

Caracterização do aquífero e da interação rio-aquífero em região agrícola localizada na sub-bacia do baixo rio Natuba - Pernambuco

Characterisation of the aquifer and river-aquifer interaction in an agricultural area of the lower Natuba River sub-basin – Pernambuco, Brazil

Jonathas Gomes de Carvalho Marques¹; Suzana Maria Gico Lima Montenegro²; Marília Regina Costa Castro Lyra³; Anderson Luiz Ribeiro de Paiva⁴; Rogéria Mendes do Nascimento⁵; Erison Rosa de Oliveira Barros⁶; José Antônio Aleixo da Silva⁷; Artur Paiva Coutinho⁸; Franklin Mendonça Linhares⁹

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife/PE, Brasil. Email: jonathasgomes@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1075-387X>

² Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife/PE, Brasil. Email: suzanam.ufpe@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2520-5761>

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Departamento Acadêmico de Saúde, Segurança e Meio Ambiente, Recife/PE, Brasil. Email: marilialyra@recife.ifpe.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2173-126X>

⁴ Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife-PE, Brasil. Email: anderson.paiva@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3475-1454>

⁵ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Departamento Acadêmico de Saúde, Segurança e Meio Ambiente, Recife/PE, Brasil. Email: rogeriamendes@recife.ifpe.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6528-0176>

⁶ Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife/PE, Brasil. Email: erison.barros@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4879-6880>

⁷ Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciência Florestal, Recife/PE, Brasil. Email: jaaleixo@uol.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0675-3524>

⁸ Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru/PE, Brasil. Email: arthur.coutinho@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0644-0037>

⁹ Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife/PE, Brasil. Email: franklinlinhares.geo@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5920-5575>

Resumo: Os aquíferos têm papel fundamental no ciclo hidrológico e na manutenção de mananciais superficiais. Entretanto, o uso excessivo para irrigação agrícola pode reduzir seus níveis potenciométricos. Este estudo teve como objetivo caracterizar o aquífero livre de uma região agrícola em Vitória de Santo Antão-PE e sua interação com o rio local, por meio de monitoramento entre junho/2023 e maio/2024. Foram instalados 8 poços de 4 m de profundidade e realizados: (a) ensaios de slug test, para estimar condutividade hidráulica e porosidade efetiva; (b) medições semanais dos níveis estáticos; (c) estimativa da recarga do aquífero; e (d) avaliação da condutividade hidráulica vertical do leito do rio. A condutividade hidráulica média foi de $8,69 \times 10^{-6}$ m/s, variando de 10^{-5} a 10^{-8} m/s, refletindo a granulometria heterogênea da área, com porosidade drenável média de 13,62%. As variações nas cargas hidráulicas indicaram boa recuperação dos níveis devido às chuvas. A recarga média estimada foi de 27,10%. A infiltração no leito do rio foi de $3,72 \times 10^{-6}$ m/s no inverno e $1,74 \times 10^{-6}$ m/s no verão. O fluxo predominante foi do aquífero para o rio, evidenciando que o bombeamento excessivo pode tornar o rio efluente, através do decréscimo de carga hidráulica.

Palavras-chave: Zona hiporréica; Fluxo vertical; Bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

Abstract: Aquifers play a fundamental role in the hydrological cycle and in the maintenance of surface water sources. However, excessive groundwater abstraction for agricultural irrigation can reduce their groundwater levels. This study aimed to characterise the unconfined aquifer of an agricultural region in Vitória de Santo Antão-PE and its interaction with the local river, through field monitoring conducted between June 2023 and May 2024. Eight monitoring wells, each 4 m deep, were installed and the following were performed: (a) slug tests to estimate hydraulic conductivity and effective porosity; (b) weekly measurements of water table levels; (c) estimation of aquifer recharge; and (d) evaluation of the vertical hydraulic conductivity of the riverbed. The average hydraulic conductivity was 8.69×10^{-6} m/s, ranging from 10^{-5} to 10^{-8} m/s, reflecting the heterogeneous grain-size distribution of the area, with an average effective porosity of 13.62%. Variations in hydraulic head indicated significant recovery of groundwater levels following rainfall events. The estimated average recharge was 27.10%. Infiltration into the riverbed was 3.72×10^{-6} m/s in winter and 1.74×10^{-6} m/s in summer. Groundwater flow predominantly occurred from the aquifer toward the river, evidencing that excessive pumping can shift the river from gaining to losing conditions due to the decrease in hydraulic load.

Keywords: Hyporrheic zone; Vertical flow; Capibaribe River basin.

1. Introdução

O ciclo hidrológico, processo que mantém a circulação da água no planeta, perpassa por diversos mecanismos como a evaporação, precipitação, percolação no solo para os aquíferos, escoamento superficial para os rios, dentre outras. Dentre estas, a relação entre aquíferos freáticos e cursos d'água superficiais se mostra bastante importante, tendo em vista que permite equilíbrio do volume hídrico, de acordo com a diferença de carga hidráulica entre os corpos d'água.

Veras (2011), Albuquerque (2015) e Veras *et al.* (2016a, 2016b) já vem sinalizando a importância dessa troca de água entre os mananciais hídricos superficial e subterrâneo inclusive para depuração natural de contaminantes. Estes mesmos trabalhos realizaram ensaios de infiltração em leito de rio, visando caracterizar essa taxa de infiltração e fornecer inferências a respeito desta relação que é essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Neste sentido, é perceptível a essencialidade de estudos que possam fornecer base para melhor compreensão a respeito da forma como se dá a comunicação hídrica entre as fontes d'água como forma de servirem como base para o gerenciamento ambiental dessas áreas, de forma que haja manutenção da água em quantidade e qualidade para seus usos preponderantes.

