

Contribuição ao conhecimento do comportamento hidráulico de um aquífero fissural na região semiárida do Brasil

Contribution to the knowledge of the hydraulic behavior of the fissural aquifer in the semiarid region of Brazil

Gisely Maria da Silva¹; José Geilson Alves Demétrio²;

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, Brasil. Email: giselymaria.silva@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7861-8199>

² Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, Brasil. Email: jose.demetrio@ufpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4908-4888>

Resumo: Os aquíferos fraturados, em sua maioria, ocorrem em rochas cristalinas sendo marcados por uma baixa porosidade e baixa capacidade de produção. A área estudada localiza-se na porção sudeste do município de Passira (PE). Esta região destacou-se por apresentar poços com vazões acima da média esperada para o contexto do semiárido. Para levantar hipóteses que justifiquem essas vazões anômalas, foram realizadas atividades de campo, cadastro de 62 poços e 7 ensaios de bombeamento com duração de até 60 minutos. Foram coletadas informações de nível estático, vazão e condutividade elétrica da água. Observou-se que a área está inserida geologicamente no Complexo Metanortosítico de Passira, que é composto por rochas anortosíticas com intenso fraturamento. Esse fraturamento, juntamente com as características da rocha em si são favoráveis ao armazenamento e percolação da água. No entanto, a maior parte dos poços atualmente encontram-se desativados ou com vazões abaixo das iniciais. Sugere-se que esse cenário tenha mudado devido a grande exploração de água, aliada à grande quantidade de novos poços perfurados e à baixa recarga. Assim, embora a rocha apresente boas condições de armazenamento, a heterogeneidade do aquífero leva a limitações na sua capacidade de produção, sendo essencial um monitoramento para a melhor gestão do aquífero.

Palavras-chave: Aquíferos fraturados; Metanortosito; Vazões anômalas.

Abstract: Most fractured aquifers occur in crystalline rocks and are marked by low porosity and low production capacity. The studied area is located in the southeastern portion of the municipality of Passira (PE). This region stood out for presenting wells with flow rates above the expected average for the context of the semiarid region. To raise hypotheses that justify these anomalous flows, field activities were carried out, 62 wells registered and 7 pumping tests performed lasting up to 60 minutes. Information on static water level, flow rate and electric conductivity was registered. It was observed that the main lithotype of the area is the Metanortositic Complex of Passira (CMAP), which is composed of anortositic rocks with intense fracturing. This fracturing, together with the characteristics of the rock itself, are favorable to the storage and percolation of water. However, most of the wells are currently deactivated or with flow rates below the initial ones. It is suggested that this scenario has changed due to the large exploitation of water, coupled with the large number of new wells drilled and the low recharge rates. Thus, although the rock has good storage characteristics, the heterogeneity of the aquifer limits its production capacity. Hence monitoring is essential for a better management of the aquifer.

Keywords: Fractured aquifers; Metanorthosite; Anomalous flows.

1. Introdução

O semiárido nordestino é caracterizado por baixas precipitações relativas e, em sua grande maioria, a geologia local é composta por rochas cristalinas. Estas rochas possuem baixa capacidade de produção de água e baixa porosidade primária, quando comparadas ao meio poroso, dessa forma, a água nesse sistema encontra-se nas suas fraturas e descontinuidades. Estas descontinuidades torna esse meio heterogêneo e anisotrópico. Além disso, a escassez das chuvas tende a formar mantos de alteração pouco espessos, que juntamente com o predomínio do intemperismo físico, reduz o acúmulo de água que recarrega as fraturas. No contexto geral, a disponibilidade hídrica é limitada e o sistema hidrogeológico complexo. A média de vazão para os poços no cristalino do nordeste brasileiro é de 3,02 m³/h, segundo um levantamento feito pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) entre o final da década de 90 e 2003 (DEMÉTRIO *et al.*, 2007). A área de interesse nesse estudo, teve um destaque no final da década de 90 por pesquisadores que observaram vazões maiores que a média geral, chegando a 20 ou 30 m³/h em diversos poços. Esses dados foram constatados em campo por um dos autores do presente trabalho e não foram publicados. Dessa forma, até então, não houveram estudos que esclarecessem o sistema hidrogeológico da região. O objetivo desse trabalho é entender o contexto do aquífero, levantando hipóteses que justifiquem essas anomalias de vazão observadas.

1.1 Localização da área de estudo

A área de estudo encontra-se no distrito de Bengala, município de Passira, agreste do estado de Pernambuco. O acesso a partir de Recife é feito através das rodovias pavimentadas BR-232, PE- 50 e PE-95, com percurso total de aproximadamente 100 km (Figura 1).

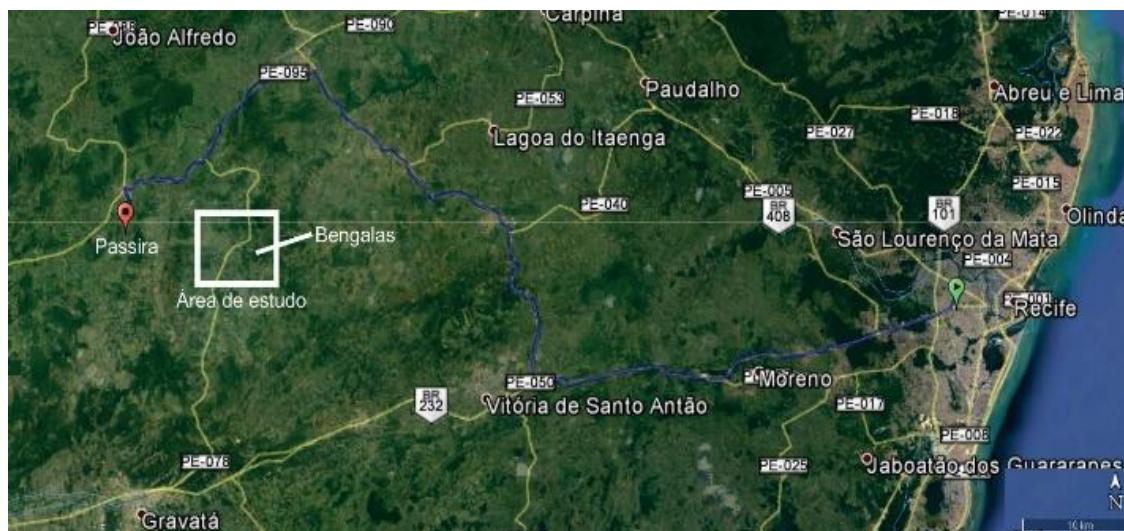


Figura 1 – Vias de acesso para o município de Passira (PE), a partir de Recife. Em destaque está a área de estudo.
Fonte: Imagem Landsat disponível no software Google Earth..

1.2 Contexto Geológico e Hidrogeológico

A área estudada situa-se geologicamente na subprovíncia Central ou Zona Transversal da Província Borborema (PB) (Figura 2), proposta inicialmente por Almeida *et al.* (1977; 1981). O aquífero é formado pelas rochas do Complexo Metanortosítico de Passira (CMAP). Os estudos geológicos desse complexo iniciaram na década de 70 com Sial & Menor (1973), Guimarães (1979) e da Silva Filho (1979), sendo esses trabalhos focados na descrição geológica, petrografia e ocorrências de Fe-Ti-V. Na década de 90, a CPRM realizou o mapeamento da área na escala de 1:100.000 (BARBOSA, 1990; ROCHA, 1990) que são parte da folha Vitória de Santo Antão e Limoeiro. Accioly (2000) destaca-se por descrever o CMAP com uma abordagem geoquímica e tectônica. O CMAP é composto principalmente por metanortositos maciços de granulação média a grossa, também sendo encontrados metagabros, metanortositos foliados e metanoridos subordinados.

