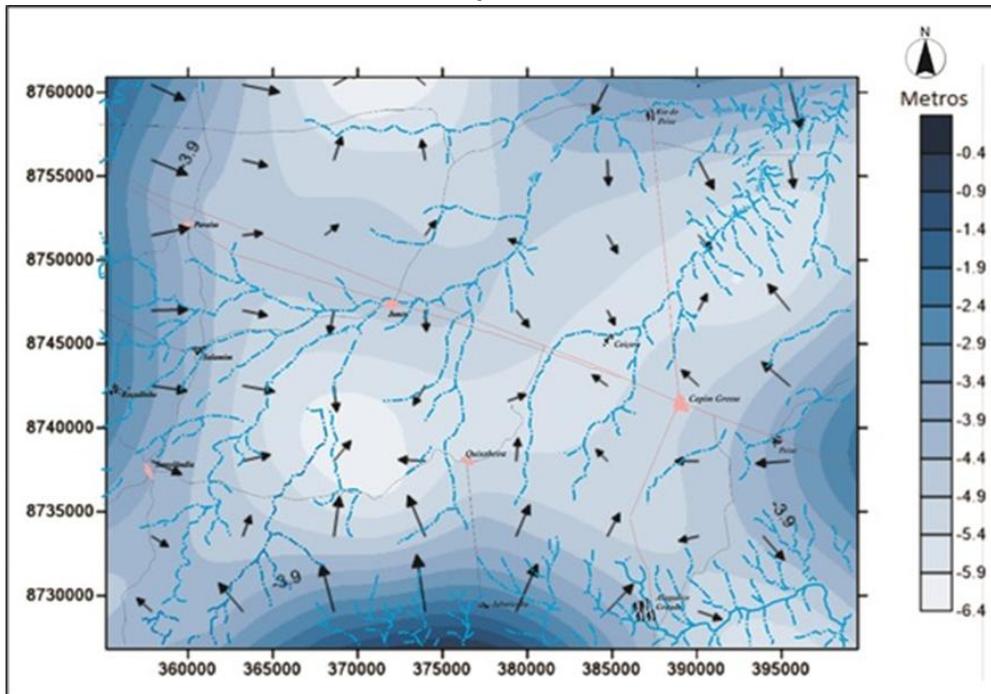
O parâmetro profundidade da água (PA) ou nível estático (NE) foi obtido por meio dos testes de bombeamento contidos nas fichas de poços e pela interpretação das SEVs. Neste caso foi definido que o nível estático corresponde aos valores de resistividade da ordem de 10  $\Omega$ .m. O valor mínimo encontrado para o NE foi 0,5 m e o valor máximo foi 38,02 m. Com o conjunto de pontos  $(x_0, y_0)=(1, 0,5)$  e  $(x_1, y_1)=(10, 38,02)$ , calcula-se o coeficiente angular  $a=(y_0-y_1)/(x_0-x_1)=(0,5-38,02)/(1-10)=4,19$ . Em seguida, substitui-se um dos pontos na equação da reta e se obtém o coeficiente linear  $b=y-ax=0,5-(4,19 \times 1)=-3,69$ . Finalmente tem-se a equação 6,

$$y = 4,19x + 3,69 \quad (6)$$

que ao serem colocados os valores  $y$  dos dados pode-se obter o valor ponderado  $x$  para o

parâmetro PA. Este cálculo foi repetido para cada variável da equação do índice de vulnerabilidade.

**Figura 12 - Mapa potenciométrico do fluxo subterrâneo na área de estudo no município de Capim Grosso**



Fonte: autor (2016).

A variável ES foi obtida dos perfis de poços e do modelo geolétrico interpretado. Foram considerados os valores de resistividade de  $10^2 \Omega.m$  a  $10^4 \Omega.m$  para o estrato geolétrico superficial correspondente ao solo. Os valores da espessura do solo variaram entre 0,5 m e 5,5 m. A equação 7, que resultou para a ponderação, foi

$$y = 0,55x + 0,05. \quad (7)$$

Os dados de DT foram obtidos diretamente dos mapas topográficos disponíveis. Para cada poço selecionado foram traçadas retas horizontais de 4 km a 5 km no sentido da declividade ( $d$ ) e calculada a diferença de cota entre os dois pontos ( $i$ ). Em seguida foi calculada a tangente do ângulo entre o declive e a reta horizontal com a equação 8.

$$\tan \alpha = \frac{d}{i} \quad (8)$$

Onde:

$\alpha$ : ângulo de inclinação, ou seja, o valor da declividade (DT).

