

Estimativa de recarga hídrica utilizando o método Water Table Fluctuation em aquífero aluvionar: Estudo de caso no Alto Rio Capibaribe, região semiárida Pernambucana

Estimation of water recharge using the Water Table Fluctuation method in an alluvial aquifer: Case study in Upper Capibaribe River, semiarid region of Pernambuco

Gabriel Everton Marinho Neves Bezerra¹; Rochele Sheila Vasconcelos²; Tiago Oliveira Caetano³; Bruna Marques Soares⁴; José Almir Cirilo⁵; Anderson Luiz Ribeiro de Paiva⁶

¹ Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Centro Acadêmico do Agreste (CAA), Campus Caruaru, Núcleo de Tecnologia (NT), Caruaru/PE, Brasil. Email: gabriel.everton@ufpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9199-3032>

² Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Ilhéus, Departamento de Ciência Agrárias e Ambientais, Ilhéus/BA, Brasil. Email: rvasconcelos1@uesc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5515-3579>

³ Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Centro de Tecnologia e Geociências (CTG), Campus Recife, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (DECIV), Recife/PE, Brasil. Email: tiago.caetano@ufpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7258-7662>

⁴ UFPE, CAA, Campus Caruaru, NT, Caruaru/PE, Brasil. Email: bruna.bms@ufpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4401-7121>

⁵ UFPE, CAA, Campus Caruaru, NT, Caruaru/PE, Brasil. Email: jose.cirilo@ufpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8672-0898>

⁶ UFPE, CTG, Campus Recife, DECIV, Recife/PE, Brasil. Email: anderson.paiva@ufpe.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3475-1454>

Resumo: O semiárido brasileiro possui baixas taxas de precipitações e altas taxas de evapotranspiração, dificultando o armazenamento de recursos hídricos superficiais. Diante dessa realidade, a população busca maneiras alternativas de utilização e armazenamento de água, muitas vezes recorrendo às águas subterrâneas armazenadas em aquíferos aluviais, principalmente comunidades ribeirinhas e rurais. Nesse contexto, esse trabalho visa compreender o fenômeno de recarga hídrica subterrânea, em uma aluvião, em uma região semiárida brasileira utilizando o método *Water Table Fluctuation* (WTF). Além disso, objetiva analisar a influência da construção de uma barragem subterrânea na recarga hídrica. Durante o período de setembro de 2020 a setembro de 2023, quatro poços na aluvião do Alto Rio Capibaribe, no município de Santa Cruz do Capibaribe, região semiárida de Pernambuco, foram monitorados tanto por meio de sensores de nível instalados, quanto manualmente. A precipitação neste período monitorado foi superior à média histórica de 1987 a 2023, que tem precipitação mensal média de 37,70 mm. A recarga hídrica nos poços foi em média, 27,40%, variando entre 15,71% e 32,82%. Observou-se maior estabilidade no nível de água dos poços, principalmente no poço mais próximo a barragem subterrânea, o qual barra o fluxo subterrâneo na aluvião, causando o acúmulo de água no trecho de montante, protegendo-a da radiação solar. No entanto, é necessária uma série maior de dados para confirmar essa tendência esperada.

Palavras-chave: Recarga hídrica subterrânea; *Water Table Fluctuation* (WTF); Barragem subterrânea.

Abstract: The Brazilian semi-arid region experiences low precipitation and high evapotranspiration rates, making it challenging to store surface water resources. Given this reality, the population seeks alternative ways to use and store water, often resorting to groundwater stored in alluvial aquifers, especially in riverside and rural communities. In this context, this study aims to understand the phenomenon of groundwater recharge in an alluvium in a Brazilian semi-arid region using the *Water Table Fluctuation* (WTF) method. Additionally, it aims to analyze the influence of constructing a subsurface dam on water recharge. From September 2020 to September 2023, four wells in the alluvium of the Upper Capibaribe River, in the municipality of Santa Cruz do Capibaribe, a semi-arid region of Pernambuco, were monitored both by installed level sensors and manually. Precipitation during this monitored period was above the historical average from 1987 to 2023, with an average monthly precipitation of 37.70 mm. The average water recharge in the wells was 27.40%, ranging from 15.71% to 32.82%. The water level in the wells was observed to be more stable, especially in the well closest to the underground dam, which blocks the underground flow in the alluvium, causing water accumulation upstream and protecting it from solar radiation. However, a larger dataset is needed to confirm this expected trend.