O complexo encontra-se limitado pelas zonas de cisalhamento Paudalho e Limoeiro. Há ocorrências de ortognaisses graníticos intercalados ao CMAP. Esta litologia destaca-se topograficamente apresentando-se em formato de serras com direção NE-SW variando para N-S. Accioly *op. cit* destaca os plutons de Passira, Bengala, Sipuá e Candiais. Também ocorre uma série de diques de composição diorítica, deformados, orientados, como intercalações nos metanortositos ou encaixados nos ortognaisses tonalíticos do embasamento.

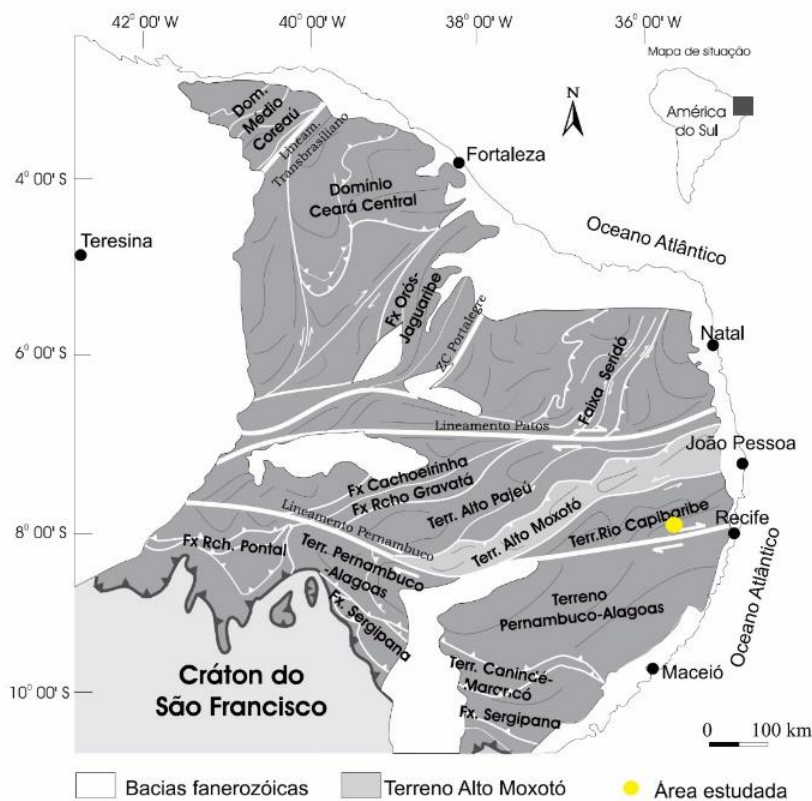


Figura 2 – Compartimentação tectônica da Província Borborema e área estudada em destaque.

Fonte: Modificado de Santos *et. al.*, 2004.

Dentro do contexto hidrogeológico, o sistema aquífero dominante é composto pelo CMAP, fraturado, livre e pouco profundo, variando de 50 a 60 m. A maior parte do aquífero está sob coberturas residuais de alteração da própria rocha. O fluxo subterrâneo é complexo, pois ocorre por meio da rede de fraturas obedecendo regionalmente às direções preferenciais das fissuras da rocha. Em 2005, o Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea realizado pela CPRM cadastrou 123 pontos d'água em todo município de Passira, sendo 122 poços tubulares e 1 poço tipo Amazonas. Desse total, 71 poços encontravam-se em operação e outros 9 poços foram descartados (abandonados) por se encontrarem secos ou obstruídos. Os 42 poços restantes estariam paralisados ou não instalados por motivos diversos. Na região existem cerca de 100 poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM) até o ano de 2019, porém, muitos desses poços não existem mais ou encontram-se abandonados. Por outro lado, também houve uma crescente quantidade de novos poços que atualmente não estão cadastrados. O uso mais frequente da água na região é a irrigação, como exemplo tem-se milho, feijão, pimentão, alface, coentro, quiabo e outros. Além disso, a água também é destinada para o uso animal e doméstico (Figura 3). Apesar do sistema aquífero fraturado não possuir boa capacidade de produção, os poços da região destacam-se com elevadas vazões e dessa forma há uma grande procura por perfurar mais poços, sempre de forma desordenada.

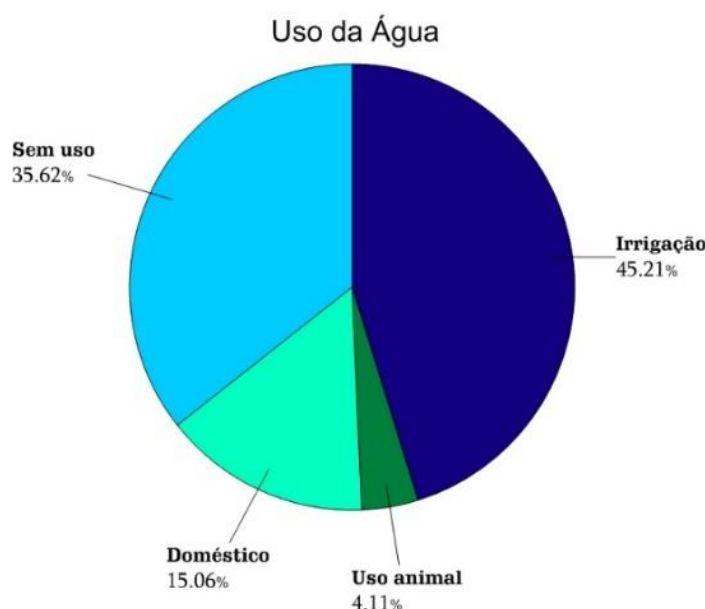


Figura 3 – Distribuição do uso da água na região de acordo com o cadastramento de poços realizado.

Fonte: Do autor, 2021.

2. Metodologia

A metodologia empregada no presente trabalho compreendeu, além da pesquisa bibliográfica acerca da área estudada, quatro etapas: (i) estudos de afloramentos; (ii) cadastro de poços; (iii) ensaios de bombeamento e (iv) tratamento e interpretação de dados. Foi realizado um cadastramento de poços para complementar as informações acerca da condição atual dos poços. Foram cadastrados 62 poços em toda área e, quando possível, medidos os Níveis Estáticos (NE) ou Níveis Dinâmicos (ND), coletadas amostras de água para medidas em campo de Condutividade Elétrica da água (CE), enquanto que para a medida de vazão dos poços (Q) utilizou-se um medidor ultrassônico (PORTAFLOW 330), permitindo a coleta dos dados sem alterar a tubulação já existente. Os parâmetros geológicos e hidrogeológico foram reunidos no *software* Arc Gis 10.2 e para as demais interpretações e construção de gráficos fora utilizado o Excel integrado com o *software* gráfico Grapher 9.

3. Resultados e discussão

Em toda área estudada não foram observadas grandes variações litológicas (Figura 4), sendo a predominância dos metanortositos do CMAP com suas mudanças composicionais, ora mais feldspatos félsicos, ora mais minerais máficos. Todo o complexo encontra-se intensamente fraturado e intemperizado, sendo escassos os afloramentos e em muitos casos mascarados por solos resultantes do intemperismo da própria rocha. Além do CMAP observou-se a presença de gnaisses migmatizados na porção oeste da área, em menor estado de intemperização. Há também a presença de intercalações de ortognaisses graníticos formando morros mais elevados. Morfologicamente o CMAP ocupa as áreas mais arrasadas, enquanto os ortognaisses graníticos destacam-se no relevo.