Os valores obtidos variaram entre 0,02 e 1,86 e a equação 9 foi deduzida para realizar a ponderação.

$$y = 0,19x - 0,21. \quad (9)$$

Os valores de CE foram obtidos por meio das medidas vazão, nível estático e nível dinâmico existentes nos testes de bombeamento das fichas de poços. As fichas que não continham teste de bombeamento, obtiveram esses valores por extrapolação. O valor mínimo da capacidade específica foi de  $0,008 \text{ m}^3/\text{h.m}^{-1}$  enquanto o valor máximo foi de  $1,761 \text{ m}^3/\text{h.m}^{-1}$ . A equação 10 foi utilizada para realizar a ponderação.

$$y = 0,195x - 0,187. \quad (10)$$

De acordo com Maia (2011), a recarga é um parâmetro complexo, depende de diversos fatores como pluviosidade, cobertura vegetal, tipo de aquíferos dentre outros. A área de estudo no município de Capim Grosso apresenta homogeneidade desses fatores, por isso adotou-se nesse trabalho para a recarga (RE) um valor único para todos os poços, qual seja, o valor médio ponderado equivalente a 5.

Os valores de transmissividade não foram calculados nem considerados na equação 4. Segundo Maia (2011), não é recomendado o uso da transmissividade (TA) no cálculo da vulnerabilidade aquífera em aquíferos fissurais e cársticos devido à dificuldade de bons resultados

nos testes de bombeamento.

Com os valores de todos os parâmetros calculados e ponderados, foi possível resolver a equação 4, obter os índices de vulnerabilidade

para cada poço selecionado (Tabela 2) e construir o mapa de vulnerabilidade para a área de estudo no município de Capim Grosso (Figuras 13 e 14).