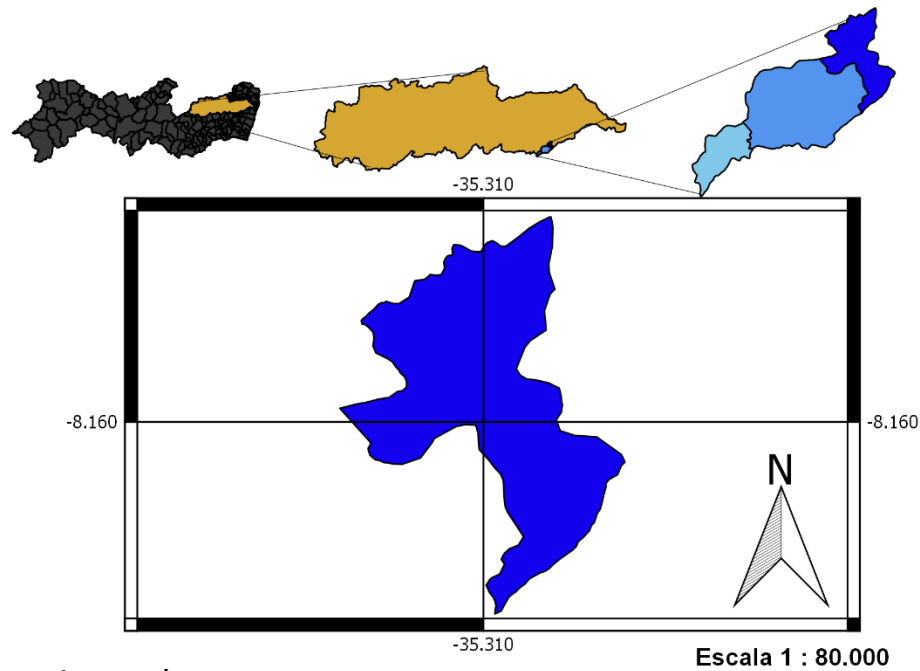
Diante do exposto, a bacia hidrográfica do rio Natuba, totalmente inserida na bacia do rio Tapacurá, ainda não possui estudos que possam analisar melhor alguns parâmetros hidrológicos do aquífero livre local, bem como da sua ligação com o rio, principalmente devido a estar inserida em uma região majoritariamente agrícola com exploração diária de água. Por outro lado, encontra-se alguns estudos com esta finalidade, por exemplo, na bacia do rio Beberibe (VERAS, 2011; ALBUQUERQUE, 2015; VERAS, 2016a; 2016b) e na bacia do rio Capibaribe (CARVALHO FILHO, 2019; SILVA, 2019; SILVA FILHO, 2024) para a RMR de Pernambuco.

Frente ao exposto, o presente trabalho teve por objetivo caracterizar o aquífero livre presente na sub-bacia do baixo rio Natuba e sua relação hidrológica com o referido manancial superficial, como forma de melhorar a compreensão das dinâmicas e interações ali envolvidas.

2. Metodologia

2.1 Determinação da área em estudo

O rio Natuba nasce no município de Pombos, na região do alto Natuba (nas coordenadas UTM 0237280 E 9090994 N) e deságua em Vitória de Santo Antão (BRAGA; SILVA, 2009), afluindo para o rio Tapacurá. Natuba está incluída na Unidade de Planejamento Hídrico 2 (UP2), que se refere à bacia hidrográfica do rio Capibaribe, localizada na parte oeste de Pernambuco, subdividindo-se em alto, médio e baixo (PERNAMBUCO, 2022) (Figura 1).



Legenda

- Sub-bacia do alto Natuba
- Sub-bacia do baixo Natuba
- Sub-bacia do médio Natuba
- Bacia do rio Capibaribe
- Pernambuco

SISTEMAS DE COORDENADAS
GEOGRÁFICAS
DATUM SIRGAS 2000

Fonte dos dados: APAC, 2017; IBGE, 2016.

Figura 1 – Delimitação dentro da sub-bacia do rio Natuba para a área de interesse.

Legenda: Sub-bacias do alto, médio e baixo Natuba, da esquerda para a direita.

Fonte: Autores (2025).

Trata-se de uma importante bacia no cenário hidrológico do estado de Pernambuco tendo em vista o seu uso para a manutenção da irrigação do polo de horticultura, presente às suas margens, além da vazão que gera para a barragem do Tapacurá (ALBUQUERQUE, 2010; MARQUES, 2017), abastecendo parte da região metropolitana do Recife. Dentro da região do baixo rio Natuba, a pesquisa se ateve a uma área piloto de 3 hectares inserida totalmente no contexto de agricultura familiar que realiza extração hídrica do rio Natuba de forma desregrada.

Ressalta-se, portanto, que este perfil agrícola de proximidade a mananciais d'água utilizadas para abastecimento é algo recorrente em diversas outras áreas agrícolas no Brasil e exterior, fato que torna o estudo relevante para inferências que podem extrapolar a área atualmente pesquisada.

2.2 Ensaios hidrológicos

Para caracterizar o aquífero e sua interação com o rio Natuba na seção do curso d'água estudado, foram instalados 8 poços, com profundidade de 4 metros e zona de filtro no terço médio inferior (Figura 2).



Figura 2 – Localização dos poços de monitoramento na sub bacia do baixo rio Natuba.
Fonte: Autores (2025).

De forma adicional, foi realizada análise granulométrica (TEIXEIRA *et al.*, 2017) do perfil litológico dos oito poços em cada camada de 20 cm, perfazendo 20 amostras por poço e 160 no total. Posteriormente, realizou-se média das amostras para cada metro do perfil e análise estatística, por meio do teste de Scott-Knott (SCOTT; KNOTT, 1974), com nível de significância de 5%, para agregar grupos com valores estatisticamente homogêneos dentre os 20 tratamentos (profundidades no perfil do solo).

2.2.1 Condutividade hidráulica do aquífero

A condutividade hidráulica do aquífero foi estimada entre 01 e 03/07/2024 por meio de testes Slug realizados em duplicata nos 8 poços da área de estudo. O ensaio consistiu em estabilizar o nível estático, elevar a coluna d'água com a inserção de um volume conhecido e monitorar seu retorno com datalogger HOBO, que registrou a pressão a cada segundo. Os dados foram analisados no software AQTESOLV, aplicando o método de Bouwer-Rice (1976), adequado para aquíferos livres.

A porosidade efetiva foi estimada a partir da equação de Poulsen *et al.* (1999) (Equação 1), tendo em vista que, quanto maior a condutividade hidráulica maior a porosidade efetiva (correlação positiva) (RIBEIRO, 2008).

$$\mu = 10[(\log K - 4,3)/2,8] \quad (1)$$

Em que μ é a porosidade efetiva (adimensional); e K a condutividade hidráulica (cm dia⁻¹).

2.2.2 Níveis estáticos do aquífero livre de Natuba

Os níveis estáticos foram medidos semanalmente durante 12 meses (junho/2023 a maio/2024) em poços de monitoramento, totalizando 52 aferições com medidor manual KLL (50 m, Seba Hidrometrie). Os dados, referenciados por cotas, permitiram avaliar a flutuação do aquífero superficial e identificar diferenças estatisticamente significativas entre os meses ($p < 0,0001$). Com base nisso, aplicou-se o método de Variação do Nível de Água (WTF) (HEALY; COOK, 2002) para estimar a taxa de recarga, técnica amplamente validada em estudos internacionais para aquíferos não confinados.

A equação utilizada para tal estimativa foi:

$$R = S_y \cdot \Delta h / \Delta t \quad (2)$$

Em que: R é a taxa de recarga estimada para o aquífero (mm/dia); S_y é o rendimento específico; Δh é a variação do nível da água (mm), contabilizado entre o pico de elevação d'água e a recessão extrapolada antecedente; Δt é a variação de tempo decorrido (dias).

2.2.3 Condutividade hidráulica vertical do leito do rio

Considerando a interação entre corpos superficiais e aquíferos, estudou-se a relação destes com o rio Natuba, importante para a recuperação dos níveis potenciométricos. Para estimar a taxa de infiltração ou condutividade hidráulica vertical do leito, aplicou-se o método de Veras (2011), que utiliza um cilindro acrílico acoplado a uma bolsa plástica. (Figura 3).