Keywords: Underground water recharge; *Water Table Fluctuation* (WTF); Underground dam.

1. Introdução

Nos últimos anos, a preocupação com a disponibilidade de água nas áreas semiáridas do nordeste brasileiro tem se intensificado, refletindo na crescente preocupação com sua escassez e acesso. O aumento populacional e a demanda cada vez maior por esse recurso natural destacam a importância da preservação de sua qualidade e quantidade para promover o desenvolvimento sustentável da região (SANTOS, 2017). O crescimento populacional e a instabilidade climática têm gerado um desequilíbrio hídrico, resultando em uma redução dos recursos hídricos disponíveis por pessoa, tanto em termos de quantidade quanto de qualidade. Diante da escassez de recursos hídricos superficiais, o aproveitamento das águas subterrâneas se torna essencial e estratégico (CIRILO *et al.*, 2007).

O semiárido brasileiro é caracterizado por um conjunto de regiões com balanço hídrico negativo devido às precipitações médias anuais inferiores a 800 mm, uma insolação média de 2800 horas por ano, temperaturas médias anuais variando de 23° a 27° C, evaporação potencial atingindo 2.000 mm por ano e a umidade relativa média do ar em torno de 50% (Moura *et al.*, 2007). A região do Capibaribe é subdividida em alto, médio e baixo Capibaribe, sendo a área de estudo situada no Alto Capibaribe, a mais afetada pela escassez hídrica devido ao seu clima semiárido (BRAGA, 2016).

No município de Santa Cruz do Capibaribe, em Pernambuco, localizado a cerca de 10 km da região analisada, possui um clima com baixa precipitação anual, com uma média em torno de 450 mm anuais (ANA, 2023). A região analisada é caracterizada por possuir depósitos de aluviões, que consistem em sedimentos clásticos, como cascalhos, areias e partículas finas. Esses sedimentos são formados principalmente pela erosão fluvial e são transportados pelo escoamento superficial. Ao longo de vários anos, esses materiais são depositados no leito e nas margens dos sistemas fluviais, formando camadas que podem influenciar significativamente a hidrologia local (SÁ; DINIZ, 2012).

Quando não há escoamento superficial de água na região semiárida brasileira, é comum recorrer à utilização de poços artesanais, como os "cacimbões" e as "cacimbas", que são construídos em situações de emergência (PAIVA *et al.*, 2014). Além disso, existem técnicas que auxiliam no armazenamento de águas subterrâneas, de acordo com Melo *et al.* (2009), pesquisas realizadas no Nordeste pernambucano mostraram que o uso de barragens subterrâneas para captar água da chuva emerge como uma solução prática e eficaz para elevar o nível de água nos poços. Essa prática não só garante o fornecimento de água para consumo humano e animal, mas também desempenha um papel fundamental no apoio à produção agrícola nas comunidades rurais (MENDONÇA *et al.*, 2012).

Portanto, analisar o comportamento das recargas aquíferas é essencial para a determinação do volume de recursos hídricos subterrâneos que são lentamente renováveis (PARALTA *et al.*, 2003). A estimativa da recarga em aquíferos é considerada complexa, pois as variáveis são muito voláteis tanto no espaço quanto no tempo (PINTO *et al.*, 2010).

Segundo Hirata, Zoby e Oliveira (2010), embora as águas subterrâneas sejam amplamente utilizadas no Brasil, o conhecimento sobre sua quantidade e qualidade ainda é bastante limitado, principalmente devido à falta ou à precariedade dos sistemas de monitoramento. Conforme Santos *et al.* (2023), no Brasil, ainda há lacunas na obtenção de dados e no monitoramento climático. Silva *et al.* (2020) destacam os custos expressivos associados à instalação, manutenção e operação de sistemas de monitoramento, especialmente nas regiões Norte e Nordeste do país.

Existem várias abordagens para estimar a recarga hidráulica subterrânea, e uma delas é o método Water Table Fluctuation (WTF), que pode ser consultado com detalhes em Healy e Cook (2002) e Healy (2010). Esse método se baseia na ideia de que os aquíferos não confinados são recarregados pelo fluxo descendente de água que atinge o lençol freático, resultando em um aumento volumétrico da reserva hídrica subterrânea (HEALY; COOK, 2002; SCANLON; HEALY; COOK, 2002).