**Tabela 2 - Valores dos parâmetros obtidos para o cálculo do índice de vulnerabilidade**

PONTO	UTM S	UTM E	VALORES PONDERADOS					V
			PA	ES	DT	CE	RE	
P01	357223	8726715	1.87069	1.181818	3,857143	1,173684	5,0	7,81
P02	360202	8752233	1,87069	6,818182	2,428571	1,157895	5,0	7,25
P03	372349	8747706	1.525862	1.909091	2.380952	1.3	5.0	7.90
P04	362808	8752731	4.284483	5.545455	2.142857	1.226316	5.0	7.11
P05	368674	8727349	1.698276	2.454545	2.142857	1.931579	5.0	8.39
P06	378797	8734583	3.077586	5.545455	2.142857	1.615789	5.0	7.59
P07	355757	8742438	2.301724	3.727273	1.761905	1.210526	5.0	7.48
P08	360448	8744395	5.491379	1.909091	2.047619	1.036842	5.0	7.23
P09	368299	8744675	1.612069	1.909091	1.47619	2.3	5.0	9.12
P10	360555	8740617	1.525862	1.909091	3,571429	1,036842	5,0	7,50
P11	365443	8745892	2,301724	3,727273	2,095238	1,352632	5,0	7,53
P12	368500	8747379	1,87069	3,727273	1,952381	1,473684	5,0	7,79
P13	365365	8743126	7,905172	5,545455	1,285714	1,086895	5,0	7,17
P14	364496	8740695	6,094828	5,545455	2,52381	1,063158	5,0	6,80
P15	368669	8728486	1,87069	3	3,904762	7,963158	5,0	14,09
P16	368483	8729683	1.439655	1,909091	3	1,131579	5,0	7,68
P17	361173	8744982	3,163793	4,636364	1,857143	1,036842	5,0	7,11
P18	362843	8730488	1,612069	2,454545	2,333333	1,142105	5,0	7,60
P19	368381	8739391	10,06034	1,909091	1,190476	2,963158	5,0	9,43
P20	365849	8736247	3,508621	1,909091	1,666667	1,073684	5,0	7,48
P21	394947	8735036	1,612069	1,909091	7,333333	1,036842	5,0	7,32
P22	386463	8760197	2,836207	5,545455	2,571429	1,078947	5,0	7,00
P23	378795	8758633	2,301724	3,727273	2,047619	1,142105	5,0	7,33
P24	385138	8757612	4,862069	3,727273	2,571429	1,836842	5,0	7,70
P25	390379	8750165	4,043103	1,909091	3,047619	4,247368	5,0	10,35
P26	383947	8751340	5,75	1,909091	1,333333	2,721053	5,0	9,17
P27	388871	8747979	2,75	1	2,380952	1,205263	5,0	7,99
P28	390692	8756095	6,181034	1,909091	3,047619	1,289474	5,0	7,30
P29	364737	8726810	2,301724	3,727273	5,47619	1,510526	5,0	7,40
P30	361477	8744860	1,87069	1,909091	2	1,036842	5,0	7,60
P31	358395	8729086	3,353448	1	2,095238	1,026316	5,0	7,80
P32	371012	8733411	5,75	3,727273	1,333333	1,526316	5,0	7,72
P33	370997	8737250	10,06034	3,727273	1,714286	1,710526	5,0	7,66
P34	386570	8757272	4,198276	3,727273	2,666667	10,25263	5,0	16,13
P35	381462	8734803	2,732759	4,636364	3,238095	1,457895	5,0	7,35
P36	381122	8752621	3,491379	1,909091	2,238095	2,1	5,0	8,36
P37	381270	8753757	4,87931	1	3,285714	1,094737	5,0	7,60
P38	378670	8743548	4,543103	3,727273	1,142857	1,215789	5,0	7,58
P39	377511	8730027	1,008621	1	5,380952	1,826316	5,0	9,00
P40	370189	8742132	5,663793	1	3,571429	4,942105	5,0	11,40
P41	370189	8742132	1,008621	3,727273	1,666667	1,089474	5,0	7,95
P42	387271	8746068	2,301724	10,09091	1,380952	1,194737	5,0	7,45
P43	364584	8748530	4,284483	3,727273	1,095238	1,510526	5,0	7,93
P44	365172	8752772	6,439655	4,090909	1,809524	2,247368	5,0	8,20
P45	363376	8747143	7,905172	4,090909	3,285714	1,194737	5,0	6,87
P46	379857	8758606	2,215517	3,181818	2	1,036842	5,0	7,30
P47	358137	8732372	3,344828	3,363636	1,142857	1,036842	5,0	7,51
P48	358477	8731022	3,655172	1,909091	1,571429	1,036842	5,0	7,47

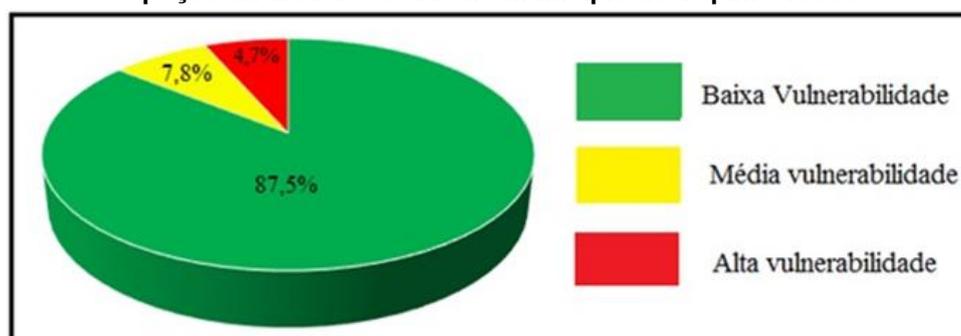
P49	355631	8730548	6,267241	2,090909	3,285714	1,036842	5,0	6,98
P50	355278	8727905	3,836207	1,909091	1,714286	1,036842	5,0	7,40
P51	392373	8734259	4,198276	2,090909	6,142857	1,036842	5,0	6,92
P52	361367	8728577	7,646552	2,272727	3,142857	1,142105	5,0	7,03
P53	355866	8758723	2,060345	1,909091	1,857143	1,105263	5,0	7,65
P54	392143	8748696	9,577586	1	2,619048	1,194211	5,0	7,68
P55	390374	8760487	2,137931	1,909091	1,142857	1,357895	5,0	8,22
P56	375307	8751062	7,474138	3,181818	1,285714	1,163158	5,0	7,39
P57	371988	8747147	1,439655	1	1,571429	1,036842	5,0	8,37
P58	376815	8753218	5,405172	1,909091	1,142857	1,257368	5,0	7,84
P59	373713	8747892	3,060345	2,090909	1	1,283158	5,0	8,09
P60	369844	8752330	2,732759	5,545455	2,47619	10,08947	5,0	16,04
P61	357330	8750158	2,301724	4,636364	5,666667	1,082105	5,0	6,91
P62	355331	8749841	2,301724	4,090909	1,142857	1,426316	5,0	7,98
P63	379886	8750741	3,163793	7,909091	1,428571	1,052632	5,0	7,20
P64	368925	8739854	10,06034	1,727273	2,047619	1,893158	5,0	8,06