Figura 3 – Estimativa de condutividade hidráulica vertical de leito de rio, por meio de cilindro.
Fonte: Autores (2025).

O método adaptado de Lee (1977) e utilizado pelo GRH/UFPE consistiu em um cilindro acrílico (314 cm²) acoplado a uma bolsa hospitalar de 2 L, vedado na zona hiporreica do rio. Após pesar a bolsa e eliminar bolhas de ar, realizava-se o ensaio de 30 minutos, pesando-a novamente para calcular o volume infiltrado ou recebido, convertido em mm³. A água utilizada era do próprio rio, evitando alterações de densidade e temperatura.

Foram feitos 6 ensaios no inverno (julho/2023) e 6 no verão (janeiro/2024), com duas repetições por ponto, exceto no ponto 3 (verão), substituído por uma réplica no ponto 1 (Figura 4). Os dados foram analisados pela Equação 3, considerando o tempo padrão de 1.800 s, utilizado para o estudo de Veras (2011). Adicionalmente, foi realizado teste U de Mann-Whitney (MANN; WHITNEY, 1947), visando comparar os dados de infiltração entre inverno e verão.

$$I = V/t.A \quad (3)$$

Em que: I é a taxa de infiltração (mm/s); V é o volume de água infiltrada (mm³); t é o tempo decorrido de observação (s); A é a área do cilindro (mm²).



Figura 4 – Disposição espacial dos pontos de análise da condutividade hidráulica vertical do leito do rio.
Fonte: Autores (2025).

Adicionalmente, foram coletadas amostras do sedimento do rio para realização de análise física nos perfis 00-25 cm e 25-50 cm, permitindo melhores inferências sobre os resultados de infiltração alcançados.

3. Resultados e discussão

A caracterização granulométrica do perfil dos oito poços está exposta na Tabela 1.

Tabela 1 – Média (por metro) do percentual da classe textural dos poços.

Local de teste	Perfil (cm)	Areia total (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação textural (Shepard)	Classificação textural (USDA)
P01	0 +100	79,32%	8,04%	12,64%	Areia	Franco arenoso
	100 +200	64,40%	15,95%	19,65%	Areia argilosa	Franco arenoso
	200 +300	59,68%	17,27%	23,05%	Areia argilosa	Franco argiloso arenoso
	300 +400	42,44%	22,08%	35,48%	Areia-silte-argila	Franco argiloso
P02	0 +100	54,40%	24,54%	21,06%	Areia-silte-argila	Franco argiloso arenoso
	100 +200	80,54%	7,43%	12,03%	Areia	Franco arenoso
	200 +300	79,82%	5,70%	14,48%	Areia	Franco arenoso
	300 +400	31,37%	31,36%	37,27%	Areia-silte-argila	Franco argiloso
P03	0 +100	63,22%	19,76%	17,02%	Areia siltosa	Franco arenoso
	100 +200	64,84%	18,61%	16,55%	Areia siltosa	Franco arenoso
	200 +300	78,79%	12,01%	9,20%	Areia	Franco arenoso
	300 +400	77,34%	8,23%	14,43%	Areia	Franco arenoso
P04	0 +100	43,66%	29,67%	26,67%	Areia-silte-argila	Franco
	100 +200	42,98%	26,99%	30,03%	Areia-silte-argila	Franco argiloso
	200 +300	53,72%	20,63%	25,65%	Areia-silte-argila	Franco argiloso arenoso
	300 +400	49,23%	27,66%	23,11%	Areia-silte-argila	Franco argiloso arenoso
P05	0 +100	62,97%	19,25%	17,78%	Areia siltosa	Franco arenoso
	100 +200	37,23%	30,60%	32,17%	Areia-silte-argila	Franco argiloso
	200 +300	56,05%	18,41%	25,54%	Areia argilosa	Franco argiloso arenoso
	300 +400	49,13%	23,77%	27,10%	Areia-silte-argila	Franco argiloso arenoso
P06	0 +100	53,98%	25,35%	20,67%	Areia-silte-argila	Franco argiloso arenoso
	100 +200	50,92%	23,14%	25,94%	Areia-silte-argila	Franco argiloso arenoso
	200 +300	51,54%	23,81%	24,65%	Areia-silte-argila	Franco argiloso arenoso
	300 +400	41,74%	26,30%	31,96%	Areia-silte-argila	Franco argiloso
P07	0 +100	76,31%	11,72%	11,97%	Areia	Franco arenoso
	100 +200	60,80%	21,89%	17,31%	Areia siltosa	Franco arenoso
	200 +300	75,13%	11,22%	13,65%	Areia	Franco arenoso
	300 +400	36,95%	30,43%	32,62%	Areia-silte-argila	Franco argiloso
P08	0 +100	45,40%	30,91%	23,69%	Areia-silte-argila	Franco
	100 +200	26,27%	39,12%	34,61%	Areia-silte-argila	Franco argiloso
	200 +300	25,62%	36,08%	38,30%	Areia-silte-argila	Franco argiloso
	300 +400	20,40%	38,63%	40,97%	Areia-silte-argila	Argila

Fonte: Autores (2025).

Na região, o solo predominante é o neossolo flúvico, caracterizado por grande variação na composição granulométrica (argila, silte e areias grossa e fina). A análise estatística permitiu agrupar os 20 tratamentos em conjuntos homogêneos para cada fração do solo. Na Tabela 2 apresenta-se este agrupamento, o qual permite concluir que o percentual de argila apresentou diferença significativa entre a faixa de 0+300 cm ($G1_{arg}$) e 300+400 cm ($G2_{arg}$); silte (grupo único: $G1_s$); areia fina: entre 0+280 cm ($G1_{af}$) e 280+400 cm ($G2_{af}$). A areia grossa foi a única variável que não se agrupou apenas em seções contínuas no perfil: houve homogeneidade em 0+60 cm e 240+340 cm ($G1_{ag}$) e entre 60+240 cm e 340+400 cm ($G2_{ag}$).

Tabela 2 – Agrupamento estatístico em grupos homogêneos (Scott-Knott) de acordo com a profundidade do perfil do solo.