Coelho *et al.* (2017) realizaram um estudo na região semiárida do nordeste brasileiro, especificamente na bacia do Rio Ipanema, no riacho Mimoso, durante os anos de 2011 e 2012. O estudo comparou os resultados obtidos através do método WTF com os do método WB (Water Balance). Os resultados indicaram uma taxa de recarga total de 13,3% em relação à precipitação pelo método WTF, enquanto o método WB apresentou uma taxa de recarga total de 10,3%.

Albuquerque *et al.* (2015) conduziram uma análise na região da bacia do Alto Ipanema, próxima à Pesqueira, comparando o método de WTF com o balanço hídrico de Thornthwaite & Mather (TM) durante o período de 2002 a 2011. De acordo com o método TM, o ano de maior recarga foi 2004, registrando 28,63%, enquanto o método WTF registrou uma recarga total de 27,47% para o mesmo período. O estudo revela uma correlação de Pearson ($r = 0,97$) entre os dois métodos, indicando uma diferença mínima de apenas 1,9% na estimativa da recarga em relação à precipitação total.

Vários autores estimaram a recarga hídrica de poços usando o WTF ao redor do mundo, como Crosbie *et al.* (2019) na região norte da Austrália, Delottier *et al.* (2018) na França, Yimam *et al.* (2023) na Etiópia, e Boumis *et al.* (2022) na Carolina do Norte nos Estados Unidos da América.

De acordo com Wendland, Barreto e Gomes (2007) e Crosbie et al. (2019), o método WTF demonstra ser mais eficaz em aquíferos que apresentam grandes variações nos níveis de água, o que é característico dos aquíferos na região em análise. Assim, o objetivo principal desta análise é estimar a recarga hidráulica subterrânea em uma unidade aquífera não confinada utilizando o método WTF. Além disso, busca-se analisar os impactos da instalação de uma barragem subterrânea localizada na bacia do Rio Capibaribe, no município de Santa Cruz do Capibaribe, região semiárida de Pernambuco.

2. Metodologia

Conduziu-se o projeto na região semiárida do Nordeste, mais especificamente na bacia do Rio Capibaribe, na área do Alto Capibaribe, próxima à cidade de Santa Cruz do Capibaribe e ao distrito de Poço Fundo, no Estado de Pernambuco (Figura 1). Devido às limitações orçamentárias do projeto, apenas quatro poços foram analisados (P1 a P4), refletindo a capacidade disponível para a instalação dos sensores.