Fonte: autor (2016).

Foram estabelecidos quatro níveis de vulnerabilidade baseados nos índices obtidos: valores menores ou iguais a 9 são vulnerabilidade baixa; valores entre 9,1 e 12 são vulnerabilidade média; valores de 12,1 a 18 são vulnerabilidade alta e valores superiores a 18 são vulnerabilidade extrema. Para determinação destas faixas foram considerados os valores mínimos e máximos de

cada parâmetro ponderado e assim definidos os limites inferior e superior das faixas. Dos 64 poços avaliados, 56 (87,5%) foram classificados como de baixa vulnerabilidade, apenas 5 poços (7,8%) apresentaram índice médio de vulnerabilidade e 3 poços (4,7%) foram considerados alto índice de vulnerabilidade (Figura 13).

**Figura 13 - Gráfico da distribuição dos índices de vulnerabilidade por percentual de poços na área de estudo no município de Capim Grosso**



Fonte: autor (2016).

Nenhum ponto da área de estudo no município de Capim Grosso apresentou o índice de vulnerabilidade extrema. Os índices variaram entre baixa vulnerabilidade (6,8) a alta vulnerabilidade (16,13). O mapa de vulnerabilidade mostra duas áreas com níveis de médio a alto de vulnerabilidade (Figura 14). A primeira área situa-se próxima à barragem e ao povoado do Rio do Peixe. A segunda área localiza-se na parte norte-oeste do mapa, ao norte do povoado de Junco. Nestes povoados existe o cultivo e beneficiamento de sisal, além da criação de caprinos e bovinos; dessa forma, o uso e ocupação do solo constitui-

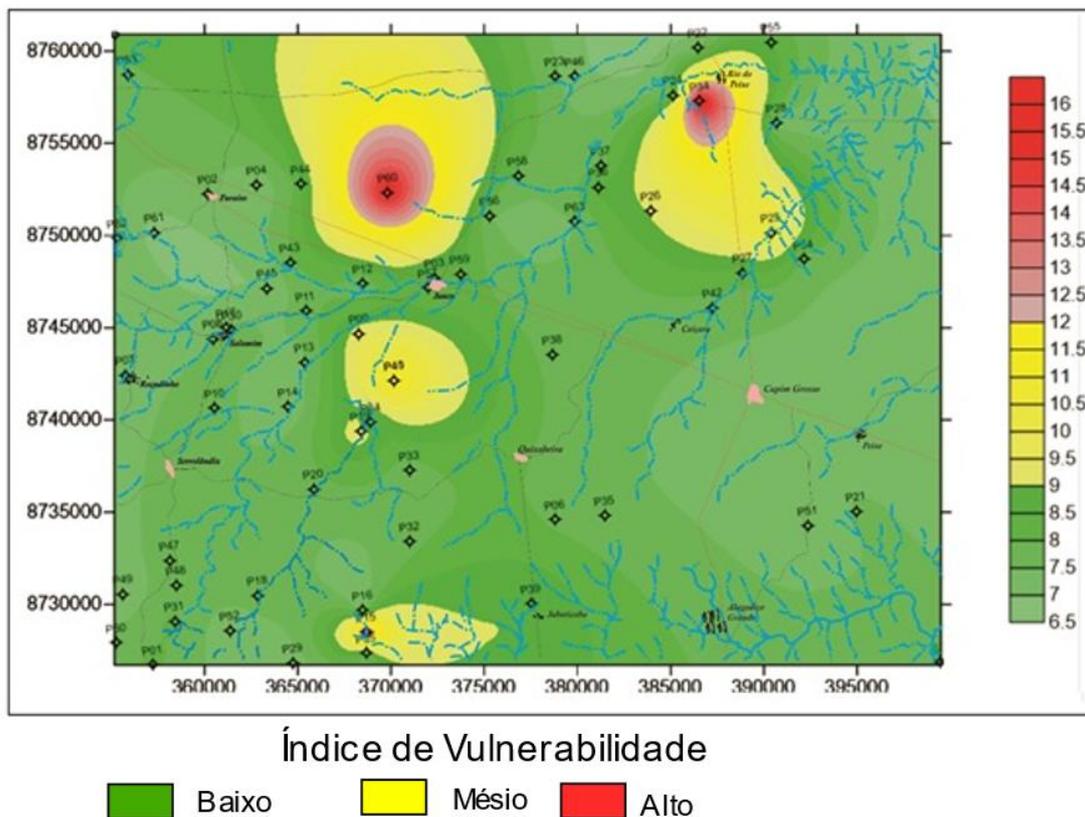
se um potencial de contaminação do aquífero. Duas áreas menores de médio índice de vulnerabilidade localizam-se uma no centro do mapa, próxima ao povoado de Junco e outra na parte mais ao sul do mapa.