Profund.	(%)	Agrup.	Profund.	(%)	Agrup.	Profund.	(%)	Agrup.	Profund.	(%)	Agrup.
----------	-----	--------	----------	-----	--------	----------	-----	--------	----------	-----	--------

Areia grossa			Areia fina			Silte			Argila		
0+20	13,88	G1 _{ag}	220+240	56,65	G1 _{af}	380+400	29,3	G1 _s	380+400	32,2	G1 _{arg}
280+300	13,69	G1 _{ag}	240+260	55,95	G1 _{af}	360+380	26,2	G1 _s	360+380	30,9	G1 _{arg}
20+40	10,9	G1 _{ag}	260+280	55,88	G1 _{af}	340+360	25,5	G1 _s	340+360	29,8	G1 _{arg}
300+320	10,07	G1 _{ag}	200+220	54	G1 _{af}	300+320	24,8	G1 _s	300+320	29,6	G1 _{arg}
40+60	9,04	G1 _{ag}	60+80	53,67	G1 _{af}	120+140	24,6	G1 _s	320+340	29,5	G1 _{arg}
260+280	8,7	G1 _{ag}	20+40	53,37	G1 _{af}	320+340	24,4	G1 _s	100+120	25,1	G2 _{arg}
320+340	8,09	G1 _{ag}	180+200	53,35	G1 _{af}	100+120	24,2	G1 _s	80+100	24,6	G2 _{arg}
240+260	7,6	G1 _{ag}	0+20	51,53	G1 _{af}	80+100	23,8	G1 _s	280+300	24,6	G2 _{arg}
60+80	5,64	G2 _{ag}	160+180	51,28	G1 _{af}	160+180	22,7	G1 _s	120+140	24,6	G2 _{arg}
340+360	5,59	G2 _{ag}	140+160	50,85	G1 _{af}	180+200	21,8	G1 _s	140+160	23,9	G2 _{arg}
80+100	4,44	G2 _{ag}	40+60	49,89	G1 _{af}	40+60	21,6	G1 _s	180+200	22,8	G2 _{arg}
160+180	4,33	G2 _{ag}	120+140	47,83	G1 _{af}	140+160	21,6	G1 _s	200+220	22,1	G2 _{arg}
100+120	4,3	G2 _{ag}	80+100	47,18	G1 _{af}	200+220	21,1	G1 _s	160+180	21,7	G2 _{arg}
140+160	3,66	G2 _{ag}	100+120	46,39	G1 _{af}	0+20	20,7	G1 _s	220+240	21,6	G2 _{arg}
220+240	3,09	G2 _{ag}	280+300	41,81	G2 _{af}	60+80	20,1	G1 _s	60+80	20,6	G2 _{arg}
120+140	2,96	G2 _{ag}	360+380	40,62	G2 _{af}	280+300	19,9	G1 _s	260+280	20,4	G2 _{arg}
200+220	2,86	G2 _{ag}	340+360	39,19	G2 _{af}	20+40	19,6	G1 _s	240+260	20,3	G2 _{arg}
380+400	2,32	G2 _{ag}	320+340	37,97	G2 _{af}	220+240	18,6	G1 _s	40+60	19,4	G2 _{arg}
360+380	2,28	G2 _{ag}	380+400	36,24	G2 _{af}	240+260	16,1	G1 _s	20+40	16,2	G2 _{arg}
180+200	2,13	G2 _{ag}	300+320	35,51	G2 _{af}	260+280	15	G1 _s	0+20	13,9	G2 _{arg}

Legenda: Profund. – Profundidade; Agrup. – Agrupamento.

Fonte: Autores (2025).

Corroborando com a análise feita acima, Cunha Filho (2013) e Nascimento (2013) assinalam que há na região do baixo Natuba um aumento de argila e diminuição gradativa de areia, da camada mais superficial até a mais profunda.

3.1 Condutividade hidráulica do aquífero

A bateria de testes foi realizada e os valores (Tabela 3) estimados de condutividade hidráulica horizontal para o aquífero foram semelhantes para as duplicatas no mesmo poço. Segundo Freeze e Cherry (2017), a variação identificada entre poços (10^{-5} a 10^{-8}) é típica da diferença entre areia limpa, areia siltosa e silte/argila, sendo de forma geral coerente com a granulometria diversa identificada nos perfis dos poços.

Tabela 3 – Valores de condutividade hidráulica estimadas para os poços instalados na sub bacia do baixo Natuba.

Poço	Condutividade hidráulica (m/s)		
	Repetição 1	Repetição 2	Média
1	$1,99 \times 10^{-06}$	$2,35 \times 10^{-06}$	$2,17 \times 10^{-06}$
2	$1,06 \times 10^{-06}$	$1,07 \times 10^{-06}$	$1,07 \times 10^{-06}$
3	$1,15 \times 10^{-05}$	$9,41 \times 10^{-06}$	$1,05 \times 10^{-05}$
4	$9,52 \times 10^{-07}$	$2,06 \times 10^{-06}$	$1,51 \times 10^{-06}$
5	$1,47 \times 10^{-06}$	$1,84 \times 10^{-06}$	$1,65 \times 10^{-06}$
6	$1,59 \times 10^{-08}$	$1,55 \times 10^{-08}$	$1,57 \times 10^{-08}$
7	$8,48 \times 10^{-07}$	$9,79 \times 10^{-07}$	$9,14 \times 10^{-07}$
8	$4,96 \times 10^{-05}$	$5,38 \times 10^{-05}$	$5,17 \times 10^{-05}$
	Média		$8,69 \times 10^{-06}$

Fonte: Autores (2025).

Os valores dos poços são congruentes entre si em sua maioria, tendo em vista a variação do percentual de areia total. O poço 3 e 8 foram os que apresentaram maior condutividade hidráulica: o poço 3 tem sua justificativa no fato de possuir o maior percentual de areia total nos últimos metros do perfil (78,06%), dentre os poços construídos, chegando próximo

ao valor estimado por Paiva (2009) para região aquífera livre do rio Beberibe ($1,5 \times 10^{-5}$ m/s), em que se tinha percentual similar de areia na profundidade da zona de filtro.

O poço 8, por sua vez, apesar de possuir boa condutividade hidráulica, apresenta o maior percentual de argila/silte, se comparado aos demais. Isto pode ser explicado pelo fato de que não somente a classe textural influencia no potencial da variável, mas também a forma com que esse material está estruturado, conforme Gonçalves e Libardi (2013). Oliveira, Gonçalves e Martins (2010) corroboram com este fato em seu estudo ao comparar solo franco-argilo-arenoso (latossolo vermelho) e solo argiloso (nitossolo vermelho férrico) e perceber maior condutividade hidráulica no perfil argiloso, no qual foi detectada a presença de fendas que pressupunham expansão e retração da argila que facilitavam a percolação.

A porosidade efetiva foi estimada em 13,62%, sendo este o cálculo para a média da condutividade hidráulica dos poços observados. O valor é coerente, pois está próximo ao limite máximo e mínimo de 3-12% e 15-32% que Johnson (1967) estabeleceu para solos argiloso-arenosos e areia média, respectivamente, e está dentro do esperado para solos siltosos (3-19%) e areia fina (10-28%).

3.2 Níveis estáticos do aquífero livre de Natuba

Os resultados das medições dos níveis estáticos dos 8 poços durante um ano hidrológico (junho/2023 a maio/2024), bem como sua relação com a precipitação podem ser visualizados na Figura 5. Ressalta-se que os dados do volume precipitado acumulado foram coletados na APAC para o posto automático “488 - Vitória de Santo Antão (PCD)”, localizado no Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), que dista aproximadamente 3 km da área em estudo.

Sabe-se que a diferença de carga hidráulica entre dois pontos de um aquífero, por meio da variação de cota topográfica, gera um gradiente hidráulico que rege o fluxo hídrico subterrâneo, partindo de ponto de maior cota para o de menor cota, conforme Lei de Darcy (SAHYA *et al.*, 2023) e isso é visualizado no baixo Natuba (Figura 6), por meio do mapa potenciométrico, obtido a partir da simulação de fluxo hídrico subterrâneo em modelo previamente calibrado para a área ($R^2=0,997$).