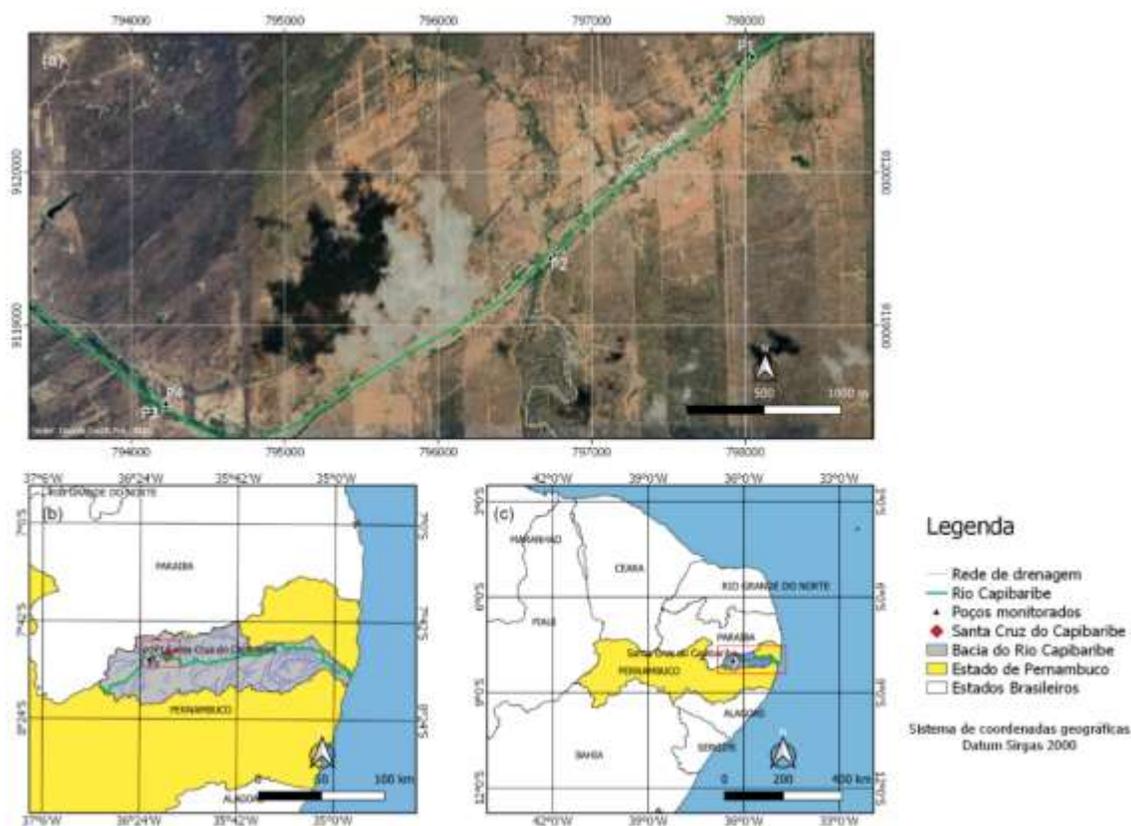


Figura 1 – Localização da área de estudo, no Alto Rio Capibaribe.

Fonte: Autores (2024).

Os parâmetros geográficos, como a latitude, longitude, altitude, e profundidade dos poços analisados encontram-se na Tabela 1. O Poço P1 localiza-se cerca de 85 m da rodovia PE-160, possuindo diâmetro de 1,50 m. O Poço P2 localiza-se cerca de 600 m da rodovia PE-160 e possui diâmetro de 1,50 m. Os poços P3 e P4 localizam-se cerca de 140 m da rodovia PE-160 e possuem o mesmo diâmetro de 3,40 metros, é importante destacar que os poços P3 e P4 estão situados em proximidade um do outro (Figura 2).

Para o monitoramento do nível de água nos poços cacimbão, utilizou-se um datalogger do tipo Dalo 105 da Ampeq em cada poço, para registrar o nível estático da água a cada 5 minutos. Todos os quatro sensores foram instalados em setembro de 2021. Planejou-se realizar a coleta dos dados uma vez por mês para verificar também a situação do sensor (e.g. calibração). Com tal programação, coletou-se em média 8.640 dados por mês de cada poço, sendo bastante relevante para entender o comportamento da recarga hídrica. Para o download dos dados, utilizou-se portas USB do notebook conectado

ao Datalogger pelo cabo tipo AM, comum para impressoras. O escopo deste estudo engloba a análise da recarga dos poços ao longo de um período de até três anos, com término de análise em setembro de 2023 para todos os poços. Com exceção do Poço P1 que foi analisado apenas por dois anos, devido estar soterrado no período anterior à setembro de 2021. Como informações complementares, avaliou-se o histórico pluviométrico da estação de Código 736041 (ANA, 2023), situada em Santa Cruz do Capibaribe, com dados de 1987 a 2023.

Tabela 1 – Poços cacimbão selecionados na área de estudo.

Poço	Cota (m)	Latitude	Longitude	Profundidade (m)	Início do monitoramento	Término do monitoramento
P1	451	7°56'43.60"S	36°17'48.20"O	3,00	Set/21	Set/23
P2	452	7°57'26.66"S	36°18'30.76"O	3,30	Set/20	Set/23
P3	453	7°57'58.64"S	36°19'52.33"O	3,50	Set/20	Set/23
P4	453	7°57'58.02"S	36°19'52.33"O	3,25	Set/20	Set/23

Fonte: Autores (2024).

Na estimativa de recarga hídrica de águas subterrâneas, o método WTF tem como princípio analisar medições de níveis freáticos em poços de monitoramento ou piezômetros durante um determinado período. Esse método baseia-se na premissa de que as variações positivas do nível estático da água subterrânea estão relacionadas com as águas das precipitações que, após percolarem no solo, atingem o nível freático subterrâneo, ocorrendo assim a recarga (HEALY; COOK, 2002). A recarga das águas subterrâneas pode ser calculada pelo método WTF através da Equação 1.

$$R = S_y \frac{dh}{dt} \quad \therefore \quad R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

Em que:

R = Recarga hídrica (mm);

S_y = Rendimento específico (adimensional);

Δh = Variação da altura do nível de água (mm);

Δt = Período escolhido para estimativa (dia, mês, ano).