A primeira área citada abrange, no contexto geológico, as rochas das Suíte São José do Jacuípe e do Complexo Tanque Novo-Ipirá, enquanto as outras três áreas situam-se sobre os sedimentos da Formação Capim Grosso. Uma vez que as litologias da Formação Capim Grosso e das rochas do embasamento cristalino são extremamente distintas, fica evidente que não

existe um controle litológico sobre os índices de vulnerabilidades calculados. Observa-se que a espessura do solo (ES) associada à capacidade específica (CE) contribuíram expressivamente

para os resultados dos índices de vulnerabilidade calculados para a área de estudo no município de Capim Grosso.

**Figura 14 - Mapa de vulnerabilidade da área de estudo no município de Capim Grosso**



Fonte: autor (2016).

### CONCLUSÃO

O uso do método geofísico elétrico com a técnica da sondagem elétrica vertical identificou zonas geológicas distintas: o regolito, os sedimentos da Formação Capim Grosso e o embasamento cristalino fraturado/alterado ou inalterado.

O aquífero poroso se encontra saturado de água salgada, inviabilizando o seu aproveitamento como manancial de abastecimento de água. O aquífero é contínuo, com espessuras que variam de 2,7 m a 44,1 m, representado pela fácies arenosa da Formação Capim Grosso, com exceção dos níveis argilosos superiores. Compreende também os horizontes intemperizados do embasamento cristalino.

O nível estático da água subterrânea na área de estudo corresponde ao topo da Formação Capim Grosso e está a profundidade de 3,2 m a

13,4 m da superfície. A superfície potenciométrica acompanha a topografia da área e situa-se a profundidade entre 0,3 m e 9,9 m e média de 5,07 m.

O aquífero fissural é acoplado ao poroso que lhe serve como recarga. Ele é formado por sistema de fratura existente no embasamento cristalino e por bolsões da própria rocha alterada. Foram identificadas zonas fraturadas de até 94 m de profundidade.

A aplicação do método MAIA na área de estudo no município de Capim Grosso resultou em índices de vulnerabilidade baixos em 87,5% dos poços avaliados, 7,8% apresentaram índices médios e apenas 4,7% altos. Não existe controle litológico sobre essas áreas de médio e alto índices de vulnerabilidade. As variáveis que mais contribuíram para esses resultados foram a espessura do solo e a capacidade específica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Serviço Geológico de Brasil (SGB), pelos dados de eletrorresistividade, e ao Centro de Pesquisa em Geologia e Geofísica (CPGG) pelo equipamento geofísico.

## REFERÊNCIAS

BAHIA. Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração. Superintendência de Geologia e Recursos Minerais. **Geologia da Bahia**: texto explicativo para o mapa geológico ao milionésimo. Coordenação de Johildo Salomão Figueiredo Barbosa e José Maria Landim Dominguez. Salvador: Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração; Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 1996, 400 p., il.