É perceptível que o aquífero livre de Natuba possui boa resposta hidrológica às precipitações com elevação proporcional à intensidade das chuvas, sendo este cenário também detectado por diversos autores em aquíferos distintos (MONTEIRO; MONTENEGRO; MONTENEGRO, 2014; BARBOSA, 2020; PASINI *et al.*, 2022).

Segundo Barbosa (2020), esta relação chuva-nível estático em aquíferos livres pode sofrer influência de alguns fatores a exemplo da litologia do solo, espessura da zona não saturada, capacidade específica do poço, tipo do solo e seu uso/ocupação, além da presença de bombeamento nas proximidades. Naturalmente, quanto menor o tamanho da camada acima da saturada e mais arenosa, mais rápida será a resposta da chuva no lençol freático e isso foi percebido em Natuba.

Ademais, análise multivariada de variância ($p < 0,0001$) dos níveis estáticos dos 8 poços durante os 12 meses de avaliação indica que há diferença estatisticamente significativa entre os períodos do ano para cada poço. Na Tabela 4 apresenta-se, resumidamente, que estas diferenças se relacionam majoritariamente com os meses de junho e julho, ratificando o que foi apresentado na Figura 4, em que se constata a precipitação de aproximadamente 37%, do volume anual total, neste bimestre. A verificação de diferenças significativas em outros meses também é coerente, pois a variação da carga hidráulica difere entre os poços conforme a própria resposta aos eventos de chuva.

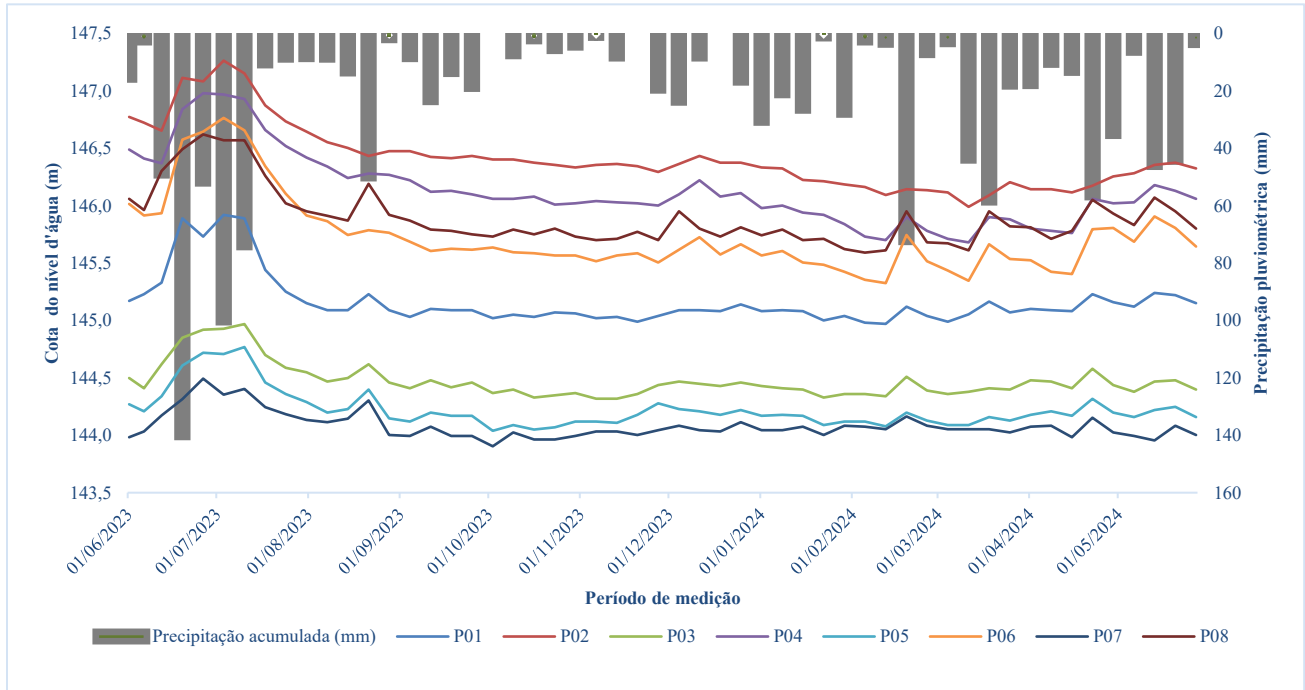


Figura 5 – Variação do nível estático, entre junho/2023 a maio/2024, nos 8 poços localizados na comunidade do baixo rio Natuba, município de Vitória de Santo Antão – Pernambuco.

Fonte: Autores (2025).

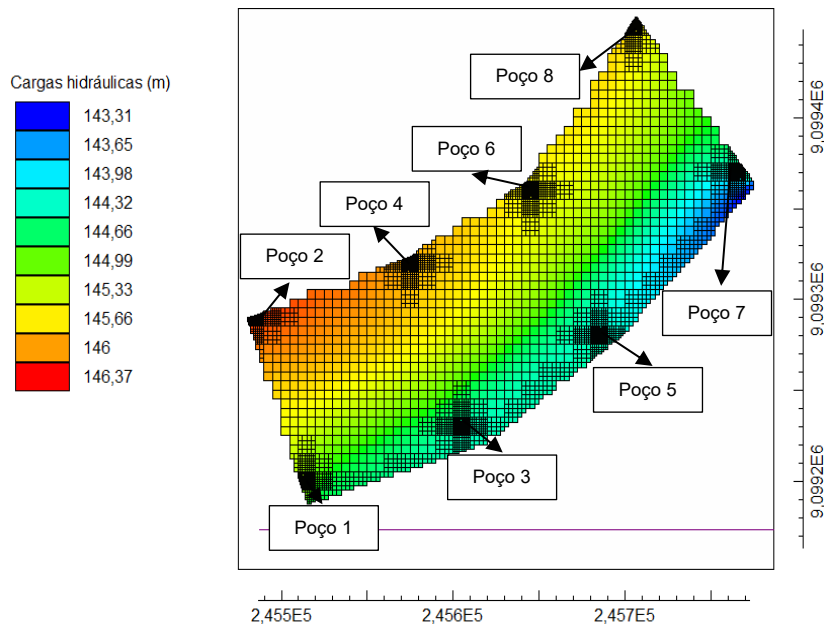


Figura 6 – Mapa potenciométrico para a região de estudo localizada no baixo rio Natuba, município de Vitória de Santo Antão – Pernambuco.

Fonte: Autores (2025).

Tabela 4 – Análise da diferença dos níveis estáticos durante o ciclo hidrológico: junho/23 a maio/24.