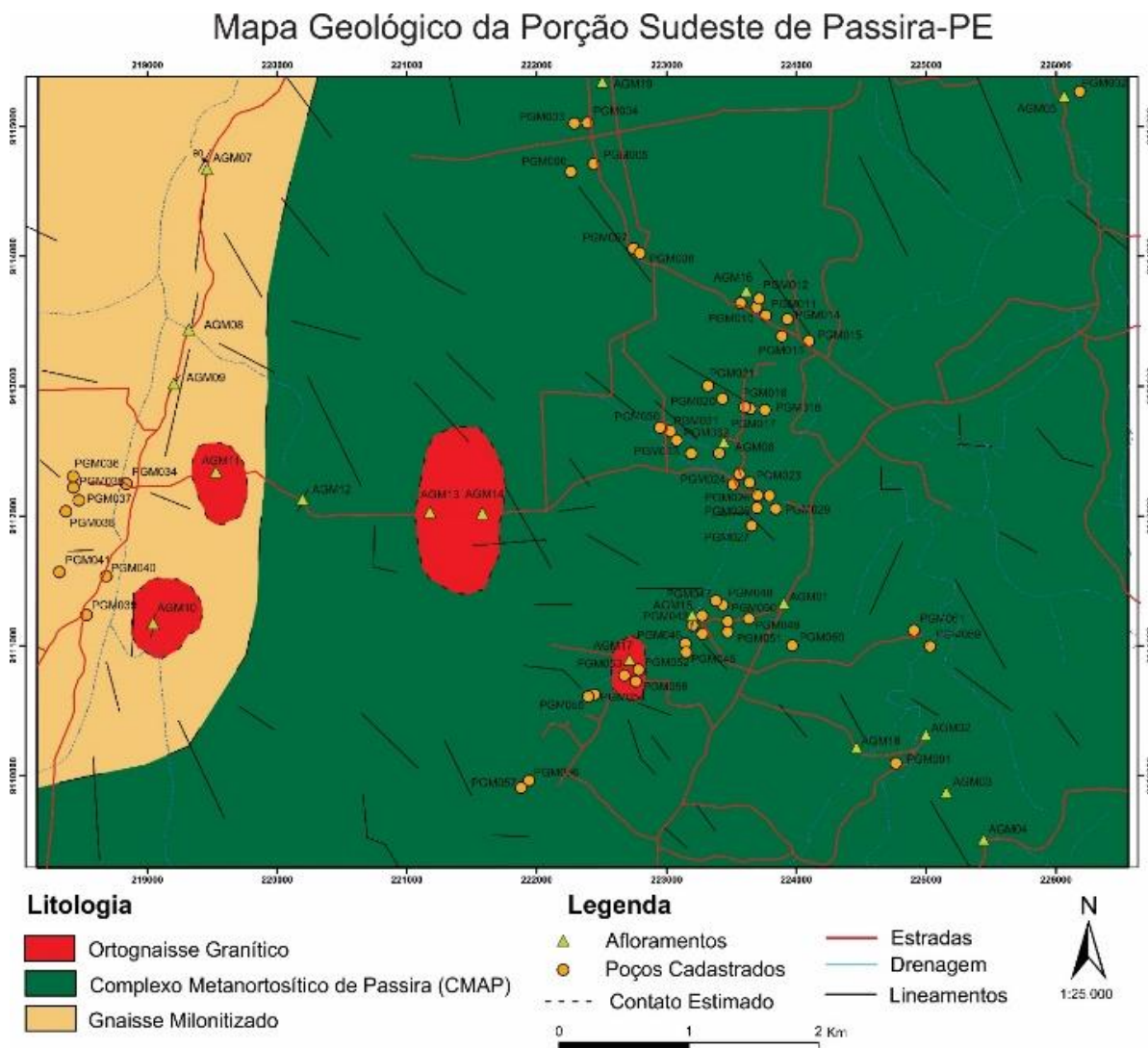


Figura 4 – Mapa geológico da área estudada.

Fonte: Do autor, 2021.

3.1 O Complexo Metanortosítico de Passira (CMAP)

As rochas do CMAP possuem textura maciça, granulação média a grossa e sua mineralogia é composta majoritariamente por plagioclásio, hornblenda, biotita e epidoto (Figura 5A). Dentro do CMAP há variações de composição, algumas mais gabróicas, e presença de diques com minerais de composição mais potássica (Figura 5B) e direção NE-SW. Observam-se lentes de anfibólitos possivelmente ligadas às fontes de mineralização de Fe e Ti descritas por Guimaraes & Silva Filho (1979) (Figura 5C). Estes anfibolititos são compostos majoritariamente por hornblenda e biotita. Os metanortositos possuem foliação sub-horizontal com direção N-S e esse bandamento é composto pelos plagioclásios alternados com os minerais máficos formando a foliação principal “Sp”. A Figura 5D mostra os dois principais sistemas de fraturas da rocha (NE-SW e NW-SE), todo o complexo encontra-se bastante fraturado.

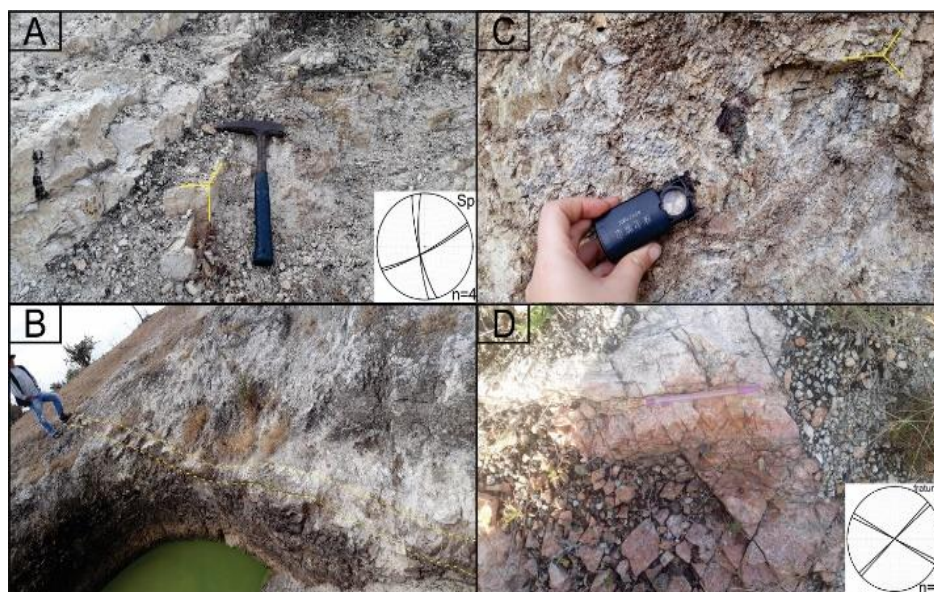


Figura 5 – A) Visão geral do CMAP com destaque para os 3 planos de quebra da rocha. B) dique no CMAP. C) Enclave anfibolítico. D) Destaque para a grande quantidade planos de fraturas no CMAP.

Fonte: Do autor, 2021.