BAHIA. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia. Divisão político-administrativo do Estado da Bahia. 2000. Disponível em: [http://www.sei.ba.gov.br/site/geoambientais/mapas/pdf/mapa\\_divpoladm\\_ba2000.pdf](http://www.sei.ba.gov.br/site/geoambientais/mapas/pdf/mapa_divpoladm_ba2000.pdf). Acesso em: 6 fev. 2014.

BRAGA, A. C. de O. 1. ed. **Geofísica aplicada**: métodos geoeletricos em hidrogeologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. CPRM – Serviço Geológico Nacional. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Capim Grosso – Bahia. Organização de Ângelo Trevia Vieira, Felicíssimo Melo, Hermínio Brasil Vilaverde Lopes, José Cláudio Viégas Campos, Luiz Fernando Costa Bomfim, Pedro Antônio de Almeida Couto e Sara Maria Pinotti Bevenuti. Salvador: CPRM, 2005. Disponível em: [https://rigeo.sgb.gov.br/jspui/bitstream/doc/16848/1/Rel\\_Capim%20Grosso.pdf](https://rigeo.sgb.gov.br/jspui/bitstream/doc/16848/1/Rel_Capim%20Grosso.pdf). Acesso em:

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento-SNIS. 2023. Disponível em: <https://www.snis.gov.br>. Acesso em: 1 out. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. CPRM – Serviço Geológico Nacional. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil– PLGB. Serrinha – Folha SC.24-Y-D. Estado da Bahia. Escala 1:250.000. Organização de Roberto Campêlo de Melo, Herman Santos Cathalá

Loureiro e Luiz Henrique Monteiro Pereira. Brasília: CPRM, 2001. Disponível em: [https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/8683/1/Rel\\_Serrinha.pdf](https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/8683/1/Rel_Serrinha.pdf). Acesso em: CASAS, A. *et al.* Assessing aquifer vulnerability to pollutants by electrical resistivity tomography (ERT) at a nitrate vulnerable zone in NE Spain. **Environmental Earth Science**, v. 54, n. 3, p. 515–520, abr. 2008. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/226053040\\_Assessing\\_aquifer\\_vulnerability\\_to\\_pollutants\\_by\\_electrical\\_resistivity\\_tomography\\_ERT\\_at\\_a\\_nitrate\\_vulnerable\\_zone\\_in\\_NE\\_Spain](https://www.researchgate.net/publication/226053040_Assessing_aquifer_vulnerability_to_pollutants_by_electrical_resistivity_tomography_ERT_at_a_nitrate_vulnerable_zone_in_NE_Spain). Acesso em:

CAVALCANTI, S. S. **Qualificação dos recursos hídricos subterrâneos do aquífero Recôncavo na bacia do rio Capivara**. 2006. 121p. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. Recife: CPRM; Laboratório de Hidrogeologia da UFPE, 1997.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. Groundwater Pollution Risk Assessment: a methodology using available data. World Health Organization, Pan American Health Organization, Environmental Health Program (HPE). Lima, Peru: CEPIS, 1988. 73p.

GEMAIL, K. *et al.* Assessment of aquifer vulnerability to industrial waste using resistivity measurements. A case study, along El-Gharbyia main drain, Nile Delta, Egypt. **Journal of Applied Geophysics**, v. 75, n. 1, p. 140-150, set. 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/236591517\\_Assessment\\_of\\_aquifer\\_vulnerability\\_to\\_industrial\\_waste\\_water\\_using\\_resistivity\\_measurement\\_s\\_A\\_case\\_study\\_along\\_El-Gharbyia\\_main\\_drain\\_Nile\\_Delta\\_Egypt](https://www.researchgate.net/publication/236591517_Assessment_of_aquifer_vulnerability_to_industrial_waste_water_using_resistivity_measurement_s_A_case_study_along_El-Gharbyia_main_drain_Nile_Delta_Egypt). Acesso em:

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Banco de dados meteorológicos. Disponível em: <http://bancodedados.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 1 mar. 2016.

IRIS INSTRUMENTS. **Syscal R2**. 2024.

Disponível em: <https://www.iris-instruments.com/syscal-r2.html>. Acesso em: 9 nov. 2024.