A variação do nível de água é então correlacionada com outros dados, como a precipitação local que nesse caso foi utilizada a Estação 736041, gerida pela ANA, localizada cerca de 10 km dos poços em análise, no município de Santa Cruz do Capibaribe. Durante o período de setembro de 2020 a setembro de 2021, as leituras do nível de água foram feitas exclusivamente manualmente, sendo os sensores instalados somente a partir de setembro de 2021.

A aplicação da Equação 1 é realizada de forma individual para cada pico de elevação do nível de água, em que Δh é considerado a variação entre o pico mais baixo e o pico mais alto de cada recarga, podendo ocorrer várias recargas durante o ano (MAZIERO; WENDLAND, 2005). Para a determinação do Δh é preciso analisar a diferença entre o pico superior e a projeção do pico inferior caso não ocorresse o fenômeno de precipitação (Figura 2).

Healy e Cook (2002) destacaram não haver um tipo específico de função para o desenho da linha extrapolada de recessão, no entanto, Wendland, Barreto e Gomes (2007) e Coelho (2016) optaram por utilizar a função potencial (Equação 2), escolha esta que foi adotada neste estudo.

$$N_c = a.(P - P_0)^b \quad (2)$$

Sendo; N_c representa o nível calculado (m); P é o número de dias desde o início do monitoramento dos níveis; enquanto a, b e P₀ são parâmetros a serem determinados. Com a identificação dos parâmetros da função de recessão, aplica-se essa função aos demais períodos de recessão. A extrapolação da curva deve estender-se até o ponto de início de um novo período recessivo (COELHO, 2016).

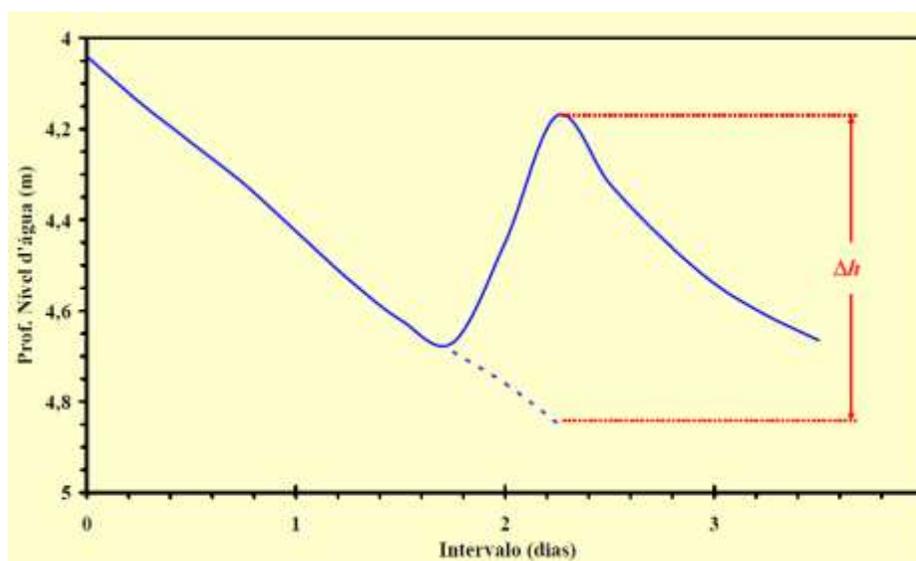


Figura 2 – Exemplo hipotético de elevação do nível de água em poço com uma recarga de precipitação.
Fonte: Maziero e Wendland (2005).

O S_y pode ser definido como uma quantidade de água no solo que depois de saturado é drenado por gravidade, podendo acontecer isso quando há um rebaixamento dos aquíferos (MEINZER, 1923). Os valores do S_y podem ser determinados através de uma formulação empírica proposta por Biecinski (PAZDRO, 1983 *apud* ALVAREZ; NIEDZIELSKI, 1996), sendo relacionado o S_y com a condutividade hidráulica (Equação 3). O S_y é um coeficiente, portanto, não possui unidade de medida, podendo também ser expresso em porcentagem.

$$S_y = 0,117 \cdot \sqrt[7]{K} \quad (3)$$

Em que:

S_y = Rendimento específico;

K = Condutividade hidráulica (m/dia).