Meses com diferença significativa	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
	Diferença entre médias (IC 95%)							
Junho / Agosto	-	0,38 (0,11-0,65)	-	0,34 (0,02-0,65)	-	-	-	-
Junho / Setembro	0,39 (0,03-0,76)	0,43 (0,16-0,7)	-	0,48 (0,16-0,79)	0,27 (0,01-0,52)	0,58 (0,15-10,22)	-	0,49 (0,12-0,86)
Junho / Outubro	0,42 (0,08-0,77)	0,5 (0,24-0,75)	0,3 (0,07-0,52)	0,57 (0,28-0,87)	0,36 (0,12-0,59)	0,63 (0,22-10,4)	0,23 (0,03-0,43)	0,53 (0,18-0,88)
Junho / Novembro	0,45 (0,09-0,81)	0,53 (0,26-0,8)	0,3 (0,06-0,54)	0,6 (0,28-0,91)	0,26 (0,01-0,51)	0,67 (0,24-11,12)	-	0,57 (0,19-0,94)
Junho / Dezembro	0,37 (0,01-0,73)	0,48 (0,21-0,75)	-	0,49 (0,18-0,8)	-	0,57 (0,13-10,09)	-	0,46 (0,09-0,83)
Junho / Janeiro	0,41 (0,07-0,76)	0,61 (0,36-0,87)	0,27 (0,05-0,5)	0,68 (0,39-0,98)	0,28 (0,05-0,52)	0,7 (0,29-11,12)	-	0,57 (0,22-0,92)
Junho / Fevereiro	0,44 (0,08-0,81)	0,74 (0,47-100,48)	0,26 (0,02-0,5)	0,84 (0,53-115,33)	0,3 (0,05-0,55)	0,73 (0,29-11,69)	-	0,58 (0,21-0,95)
Junho / Março	0,4 (0,03-0,76)	0,77 (0,5-104,23)	0,27 (0,04-0,51)	0,83 (0,51-113,83)	0,31 (0,06-0,56)	0,72 (0,28-11,59)	-	0,52 (0,15-0,89)
Junho / Abril	-	0,7 (0,45-0,96)	-	0,73 (0,44-102,9)	-	0,63 (0,21-10,38)	-	0,43 (0,08-0,78)
Junho / Maio	-	0,54 (0,27-0,8)	-	0,52 (0,21-0,83)	-	0,46 (0,02-0,89)	-	0,37 (0-0,74)
Julho / Agosto	0,41 (0,04-0,77)	0,44 (0,17-0,71)	-	0,42 (0,1-0,73)	0,27 (0,02-0,52)	0,57 (0,13-10,04)	-	-
Julho / Setembro	0,45 (0,09-0,82)	0,5 (0,23-0,77)	0,31 (0,07-0,54)	0,56 (0,24-0,87)	0,35 (0,1-0,6)	0,72 (0,29-11,62)	0,25 (0,04-0,46)	0,48 (0,11-0,85)
Julho / Outubro	0,48 (0,14-0,83)	0,56 (0,31-0,81)	0,38 (0,16-0,61)	0,65 (0,36-0,95)	0,44 (0,21-0,68)	0,77 (0,36-11,8)	0,29 (0,1-0,49)	0,51 (0,16-0,86)
Julho / Novembro	0,51 (0,15-0,87)	0,6 (0,33-0,86)	0,39 (0,15-0,62)	0,68 (0,36-0,99)	0,35 (0,09-0,6)	0,81 (0,38-12,52)	0,24 (0,03-0,44)	0,55 (0,18-0,93)
Julho / Dezembro	0,43 (0,07-0,79)	0,55 (0,28-0,82)	0,3 (0,06-0,53)	0,57 (0,26-0,89)	0,31 (0,06- 0,56)	0,71 (0,27-11,49)	-	0,45 (0,08-0,82)
Julho / Janeiro	0,47 (0,13-0,82)	0,68 (0,42-0,93)	0,36 (0,14-0,58)	0,76 (0,47-105,9)	0,37 (0,14-0,61)	0,84 (0,43-12,52)	0,21 (0,02-0,41)	0,56 (0,21-0,91)
Julho / Fevereiro	0,5 (0,14-0,87)	0,8 (0,53-106,88)	0,35 (0,11-0,58)	0,92 (0,61-123,53)	0,39 (0,13-0,64)	0,87 (0,43-13,09)	-	0,57 (0,2-0,94)
Julho / Março	0,46 (0,09-0,82)	0,84 (0,57-110,63)	0,36 (0,12-0,6)	0,91 (0,59-122,03)	0,4 (0,15-0,65)	0,86 (0,42-12,99)	0,22 (0,01-0,42)	0,51 (0,14-0,88)
Julho / Abril	0,4 (0,05-0,74)	0,77 (0,51-102,14)	0,27 (0,05-0,49)	0,82 (0,52-111,1)	0,3 (0,07-0,54)	0,77 (0,35-11,78)	0,2 (0-0,4)	0,42 (0,07-0,77)
Julho / Maio	-	0,6 (0,33-0,87)	0,32 (0,08-0,55)	0,6 (0,29-0,91)	0,32 (0,07-0,57)	0,6 (0,16-10,34)	0,26 (0,05-0,46)	-

Agosto / Janeiro	-	-	-	0,35 (0,03-0,66)	-	-	-	-
Agosto / Fevereiro	-	0,36 (0,07-0,64)	-	0,51 (0,18-0,83)	-	-	-	-
Agosto / Março	-	0,4 (0,11-0,68)	-	0,49 (0,16-0,82)	-	-	-	-
Agosto / Abril	-	0,33 (0,06-0,59)	-	0,40 (0,09-0,71)	-	-	-	-
Setembro / Fevereiro	-	0,3 (0,02-0,59)	-	0,37 (0,04-0,69)	-	-	-	-
Setembro / Março	-	0,34 (0,06-0,62)	-	0,35 (0,02-0,68)	-	-	-	-
Setembro / Abril	-	0,27 (0-0,54)	-	-	-	-	-	-
Outubro / Março	-	0,28 (0,01-0,55)	-	-	-	-	-	-
Dezembro / Fevereiro	-	-	-	0,35 (0,02-0,68)	-	-	-	-
Dezembro / Março	-	0,29 (0,01-0,57)	-	0,34 (0,01-0,66)	-	-	-	-

Fonte: Autores (2025).

Com essas informações das variações dos níveis d'água durante um ano hidrológico (2023/2024), estimou-se a taxa de recarga por meio do método Water Table Fluctuation (WTF) (Tabela 5) numa média de 27,10%, ou seja, estima-se que 337,03 mm (de um total de 1243,6 mm precipitado no período analisado) infiltrou no solo.

Tabela 5 – Valor estimado de recarga para os 8 poços instalados na comunidade de Natuba, Vitória de Santo Antão – Pernambuco.