KOSIN, M. *et al.* Geologia do segmento norte do orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá e guia de excursão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, p. 15-26, mar. 2003. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/324904900\\_GEOLOGIA\\_DO\\_SEGMENTO\\_NORTE\\_DO\\_OROGENO\\_ITABUNA-SALVADOR-CURACA\\_E\\_GUIA\\_DE\\_EXCURSAO](https://www.researchgate.net/publication/324904900_GEOLOGIA_DO_SEGMENTO_NORTE_DO_OROGENO_ITABUNA-SALVADOR-CURACA_E_GUIA_DE_EXCURSAO). Acesso em:

LIMA, O. A. L. de. Estruturas geológica e hidroquímica do sistema aquífero cristalino da bacia do alto rio Curaçá, semiárido da Bahia. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 3, p. 445-461, set. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbg/a/vmMzMN96g6Twbz4W86JMXgS/?lang=pt>. Acesso em:

MAIA, P. H. P. **Um novo método para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos**. 2011. 133f. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

MAIA, P. H. P.; CRUZ, M. J. M. Um novo método para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 5, n. 2, p. 29-40, 2011. Disponível em: <https://periodicos.univali.br/index.php/bjast/issue/view/201>. Acesso em:

MAIA, P. H. P.; CRUZ, M. J. M. Proposta de modificações no método MAIA para avaliar a vulnerabilidade do aquífero Urucuia. **Cadernos de Geociências**, v. 10, n. 2, p.150-157, nov. 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/cadgeoc/artic/e/view/8339/6483>. Acesso em:

METNI, M. *et al.* Groundwater resources in Lebanon: A vulnerability assessment. **Water Resource Development**, n. 20, p.475-491, 2004. Não consegui o endereço eletrônico

NEVES, B. B. B.; FEITOSA, E. C. Proposição e estudos geológicos preliminares da Formação Capim Grosso. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 23, Boletim especial n. 1. Salvador, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 60-61, 1969 (digitalizado). Disponível em: <https://www.sbgeo.org.br/home/pages/44>. Acesso em:

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Ground water vulnerability assessment: contamination potencial under conditions of uncertainty. Washington, D. C.: National Academy Press, 1993. Disponível em: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/2050/ground-water-vulnerability-assessment-predicting-relative-contamination-potential-under-conditions>. Acesso em:

OBIORA, N. D.; IBUOT, J. C. Geophysical assessment of aquifer vulnerability and management: a case study of University of Nigeria, Nsukka, Enugu State. **Applied Water Science**, v. 10, n. 29, jan. 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/337907511\\_Geophysical\\_assessment\\_of\\_aquifer\\_vulnerability\\_and\\_management\\_a\\_case\\_study\\_of\\_University\\_of\\_Nigeria\\_Nsukka\\_Enugu\\_State](https://www.researchgate.net/publication/337907511_Geophysical_assessment_of_aquifer_vulnerability_and_management_a_case_study_of_University_of_Nigeria_Nsukka_Enugu_State). Acesso em:

OLIVEIRA, I. B. de; NEGRÃO, F. I.; SILVA, A. G. L. S. Mapeamento dos aquíferos do Estado da Bahia utilizando o Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas – IQNAS. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 21, n.1, p. 123-137, 2007. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/16176/10695>. Acesso em:

ORELLANA, E. **Prospeccion geoelectrica em corriente continua**. Ed. Paraninfo, 1972.

RIOS, D. A. de C.; CRUZ, M. J. M. Groundwater Quality of Capim Grosso Region, Bahia, Brazil. **Journal of Research in Humanities and Social Science**, v. 5, n. 6, p. 52-59, 2017. Disponível em: <https://www.questjournals.org/jrhss/papers/vol5-issue6/I565259.pdf>. Acesso em:

SILVA, C. C. N. da *et al.* Aquífero fissural no semiárido: análises de modelos com base geológicos-estruturais e métodos geofísicos aeroportados e terrestres. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 37, n. 2, 2023. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/30197/19481>. Acesso em:

TEIXEIRA, L. R. **O Complexo Caraiba e a Suíte São José do Jacuípe no Cinturão Salvador-Curaçá (Bahia, Brasil)**: petrologia, geoquímica e potencial metalogenético. 1997. 201p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de

Geociências, Universidade Federal da Bahia,  
Salvador, 1997.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R.  
E. **Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge  
University Press, 1990.