Neste estudo, o valor de S_y foi calculado com base na condutividade hidráulica (K), obtida por Silva (2015). Este pesquisador analisou o K utilizando o método da equação de Kozeny-Carman em três locais distintos na região do Alto Rio Capibaribe, em duas profundidades diferentes, 0,5 m e 1,0 m (Tabela 2). A condutividade hidráulica foi então aplicada na Equação (3) para calcular o rendimento específico S_y .

Tabela 2 – Condutividade hidráulica estimada para o trecho em estudo no Alto Rio Capibaribe.

Amostra	Profundidade (m)	Coordenadas	K (m/s)
1	0,5	7° 56' 43,4" S	1,83E-06
2	1	36° 17' 48,6" O	2,07E-06
3	0,5	7° 57' 26,5" S	9,22E-06
4	1	36° 18' 30,8" O	7,64E-06
5	0,5	7° 57' 57,8" S	2,84E-05
6	1	36° 19' 54,6" O	2,28E-05

Fonte: Silva (2015).

Os valores de K selecionados para o Poço P1 foram obtidos com a média entre as amostras 1 e 2, considerando a proximidade entre o Poço P1 e as amostras. O mesmo critério foi aplicado para os outros poços. No caso do Poço P2, utilizou-se o valor médio de K entre as amostras 3 e 4, enquanto os poços P3 e P4 utilizou-se a média das amostras 5 e 6.

A recarga hídrica dos poços foi calculada a partir da Equação (1), utilizando a variação do nível de água Δh (mm) em relação ao tempo Δt (mês). Portanto, a fim de calcular a recarga, a variação do nível da água subterrânea (Δh) é obtida considerando a diferença entre o valor máximo (pico) e o valor mínimo (ponto mais baixo) da curva de recessão anterior, que é extrapolada até o momento do pico. No qual, toda vez que houve uma recarga esse procedimento de cálculo foi repetido, e calculado o somatório da recarga total em relação ao período de análise. Realizou-se também o cálculo da recarga total média por mês em relação ao período em análise.

3. Resultados e discussão

A região do Agreste pernambucano, em particular o município de Santa Cruz do Capibaribe e suas proximidades, é caracterizada por experimentar consideráveis oscilações nas precipitações. Essa sazonalidade pode ser visualizada na Figura 3 a partir da série histórica compreendida entre os anos de 1987 e 2023, da estação pluviométrica de Código 736041 (ANA, 2023), situada em Santa Cruz do Capibaribe. O valor médio anual da precipitação é de 37,70 mm, verifica-se que nos meses de fevereiro a julho as chuvas são acima da média histórica, enquanto os meses de janeiro, e de agosto a dezembro são os meses que geralmente possuem valores abaixo da média. Cavalcanti (2018) conduziu um estudo na região de Santa Cruz do Capibaribe, analisando uma série histórica entre 1962 a 2016, e identificou padrões sazonais de precipitação semelhantes aos deste artigo, com o período chuvoso compreendido de março a julho, e o período de seca de agosto a dezembro. Salienta-se também que os anos de 2022 e 2023 acabaram registrando precipitações acima da média histórica para esta localidade.