A existência e quantidade de água no meio subterrâneo, nas rochas cristalinas, vai depender da densidade, abertura e conectividade das fraturas. Regionalmente pode-se avaliar a orientação das principais famílias de fraturas, porém, todas as outras propriedades como comprimento, densidade, conexão e abertura são pontuais e dependentes da escala. Portanto, a mesma rocha pode variar de região para região em diversos aspectos, afetando a vazão dos poços e qualidade da água. Uma única fratura pode apresentar condutividade hidráulica mais elevada, porém o armazenamento e comportamento do aquífero em longo prazo depende da densidade desse fraturamento, bem como sua conectividade. Dos fatores que controlam o fluxo de água subterrânea no meio fissural temos presente no CMAP uma grande quantidade de lineamentos com pelo menos duas famílias de fraturas (Figura 5). Toda rocha encontra-se bastante fraturada, o que favorece o armazenamento e a percolação de água. Além disso, o manto de intemperismo presente na área auxilia na recarga do aquífero, apesar de não apresentar continuidade. Quando presente, esse material absorve a precipitação e recarrega as fraturas. Avaliar o fluxo através desse manto inconsolidado não é simples, pois esse material não é homogêneo tanto lateral quanto verticalmente. O controle exercido pela litologia apesar de ser subordinado à tectônica destaca-se por ser composto por rochas com planos de descontinuidades, como os próprios planos de clivagem do feldspato, o que durante a deformação resiste menos à ruptura, pois está ligado ao módulo de elasticidade E da rocha. Somada a isso, a foliação da rocha também favorece a abertura de fraturas e conseqüentemente, maior armazenamento da água. Essas características físicas e texturais influenciam na sua resistência ao cisalhamento, pois todo o CMAP apresenta textura média a grossa, o que o torna mais quebradiço em relação a rochas com textura fina.

3.2 Hidrogeologia Local

Foram cadastrados 62 poços na área de estudo (Figura 6). Em cada ponto foram levantadas informações como coordenadas geográficas, proprietário do poço, ano de construção, profundidade do poço, regime de funcionamento e uso da água. Sempre que possível foram medidos os NE, CE e Q. Os ensaios de bombeamento executados em terrenos cristalinos servem como um comparativo, ou melhor, um valor equivalente e devem ser interpretados com cautela, pois, nos aquíferos porosos o bombeamento pode durar 24h ou mais e utilizam equações pré-estabelecidas que avaliam a Transmissividade (T), Condutividade Hidráulica (K) e Coeficiente de Armazenamento (S) do aquífero, porém, esses cálculos levam em consideração condições de contorno específicas desse meio (FEITOSA, 2008). Nesse modelo de meio poroso equivalente, utilizou-se a equação de Theis (1935). Em relação à duração dos ensaios de bombeamento, pela descontinuidade espacial do aquífero e inúmeros fatores como a viabilidade do bombeamento por mais tempo, foram feitos

ensaios de até 60 min, com o objetivo de avaliar o comportamento do aquífero durante o bombeamento. Foram realizados sete ensaios de bombeamento nos seguintes poços: PGM01, PGM09, PGM042, PGM054, PGM057, PGM061 e PGM062.

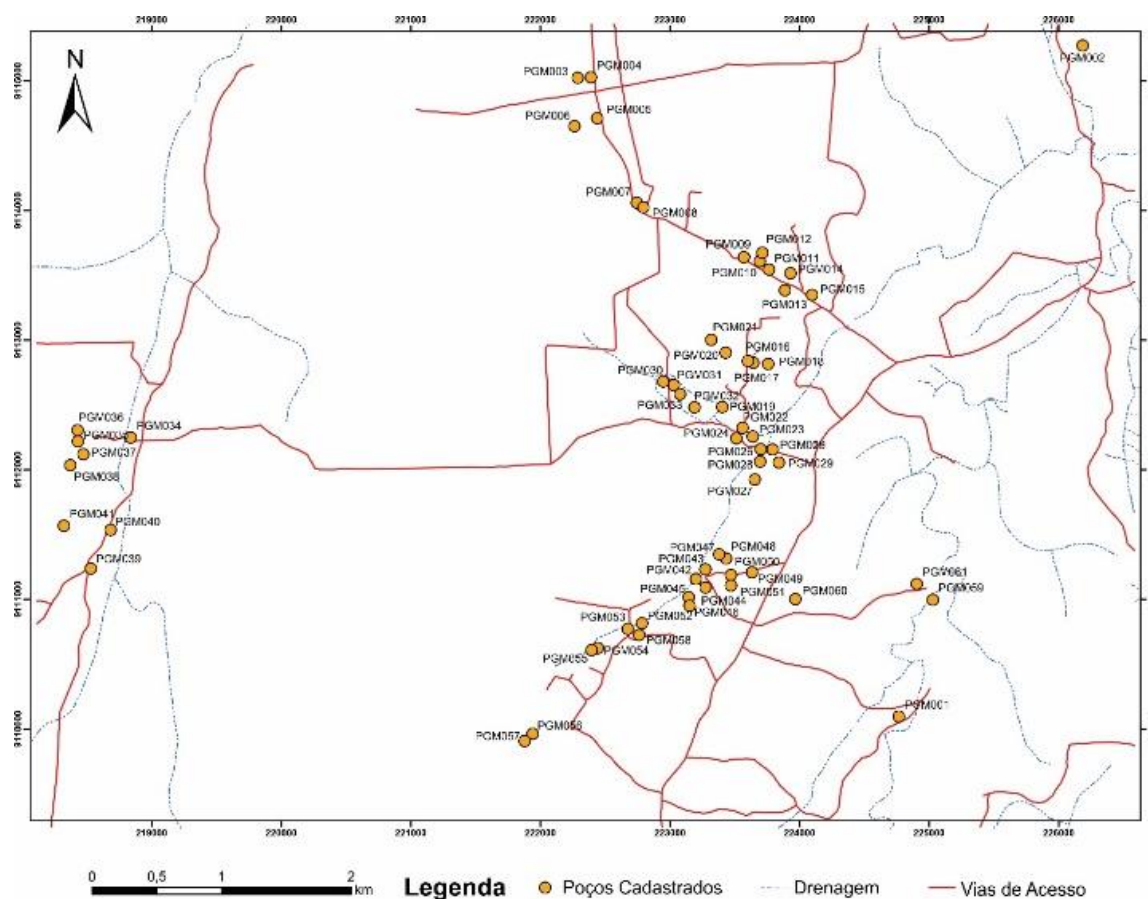


Figura 6 – Mapa da área de estudo com todos os poços cadastrados.

Fonte: Do autor, 2021.

Alguns poços, como não havia dispositivo de regulação, apresentaram uma queda na vazão ao longo do teste, o que é comum em aquíferos fissurais. Nos casos em que a vazão não é constante pode-se abordar de duas maneiras: uma é observar a recuperação no poço bombeado, a outra é utilizar o rebaixamento específico (sw/Q), ou seu inverso, que é a vazão específica (Q/sw). Os resultados são demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores calculados de Transmissividade

Poço	T (sw/Q) [m ² /s]	T (recuperação) [m ² /s]	Cooper-Jacob [m ² /s]
PGM01	$7,48.10^{-06}$	$5,21.10^{-06}$	-
PGM09	$4,75.10^{-05}$	-	-
PGM042	$6,11.10^{-05}$	-	$8,08.10^{-05}$
PGM054	$1,80.10^{-05}$	-	$1,94.10^{-05}$
PGM057	$8,11. 10^{-03}$	-	$9,90. 10^{-03}$
PGM061	$5,27.10^{-05}$	-	-
PGM062	$2,02.10^{-03}$	-	$1,95.10^{-03}$

Fonte: Do autor, 2021.