Poço	Valor de recarga anual (m)	Valor de recarga anual (mm)	Precipitação anual (mm) (2023-2024)	Percentual de recarga (%)
1	0,31	308,90	1243,6	24,84
2	0,26	262,87		21,14
3	0,32	315,58		25,38
4	0,28	275,53		22,16
5	0,34	344,31		27,69
6	0,36	361,20		29,04
7	0,31	305,63		24,58
8	0,52	522,19		41,99
Média	0,34	337,03		27,10
Máximo	0,52	522,19		41,99
Mínimo	0,26	262,87		21,14

Fonte: Autores (2025).

Apesar da variação deste percentual entre distintos aquíferos ser possível, devido às características específicas de cada ambiente/região, os valores aqui estimados são coerentes, coadunando-se com autores que utilizaram tal método: 21-40%

em aquífero aluvionar costeiro no Rio Grande do Sul (TROIAN *et al.*, 2017), 8-34% em aquíferos situados em São Carlos-SP (MAZIERO; WENLAND, 2005), 32-36% em bacia sedimentar do Araripe-CE (MELATI *et al.*, 2017).

3.3 Condutividade hidráulica vertical do leito do rio Natuba

Os valores de infiltração, bem como os resultados de granulometria para a seção estudada do rio Natuba estão contidos nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Valores de infiltração vertical no leito do rio Natuba, Vitória de Santo Antão – Pernambuco.

Ponto	Repetição	Valor (m/s)	
		Inverno	Verão
Ponto 1	1	-0,00000694	-0,00000536
Ponto 1	2	-0,00001037	0,00000076
Ponto 1	3	-	0,00000042
Ponto 2	1	0,00000035	0,00000357
Ponto 2	2	0,00000119	0,00000021
Ponto 3	1	0,00000310	0,00000011
Ponto 3	2	0,00000039	-

Fonte: Autores (2025).

Tabela 7 – Percentuais de granulometria para os locais de realização dos testes de infiltração no leito do rio Natuba.

Local de teste	Perfil (cm)	Período	Areia Grossa (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação textural (Shepard)
1	00-25	Inverno	63,00	35,26	0,03	1,71	Areia
	00-25	Verão	36,80	60,64	0,27	2,29	Areia
	25-50	Inverno	48,66	50,14	0,06	1,14	Areia
	25-50	Verão	45,40	53,08	0,11	1,41	Areia
2	00-25	Inverno	15,90	82,42	0,04	1,64	Areia
	00-25	Verão	17,16	79,08	0,12	3,64	Areia
	25-50	Inverno	49,30	49,58	0,06	1,06	Areia
	25-50	Verão	20,52	75,80	0,04	3,64	Areia
3	00-25	Inverno	22,96	75,06	0,12	1,86	Areia
	00-25	Verão	28,86	64,22	2,78	4,14	Areia
	25-50	Inverno	10,04	87,08	0,66	2,22	Areia
	25-50	Verão	23,88	69,52	0,46	6,14	Areia

Fonte: Autores (2025).

O resultado negativo é possível nos ensaios de infiltração (VERAS, 2011; FREITAS, 2018) e, para este estudo, é provável que o bombeamento da água do rio ter sido iniciado pelos produtores no momento em que se faziam algum(ns) dos testes no ponto 1. Dessa forma, influenciando no rebaixamento da carga hidráulica do manancial e, assim, tendo induzido a reversão do rio de influente (que fornece água para o aquífero) para efluente (que recebe água do aquífero) naquele dado momento.

O teste U de Mann-Whitney (MANN; WHITNEY, 1947), por sua vez, indica que não há diferença estatisticamente significativa entre os dois grupos de dados de taxas de infiltração, entre inverno e verão (Tabela 8).

Tabela 8 – Teste U de Mann-Whitney e estatística descritiva para o conjunto de dados do teste de infiltração.

Teste aplicado	Estatística	p-valor		
U de Mann-Whitney	16	0,818		
Estatística descritiva				
Grupo	n	Mediana	Q1	Q3

INVERNO	6	3,15E-07	1,35E-07	6,75E-07
VERÃO	6	3,70E-07	-5,12E-06	9,90E-07

Fonte: Autores (2025).

Freitas (2018) identificou maior taxa de silte/argila em meses imediatamente posteriores ao inverno (verão) em detrimento dos meses efetivamente de inverno, sugerindo o “assentamento” das partículas mais finas após a agitação do inverno, fato também observado neste estudo (Tabela 8). Possivelmente pode ter havido colmatação por esses finos, o que pode ter levado a uma média ligeiramente menor de infiltração no verão se comparado ao inverno. Entretanto, a granulometria do rio não apresentou diferenças significativas, entre os percentuais de areia grossa, areia fina, silte e argila entre as profundidades analisadas (00+25 e 25+50 cm) e entre os períodos de inverno e verão, por meio da análise de variância realizada.

Ademais, foi possível perceber que o balanço ou a diferença entre os valores dos testes de infiltração no leito do rio que indicaram volume de fluxo no sentido aquífero-rio e rio-aquífero geraram um resíduo de infiltração de $1,23 \times 10^{-5}$ m/s e $2,8 \times 10^{-7}$ m/s no sentido aquífero-rio no inverno e verão, respectivamente, corroborando a tese de que o bombeamento excessivo no rio gera um fluxo adicional nesta direção.

Dessa forma, esses testes iniciais são um ponto de partida de posteriores pesquisas mais abrangentes que permitam verificar zonas de maior recarga para o aquífero ou vice-versa, possibilitando gerenciamento sustentável conjunto dos recursos hídricos da região (seja ele superficial e/ou subterrâneo), de forma que sejam preservadas a água tanto em quantidade quanto em qualidade.

4. Considerações finais

A interação rio-aquífero em Natuba pode se dar tanto no sentido rio-aquífero quanto no aquífero-rio a depender da diferença de carga hidráulica e a taxa de infiltração depende, dentre outros fatores, da agregação dos sedimentos do rio e da época do ano (pluviometria). Sendo assim, a infiltração no leito do rio apresentou valor médio de $3,72 \times 10^{-6}$ m/s e $1,74 \times 10^{-6}$ m/s no inverno e verão, respectivamente, com valores menores no verão, possivelmente, devido à presença levemente maior de partículas finas que tem potencial de colmatar os poros.

O acompanhamento dos níveis estáticos do aquífero livre local demonstrou um decréscimo em sua potenciometria após um ano de medições, apesar do aquífero possuir uma boa condutividade hidráulica ($8,69 \times 10^{-6}$) e boa taxa de recarga (27,10%). Isto é explicado pelo fato da região agrícola localizada na bacia do baixo rio Natuba possuir um perfil de extração desordenada de água do rio Natuba, fato que gera decréscimo na carga hidráulica do rio e induz o sentido de fluxo hídrico majoritário na direção aquífero-rio e isto é comprovado pelos ensaios de infiltração no leito do manancial superficial, os quais geram resíduos adicionais nessa direção ($1,23 \times 10^{-5}$ m/s e $2,8 \times 10^{-7}$ m/s no inverno e verão, respectivamente). Dessa forma, menciona-se a necessidade de acompanhamento da exploração do aquífero, associado diretamente ao monitoramento dos níveis de água, assim como, pela característica agrícola na região uma avaliação da qualidade desta água e a possível contaminação.