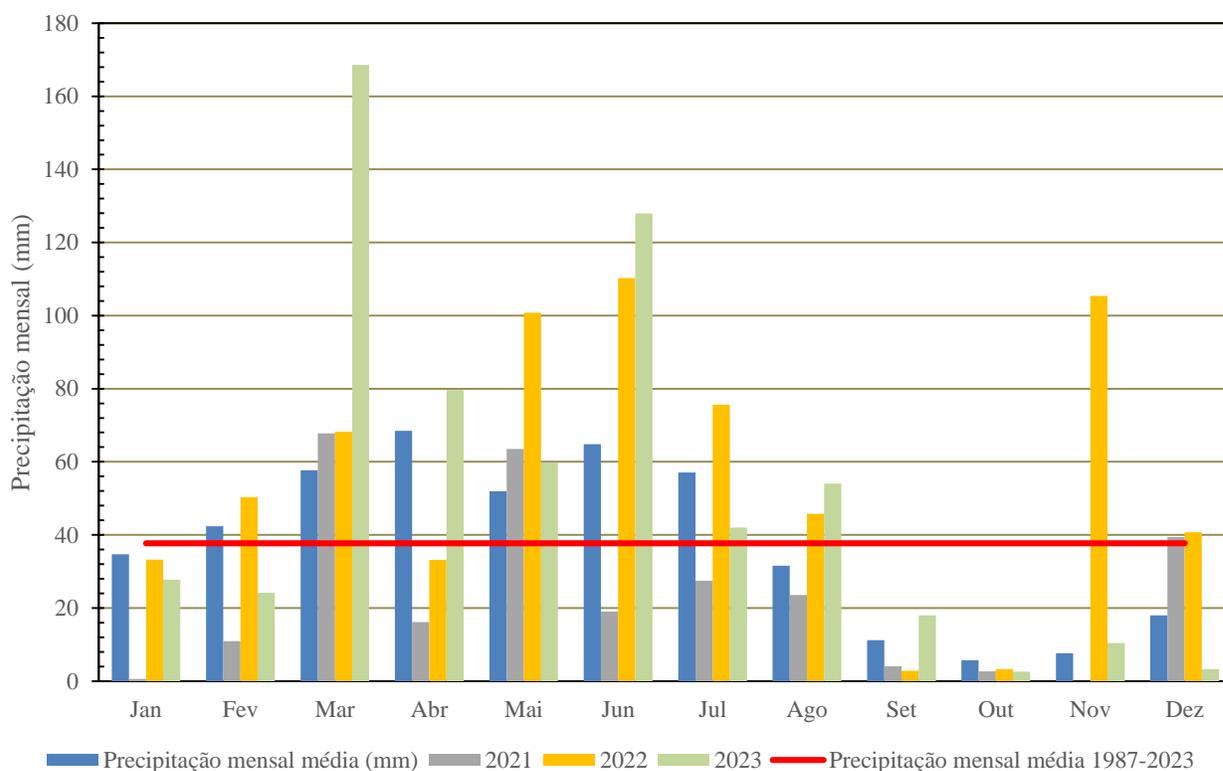


Figura 3 – Precipitação mensal na Estação 736041, em Santa Cruz do Capibaribe, entre 1987 e 2023.
Fonte: Os Autores (2024).

Os poços P1 e P2 demonstram uma variação nos níveis de água que mostra certa consistência até dezembro de 2022, antes da construção da barragem subterrânea. Era esperado que os poços P3 e P4, devido à sua proximidade geográfica, exibissem padrões de variação nos níveis de água semelhantes (Figura 4).