Os valores apresentados na Tabela 2 fortalecem o entendimento acerca da condição de heterogeneidade do aquífero. Uma das hipóteses iniciais para as altas vazões seria que o aquífero teria um grau de fraturamento tão alto que seu comportamento se aproximaria de um meio poroso. Porém, com os ensaios de bombeamentos e a geologia, percebeu-se o aquífero heterogêneo e essa hipótese foi descartada. Os valores de T variaram na ordem de 10^{-3} a 10^{-6} (m^2/s), esses valores mostram o aquífero heterogêneo e, embora seja possível delinear as regiões com maiores transmissividades, essa demarcação não é garantida, pois localmente e verticalmente a distribuição das famílias de fraturas pode mudar e com isso alterar a produtividade do poço naquele ponto. No caso do poço PGM042, onde foram feitos dois ensaios de bombeamento, na primeira etapa de campo o nível da água desceu rapidamente, a vazão caiu pela metade em menos de cinco minutos, e em seis minutos de teste encerrou-se o bombeamento, pois o ND atingiu o crivo da bomba. Cerca de seis meses depois, na segunda etapa de campo, os níveis estáticos da região subiram e notou-se uma diferença. Dessa vez, a vazão manteve quase que constante e foi possível realizar o teste normalmente. Certamente o período chuvoso contribuiu para subida de nível e cobriu um trecho mais fraturado que armazenou uma boa parte da água (Figura 7).

Tabela 2 – Valores de Transmissividade média dos poços realizados os ensaios de bombeamento.

Poço	T (m^2/s)
PGM001	$6,34.10^{-06}$
PGM009	$4,75.10^{-05}$
PGM042	$7,10.10^{-05}$
PGM054	$1,87.10^{-05}$
PGM057	$9,00.10^{-03}$
PGM061	$5,27.10^{-05}$
PGM062	$1,98.10^{-03}$

Fonte: Do autor, 2021.

A Figura 7 mostra um comparativo entre a média histórica, calculada com dados de 1998 a 2018, e o ano de 2019 para esses meses. Com exceção do mês de maio, todos os meses de 2019 tiveram precipitações maiores do que a média histórica. Em períodos mais secos, a queda de nível faz com que as fraturas mais produtoras sejam descobertas e a vazão caia consideravelmente.

3.3 Vazão dos poços

Os valores de vazão para os poços no cristalino normalmente são baixos, em média $3 m^3/h$. A motivação inicial dessa pesquisa era entender porque tantos poços na região apresentavam vazões elevadas, muitas vezes mais que $20 m^3/h$. Porém, ao dar início à coleta de dados, constatou-se um cenário diferente. Muitos dos poços haviam secado ou tiveram reduções de 50 a 90% em suas vazões (Tabela 3). A etapa de cadastramento dos poços foi importante para buscar informações com os proprietários acerca da condição hídrica do local. Muitos moradores relataram um quadro semelhante, em que há cerca de 10 a 20 anos os poços da região tinham vazões mais elevadas, da ordem de 10, 15 ou até mais de $30 m^3/h$ (Figura 8A). Com o tempo esse quadro mudou e poucos são os poços com altas vazões atualmente. Foram medidas vazões em 18 poços e o resultado encontra-se na Figura 8B. Percebe-se que muitos eram os poços com vazões acima de $5 m^3/h$, cerca de 50% dos dados informados. Hoje, com os dados medidos, temos cerca de 20% dos poços com vazão acima desse valor.

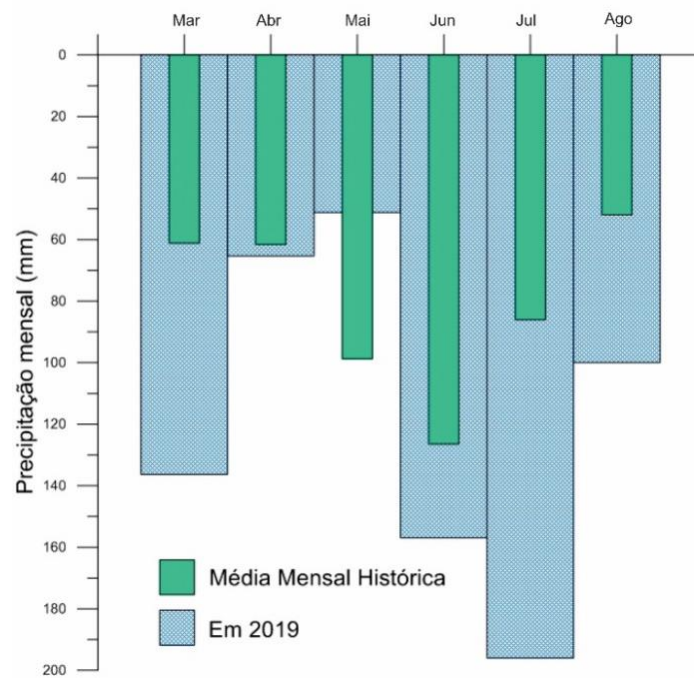


Figura 7 – Comparação entre as chuvas de março a agosto de 2019 e a média mensal histórica.
Fonte: Do autor, 2021.

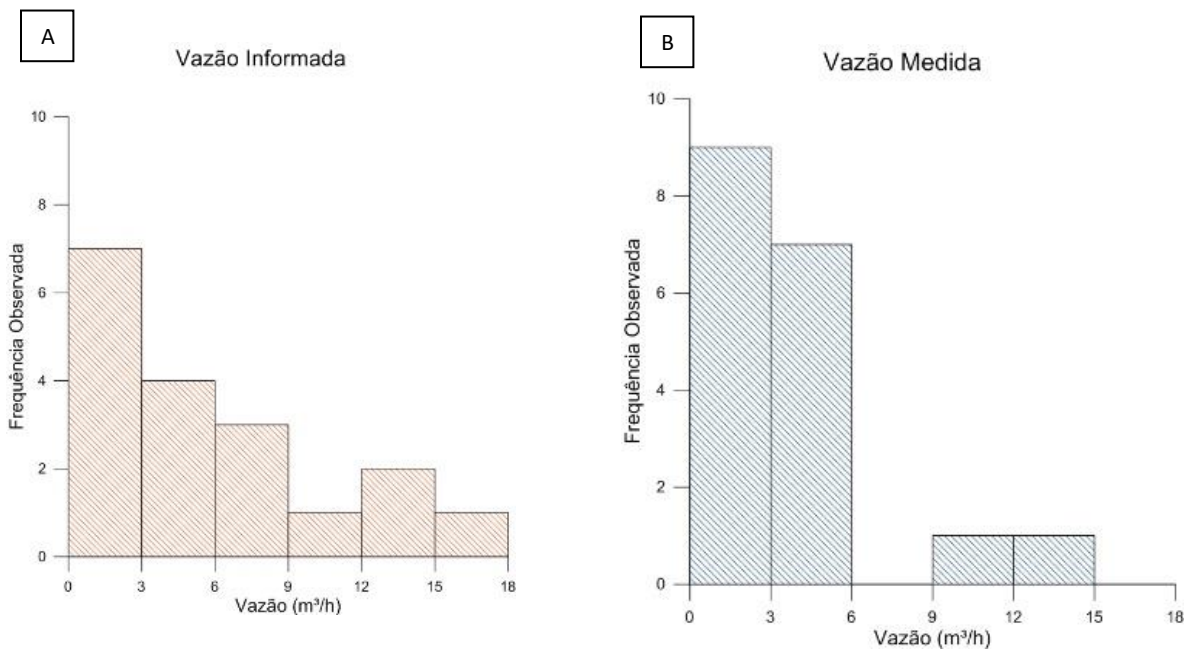


Figura 8 – A) Distribuição de vazão informada pelos proprietários há cerca de 10 a 20 anos. B) Vazões medidas em campo atualmente.
Fonte: Do autor, 2021.