Referências

- ALBUQUERQUE, F. A. *Estudos hidrológicos em microbacias com diferentes usos do solo na sub bacia do alto Natuba*. 2010. 181 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- ALBUQUERQUE, T. B. V. *Caracterização física e biológica da zona hiporreica na interação rio-aquífero no rio Beberibe - Pernambuco*. 2015. 166 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- BARBOSA, M. B. *Aplicação do geoprocessamento na análise dos fatores condicionantes das variações do nível de água subterrânea do sistema aquífero Bauru*. 2020. 90 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Geológica). Departamento de Geologia, Fundação Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- BOUWER, H.; RICE, R. C. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, v. 12, n. 3, p. 423-428, jun. 1976.

- BRAGA, R. A. P.; SILVA, C. E. M. *Adequação ambiental em assentamentos rurais na bacia do rio Natuba - PE*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 18., Campo Grande. Anais [...] Campo Grande: ABRH, 2009. p. 1-18.
- CARVALHO FILHO, J. A. A. *Caracterização físico-química e biológica da zona hiporreica e sua perspectiva na revitalização de riachos urbanos*. 2023. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologias e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.
- CUNHA FILHO, F. F. *Metais pesado em solo, água e hortaliças em áreas produtoras de olerícolas na zona da mata de Pernambuco*. 2013. 79 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares). Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.
- FREEZE; A. R.; CHERRY; J. A. *Águas subterrâneas*. Cotia: Instituto Água Sustentável, 2017. 698 p.
- FREITAS, J. B. A. *Caracterização da zona hiporreica no trecho médio do rio Beberibe considerando aspectos biológicos e sedimentológicos*. 2018. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 31, n. 1, p. 1174-1184, out. 2013.
- HEALY, R.W.; COOK, P.G. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 1, p. 91-109, 2002.
- JOHNSON, A. I. *Specific yield: compilation of specific yields for various materials*. Washington: USGS, 1967. 74 p.
- LEE, D. R. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. *Limnology Oceanographic*, v. 22, n. 1, p. 140-147, 1977.
- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *Annals of Mathematical Statistics*, v. 18, n. 1, p. 50-60, mar. 1947.
- MARQUES, J. G. C. *Proposições para o gerenciamento do uso de agrotóxicos utilizados na bacia hidrográfica do Natuba, Vitória de Santo Antão, Pernambuco*. 2017. 125 p. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental). Mestrado Profissional em Gestão Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, 2017.
- MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. *Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, SP*. In: ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS. 14. 2005. Ribeirão Preto. Anais [...]. São Paulo: ABAS, 2005. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23197>. Acesso em: 07 fev. 2024.
- MELATI, M. D.; KICH, E. M.; TEIXEIRA, Z. A.; ATHAYDE, G. B. *Aplicação do método water table fluctuation usando a master recession curve (MRC) para um poço localizado na bacia sedimentar do Araripe*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 22., 2017. Florianópolis. Anais [...] Porto Alegre: ABRH, 2017. 8 p.
- MONTEIRO, A. L. N.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Modelagem de Fluxo e Análise do Potencial Hídrico de Aquífero Aluvial no Semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 3, p. 151-163, set. 2014.
- NASCIMENTO, R M. *Impactos dos agrotóxicos na contaminação ambiental da produção de hortaliças no baixo rio Natuba, Pernambuco*. 2013. 167 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.
- OLIVEIRA, L. A.; GONÇALVES, R. M.; MARTINS, F. P. Contraste de condutividade hidráulica em solos de texturas arenosa e argilosa encontrados nos tributários da margem esquerda do rio tijuco, município de ituiutaba, estado de Minas Gerais, Brasil. *Caminhos de Geografia*, v. 11, n. 33, p. 230-243, mar. 2010.

- PAIVA, A. L. R. *O processo de filtração em margem e um estudo de caso no rio Beberibe*. 2009. 171 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- PASINI, F.; MANCUSO, M. A.; FORTES, P. R.; BREUNIG, F. M.; FRITZEN, R. R. Recarga de aquífero em Floresta Estacional Decidual nativa, Parque Estadual do Turvo (RS). *Ciência Florestal*, v. 32, n. 1, p. 206-232, mar. 2022.
- PERNAMBUCO. *Plano estadual de recursos hídricos*. Recife: APAC, 2022. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/planos>. Acesso em 20 jul. 2024.
- POULSEN, T. G.; MOLDRUP, P.; YAMAGUCHI, T.; JACOBSEN, O. H. Predicting saturated and unsaturated hydraulic conductivity in undisturbed soils from soil water characteristics. *Soil Science*, v.164, n.2, p.877-887, 1999.
- RIBEIRO, K. D. *Relações matemáticas entre porosidade drenável e condutividade hidráulica do solo saturado*. 2008. 90 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
- SAHYA, A.; SONKAMBLE, S.; JAMPANI, M.; RAO, A. N.; AMERASINGHE, P. Field site soil aquifer treatment shows enhanced wastewater quality: Evidence from vadose zone hydro-geophysical observations. *Journal of Environmental Management*, v. 345, nov. 2023.
- SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A. Cluster Analysis Method for Grouping Means in the Analysis of Variance. *Biometrics*, v. 30, n. 3, p. 507–512, set. 1974.
- SHARIF, M. A.; JAFARI, H. Groundwater Recharge Estimating in Mashhad-Chenaran Aquifer using water table fluctuations method (MRC algorithm). *Hydrogeology*, v. 6, n. 2, p. 151-168, mar. 2022.
- SILVA, N. B. N. *Análise do fluxo vertical na zona hiporreica de um trecho dos rios Beberibe e Capibaribe*. 2019. 53 p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.
- SILVA FILHO, J. A. *Avaliação do fluxo hiporreico em lago urbano via monitoramento e modelagem hidrodinâmica : estudo de caso no Lago da UFPE*. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. *Manual de método de análise de solo*. 3ª ed. Brasília: Embrapa, 2017. 577 p.
- TROIAN, G. C.; REGINATO, P. A. R.; SENHORINHO, E. M.; MARCUZZO, F. F. N.; KIRCHHEIM, R. E.; KUHN, I. A. *Estimativa de recarga pelo método water table fluctuation (wtf) na porção norte do aquífero costeiro do estado do Rio Grande do Sul*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 22., 2017. Florianópolis. Anais [...] Porto Alegre: ABRH, 2017. 8 p.
- VERAS, T. B. *Análise da interação rio-aquífero na zona hiporreica para a tecnologia de filtração em margem: estudo de caso no rio Beberibe-PE*. 2011. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.
- VERAS, T. B.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; BARCELLOS, R. L.; SANTOS, L. L. Investigação do fluxo vertical da água na zona hiporreica num trecho do Rio Beberibe – PE. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 4, p. 674-684, dez. 2016a.
- VERAS, T. B.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; BARRETO, A. S. F. Interação rio-aquífero e a meiofauna do ambiente hiporreico. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 31, n. 1, p. 20-35, nov. 2016b.