Os poços mais antigos, em sua maioria, tiveram redução de vazão. Foram construídos alguns poços aglomerados para irrigação durante o levantamento desses dados. Esses poços haviam sido perfurados cerca de um mês antes do cadastro de poços e foram obtidas boas vazões (Tabela 3). Apesar de não ter sido possível no primeiro momento medir o valor dessas vazões, a área irrigada era compatível com valores altos de vazões declaradas. Na segunda etapa de campo (março de 2019) percebeu-se que muitos desses poços haviam sido desativados por conta da baixa produtividade, pois alguns tiveram sua vazão reduzida em 70 a 90 %.

Tabela 3 – Comparativo dos valores de vazão entre agosto de 2018 a março de 2019.

Poço	Q _{informada} (m ³ /h) Ago/18	Q _{medida} (m ³ /h) Mar/19
PGM020	18,000	4,880
PGM021	9,000	0,920
PGM022	6,000	0,786

Fonte: Do autor, 2021.

Assim, nota-se que inicialmente há uma boa produtividade, provavelmente relacionada ao armazenamento de água em fraturas produtoras ainda não exploradas, mas que com o tempo de utilização essa vazão cai por se tratar de um reservatório limitado, onde não há uma continuidade espacial. Outro fator que contribui para essa queda de vazão é superexploração do aquífero. A falta de conhecimento acerca da capacidade de produção do aquífero leva os proprietários dos poços a utilizarem mais água do que o viável para uma demanda de longa duração. Muitos são os relatos de proprietários que utilizam a água para agricultura, alguns até plantaram culturas que demandam muita água, como a banana, o que não é adequado para o local. Quando os poços são perfurados e apresentam boa vazão, os proprietários deliberam erroneamente uma vazão de produção maior que a capacidade do aquífero, dessa forma, muitos poços secam. O tempo que se levou para redução de vazão ao longo desses anos dependeu das condições hidrogeológicas locais juntamente com a demanda de exploração de cada poço.

3.4 Monitoramento Pluviométrico

Ao iniciar a pesquisa com o cadastramento dos poços, muitos proprietários narram que um grande período seco teria sido o responsável pela queda na produtividade dos poços. Ao analisar os dados fornecidos pela Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC), no período de 1994 a 2019, na estação pluviométrica de Passira, percebe-se que ao longo desse período há anos em que chove mais e anos mais secos, porém, na maior parte dos casos, o volume de chuva não se distancia da média geral. As chuvas nessa região são poucas e mal distribuídas, dessa forma, a recarga não consegue acompanhar naturalmente a grande exploração dos poços ao longo dos anos. Fazendo uma estimativa simplificada de recarga, para a área de trabalho, que é 48.000.000 m², o volume precipitado seria 31,2 milhões de m³/ano. Considerando que a recarga efetiva seja 10 % desse valor, tem-se 3,12 milhões m³ de recarga para o aquífero por ano. Na área foram cadastrados 62 poços, significa que para cada poço tem-se 50,322 m³/ano de recarga, ou 5,74 m³/h. Esse valor mostra, portanto, que vazões de exploração de 10 ou 20 m³/h não se sustentam. Vale salientar que esta estimativa não constitui um balanço hídrico e nem todos os poços cadastrados encontram-se ativados, entretanto é suficiente para demonstrar que a recarga do aquífero é incompatível com as descargas extraídas por anos consecutivos, levando à exaustão do aquífero, ou melhor, ao sistema de fraturas captados. Essa constatação é uma das explicações plausíveis, para poços que produziam vazões de 20,0 m³/h, ou mais, hoje encontrarem-se desativados por conta da diminuição drástica da sua vazão de produção.

3.5 Monitoramento dos níveis estáticos

Ao longo das três etapas de campo, sempre que possível, foram medidos os NE e o resultado encontra-se na Tabela 4. Da primeira para segunda etapa de campo (Agosto a Março) teve-se o final do período de estiagem, dessa forma os níveis nos poços em sua maioria caíram. Como esperado, em Setembro/19 ao final do período chuvoso, na maioria dos poços, em resposta as chuvas, os níveis estáticos subiram.

Alguns apresentaram subida de NE maior que outros. As razões para isso são pontuais, e podem depender tanto das características do meio em cada região, ou seja, da disposição e quantidade de fraturas, quanto da dinâmica de exploração de cada proprietário. Com o uso mais frequente e uma maior descarga de alguns poços, alguns níveis caem mais rapidamente que outros.

Tabela 4 – Medidas de NE dos poços nas três etapas de campo.

Poço	NE (m) Agosto/18	NE (m) Março/19	NE (m) Setembro/19	Dif** (m)
PGM001	20,663*	20,644	12,535	8,109
PGM013	37,432*	29,975	26,404	3,571
PGM024	36,523*	-	35,227*	-
PGM029	36,09	-	34,412	-
PGM034	5,913	-	4,393	-
PGM040	-	7,265	6,230	1,035
PGM042	-	21,390	16,245	5,145
PGM049	30,715	-	30,268	-
PGM051	24,843	-	24,360	-
PGM054	-	29,552	22,657	6,895
PGM056	17,310	19,1555	17,435*	1,7205
PGM057	16,961	18,662*	16,800*	1,862
PGM058	19,392	-	18,012	-
PGM059	-	22,261	21,315	0,946
PGM061	18,574	-	21,036	-
PGM062	-	17,237	16,403	0,834

* Valores de Nível Dinâmico

** Diferença dos níveis entre março e setembro/19.

Fonte: Do autor, 2021.

3.6 Planejamento dos recursos ou Gestão da água

Uma das maiores dificuldades em aquíferos fissurais é fazer previsões de rebaixamentos e uma vazão de exploração segura a longo prazo. Por ser um meio heterogêneo, o essencial é o monitoramento dos níveis, descargas e precipitações ao longo do tempo. Com os testes realizados foram calculadas vazões seguras para um melhor planejamento das descargas. Como exemplo, foi utilizado a vazão específica (Q/sw) para um ano a partir do gráfico Q/sw vs. tempo para o poço PGM0009 (Figura 9), prolongando a tendência dos dados para $t = 1$ ano. Esse valor é multiplicado pelo rebaixamento disponível para cada poço, dessa forma obtém-se uma vazão segura para determinado rebaixamento (Tabela 5). Não se tem o valor de rebaixamento disponível para todos os poços, porém no cristalino, considera-se a profundidade da principal entrada de água como rebaixamento disponível, dessa forma, optou-se por 20 metros, abaixo do NE, por ser uma profundidade comum de entrada de água. As vazões de explorações recomendadas, baseadas nos ensaios de bombeamento, encontram-se na Tabela 5, exceto para os poços PGM057 e PGM062. Esses dois poços, durante o bombeamento tiveram rebaixamentos pequenos, o que reflete um bom sistema de fraturas. Dessa forma, os valores de Vazão específica são elevados, porém, por se tratar de um meio heterogêneo não é recomendável essas vazões extremamente elevadas. Além disso, para sugerir uma vazão de produção maior que a vazão do teste, que foram $4,7 \text{ m}^3/\text{h}$ para o PGM057 e $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ para o PGM062, é necessário realizar outros ensaios com vazões maiores e bombas de maior capacidade. Assim, teria uma resposta mais próxima de como seria o comportamento das fraturas naqueles pontos quando elevadas as vazões. É importante destacar que embora o poço tenha disponível alguns metros de rebaixamento, a vazão de produção não será constante ao longo de sua extensão, pois é possível que em determinada profundidade algumas fraturas produtoras importantes sejam descobertas e isso cause oscilações nas vazões de exploração do poço. Dessa forma, ressalta-se a importância do monitoramento dos poços, além de estudos mais detalhados com mapeamento vertical das principais fraturas produtoras.

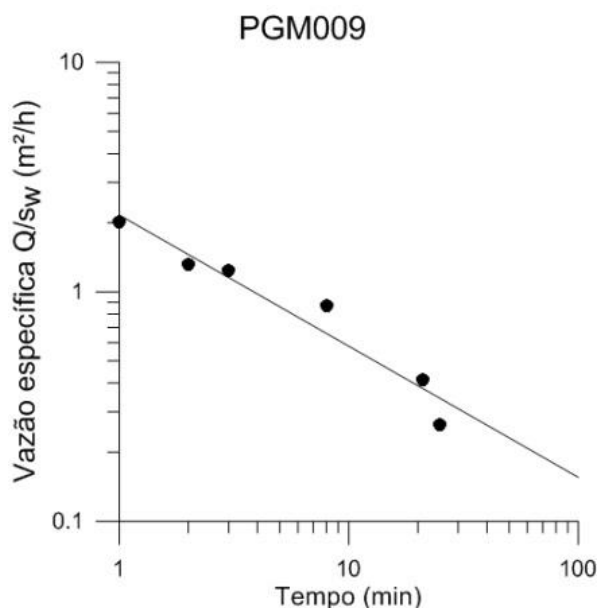


Figura 9 – Exemplo do poço PGM009 mostra o gráfico da Vazão específica (Q/s_w) com o tempo.
Fonte: Do autor, 2021.

Tabela 5 – Exemplos de Vazão específica para 1 ano de bombeamento e Vazão de produção para 20 metros de rebaixamento disponível.

Poço	Q/s_w para 1 ano (m^2/h)	Q para 20 m de rebaixamento (m^3/h)
PGM001	0,028	0,563
PGM009	0,001	0,023
PGM042	0,058	1,157
PGM054	0,001	0,018
PGM057	12,863	257,260*
PGM061	0,010	0,197
PGM062	3,339	66,772*

Fonte: Do autor, 2021.

3.7 Condutividade elétrica da água

A soma de todos constituintes químicos dissolvidos na água é chamado Sólidos totais dissolvidos (STD) e pode ser estimada a partir da conversão da medida de condutividade elétrica, sendo o valor de CE multiplicado por um fator de conversão que pode variar de 0,54 a 0,96. O fator de conversão sugerido por Custodio & Llamas (1996) é 0,64, e foi este o aqui empregado. Foram coletadas amostras de água em 38 poços para análise da CE, os valores encontram-se na Tabela 6. Quando possível, foram feitas medidas na segunda etapa de campo desses mesmos poços. A figura 10 mostra a diferença, em porcentagem, entre essas medidas. A maior parte das amostras teve aumento do valor de CE em até 20%.

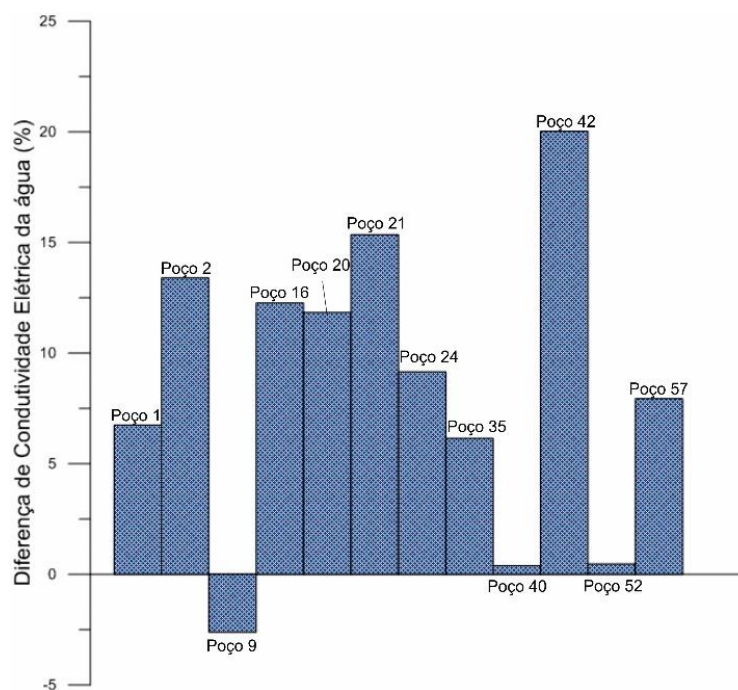


Figura 10 – Diferença, em porcentagem, das medidas de Condutividade Elétrica da água entre duas etapas de campo.

Fonte: Do autor, 2021.

Tabela 6 – Medidas de CE e STD da água na primeira e segunda etapa de campo.

Poço	CE (uS/cm) 1ª etapa	STD (mg/L)	CE (uS/cm) 2ª etapa	STD (mg/L)
PGM01	3232	2068,48	3450	2208,00
PGM02	1821	1165,44	2065	1321,60
PGM05	9988	6392,32		
PGM06	3493	2235,52		
PGM08	1346	861,44		
PGM09	1070	684,80	1042	666,88
PGM013	1329	850,56		
PGM016	970	620,80	1089	696,96
PGM017			1243	795,52
PGM020	980	627,20	1096	701,44
PGM021	964	616,96	1112	711,68
PGM022			3116	1994,24
PGM024	2653	1697,92	2896	1853,44
PGM025	3089	1976,96		
PGM026	3244	2076,16		
PGM030	931	595,84		
PGM031	984	629,76		
PGM034			10560	6758,40
PGM035	5087	3255,68	5400	3456,00
PGM036			4609	2949,76
PGM037	4485	2870,40		
PGM038	4485	2870,40		

PGM039	9410	6022,40		
PGM040	12600	8064,00	12650	8096,00
PGM041	3470	2220,80		
PGM042	5755	3683,20	6908	4421,12
PGM045	5535	3542,40		
PGM047	5200	3328,00		
PGM048	6268	4011,52		
PGM052	5444	3484,16	5470	3500,80
PGM053	5120	3276,80		
PGM054			5170	3308,80
PGM056			6500	4160,00
PGM057	4280	2739,20	4620	2956,80
PGM058	6273	4014,72		
PGM059	4305	2755,20		
PGM061			6304	4034,56
PGM062			2730	1747,20

Fonte: Do autor, 2021.

Muitos proprietários de poços relatam valores de salinidade da água, no início das perfurações dos primeiros poços, sendo de boa qualidade. Porém, as medidas de CE coletadas mostram que os valores atualmente aumentaram, sendo 76% das amostras com valores acima do permitido para potabilidade humana (Figura 10). O limite superior de STD para potabilidade da água para o consumo humano, segundo a Portaria de Consolidação. 2914/11 do Ministério da Saúde de Brasil, é 1000 mg/L. Entretanto, os valores de STD encontrados acima do máximo permitido pela portaria do Ministério da Saúde são tolerados para o consumo animal de acordo com a Tabela 7 proposta por McKee & Wolf (1963).

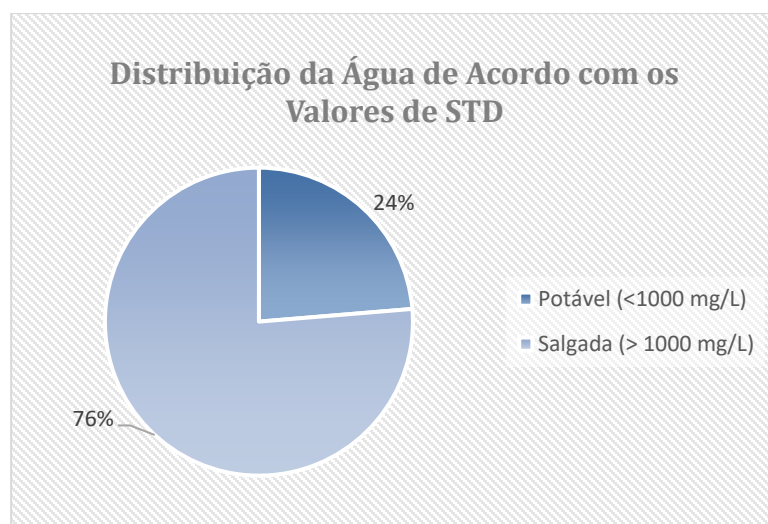


Figura 10 – Valores de STD dos poços cadastrados classificados de acordo a potabilidade.

Fonte: Do autor, 2021.

Tabela 7 – Limites superiores de STD para consumo animal, segundo McKee & Wolf (1963).

Animal	STD (mg/L)
Aves	2860
Porcos	4220
Cavalos	6435
Bovinos (leiteiro)	7180
Bovinos (corte)	10000
Ovinos e Caprinos	12900

Fonte: Do autor, 2021.

4. Considerações finais

O estudo em aquíferos fissurais constitui um trabalho pontual e que dificilmente pode ser extrapolado para regiões maiores. A utilização de escalas pequenas implica em incertezas elevadas e deve ser evitada. As distribuições de fraturas podem variar de região para região, entretanto algumas análises de correlação entre os dados de produção dos poços e os fatores que supostamente influenciam o fluxo foram realizadas com o objetivo de entender o comportamento hidrodinâmico da região, bem como auxiliar nas explorações. Constatou-se que o CMAP possui características favoráveis ao armazenamento e percolação da água, como sua textura e densidade de fraturamento. Apesar de a rocha possuir elementos favoráveis ao acúmulo de água, fatores como a exploração desordenada e um grande adensamento de poços levaram, com o passar dos anos, a uma generalizada queda na produtividade desses poços. Notou-se que muitos deles que no início das explorações tinham vazões acima de 20 ou 30 m³/h não permanecem com essas vazões. Por se tratar de um aquífero limitado, ainda que novos poços perfurados inicialmente apresentem boas vazões, com a excessiva descarga tendem a diminuir seus níveis. Com os dados de pluviosidade da área inferiu-se que a recarga não acompanha a intensa exploração dos poços por parte dos proprietários, que muitas vezes ao ver no início da perfuração vazões altas imaginam que essa vazão irá se manter. Apesar do quantitativo de chuvas na região serem baixos, este não é o principal motivo que levou a queda dos níveis nos poços. Somado às poucas chuvas, tem-se um reservatório limitado com uma grande retirada de água. Os ensaios de bombeamento ajudaram a entender a heterogeneidade do aquífero com valores de T equivalente (m²/s) na ordem de 1,0x10⁻³ a 1,0x10⁻⁶ m²/s. Embora esses valores não sejam consistentes para realizar previsões de rebaixamento, foram utilizados os valores de vazão específica (Q/sw) para determinado tempo de bombeamento, onde foi possível obter valores de vazão “segura”, em que se podem iniciar as explorações e com o devido monitoramento acompanhar os níveis e a recarga ao longo dos anos. Com relação à salinidade da água, os valores de STD variaram de 595 mg/L a 8096 mg/L. Cerca de 76% das amostras analisadas apresentaram valores maiores que 1000 mg/L, o limite recomendado para potabilidade humana (consumo). Entretanto, o intervalo tolerado pelos animais é maior, sendo possível empregar essa água para consumo animal e também para alguns tipos de culturas, aquelas mais resistentes à água com maiores teores de sais.

Referências

- ACCIOLY, A. C. A., 2000. *Geologia, Geoquímica e Significado Tectônico do Complexo Metanortosítico de Passira-Província Borborema-Nordeste Brasileiro*. PhD. Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- ALMEIDA, F.F.M., et al. *Províncias estruturais brasileiras*. Simpósio de Geologia do Nordeste, 8, Campina Grande, 1977. Atas. Campina Grande (1977), pp. 363-391.
- ALMEIDA, F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. *Brazilian structural provinces: an introduction Earth Sci. Rev.*, 17 (1981), pp. 1-29.
- APAC site. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php> Acesso em 28 de Dezembro de 2019.
- BARBOSA, A. G - 1990 - Folha Limoeiro - Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - 1:100.000 - Recife. CPRM/DNPM 124p il.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Brasília, 2011.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. Hidrología Subterránea. 2. ed. Barcelona: Omega, 1996.2v.

DEMETRIO, J.G.A., Feitosa, E.C., Saraiva, A. L., Água Aquíferos Fissurais, cap 4, in O Uso Sustentável dos Recursos Hídricos em Regiões Semi-Áridas, org Cirelo, J.A., Cabral, J.J.S.P., Ferreira, J.P.C.L., Oliveira, M.J.P.M., Leitão, T.E., Montenegro, S.M.G.L., Góes, V.C., Editora Universitária da UFPE, 2007.

FEITOSA, E. C; Demetrio, J. G. A. (Coord). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. CPRM, LABHID,UFPE. 3ª Edição Revisada e Ampliada. Rio de Janeiro, p:121-151; 2008.

GUIMARÃES, I.P e SILVA FILHO, A.F, Petrologia e Cadastramento das Ocorrências de FE-TI no município de Passira-PE. Atas do IX Simpósio de Geologia do Nordeste, Natal-RN, 1979.

MCKEE, J.C and WOLF, H.W, “Water Quality Criteria”, 1963, Second Edition, The Resources Agency of California, State Water Quality Control Board Publication, 3-A, 548p.

ROCHA, D.E.G.A. - 1990 - Projeto Folha Vitória de Santo Antão - PLGB, 1:100.000. Recife - DNPM/CPRM.il.

SANTOS, E., Nutman, A., & Neves, B. (2004). Idades SHRIMP U-Pb do Complexo Sertânia: implicações sobre a evolução tectônica da Zona Transversal, Província Borborema. Geologia USP. Série Científica, 4(1), 1-12.

SIAGAS site. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/> Acesso em: Dezembro de 2019.

SIAL, A.N. & MENOR, E. de A. - 1973 - Eulysite and associated mineralization of iron-titanium, Passira district Pernambuco, Brazil. In: Morim Philipe – Les Roches plutoniques dans leurs rapports avec les gites minéraux. Paris, Massom et Cie, 403p il. (Colloque Scientifique Internacional E. Raguin) p.239.

SILVA FILHO, A.F. da, & Pinho Guimaraes, I. de. (1979). Petrology and mapping of Fe and Ti occurrences in Passira country, PE, Brazil. 9 Symposium of Geology in Northeast, Brazil.

THEIS, C. V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Trans. Am. Geoph. Union. 16. p. 519-524.