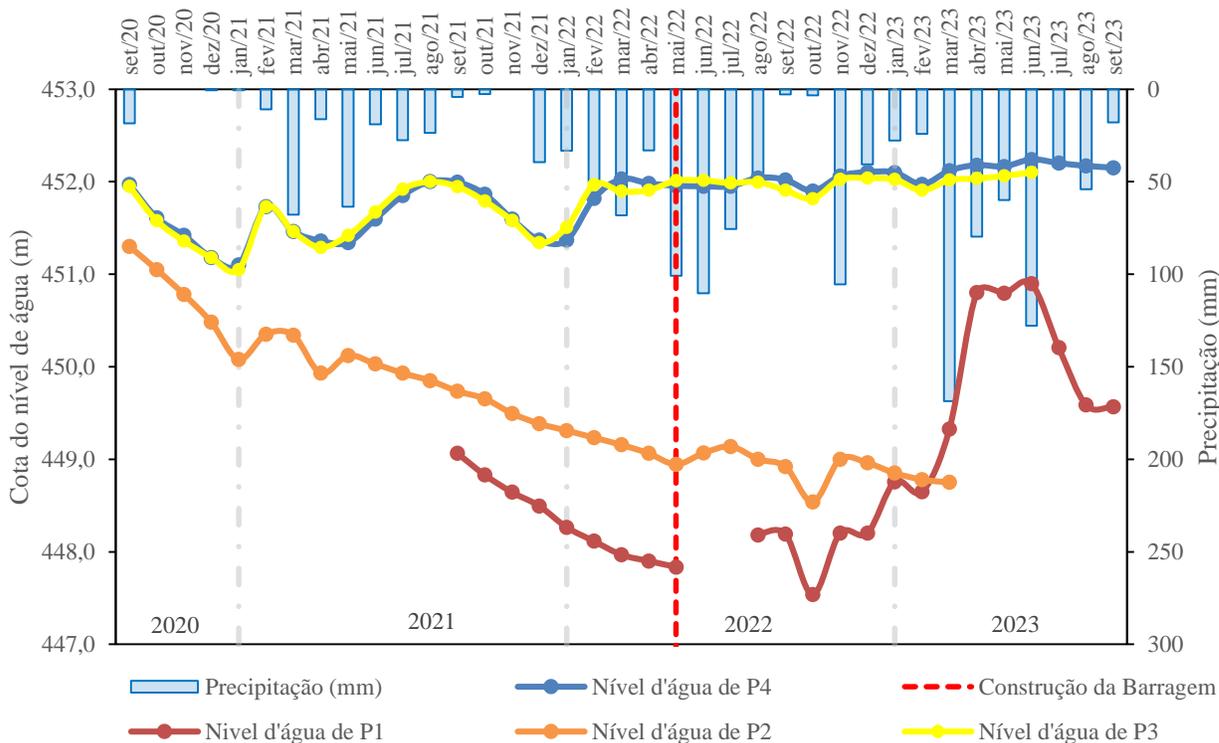


Figura 4 – Variação dos níveis de água nos poços monitorados, na aluvião do Alto Rio Capibaribe e precipitação mensal na Estação 736041.

Fonte: Autores (2024).

Analisando a Figura 4 contendo os poços monitorados, nota-se uma maior estabilidade na variação do nível de água na maioria dos poços após a instalação da barragem subterrânea, em maio de 2022, isso se deve ao fato de que a barragem subterrânea é uma técnica que envolve o barramento do fluxo subterrânea e consequentemente a recarga infiltrada diretamente na aluvião, por meio de uma barreira construída transversalmente ao percurso da aluvião. Dessa forma, a barragem subterrânea contribui para elevar o lençol freático, mantendo o solo úmido por mais tempo, retendo o nível de água dos poços. Funcionando como um reservatório subterrâneo, protegido pelos efeitos direto da evaporação. No caso do Poço P1, a partir de outubro de 2022, foram observados aumentos significativos no nível de água. No entanto, para o Poço P2, não foram registradas mudanças substanciais no aumento do nível de água após a instalação da barragem. Houve falha no equipamento a partir de março de 2023, mas já seria perceptível algum efeito nas leituras de maio/2022 a março/2023. Essa diferença fica claro com o efeito do barramento observado nas leituras do Poço P1 com um maior armazenamento à jusante da barragem subterrânea. O que já não alcança o Poço P2 que está cerca de 1,9 km a montante do Poço P1, e consequentemente também não atinge os poços P3 e P4 que estão cerca de 2,85 km à montante do Poço P2. Quanto aos poços P3 e P4, percebeu-se que, após a construção da barragem, houve uma retenção maior no volume de água, com menos reduções no nível de água, mantendo-se em um nível elevado estável, considerando que a cota do terreno é de 453 metros e o nível de água permaneceu em torno de 452 metros (Figura 4). Contudo, é importante destacar que para confirmar esse comportamento, é necessário examinar um conjunto mais amplo de dados, a fim de validar os resultados observados até agora.

O período em análise foi caracterizado por ter precipitações intensas que a região não costumava ter, o que causou uma alteração abrupta no nível de água dos poços. Silva *et al.* (2023) analisaram as variações das precipitações em Santa Cruz do Capibaribe entre o período de 1988 e 2022, no qual encontraram resultados acima da média para os anos de 2020 e 2022, semelhantes aos deste artigo. Em março de 2023, ocorreu uma precipitação de 168,6 mm, enquanto a média histórica para esse mês é de 57,69 mm. Em junho de 2022 foi registrado 110,3 mm de chuva, e junho de 2023 registrado 127,9 mm,

em comparação com uma média histórica de 64,8 mm para junho. Além disso, novembro de 2022 teve uma precipitação de 105,4 mm, muito acima da média histórica de apenas 7,61 mm para esse mês (Figuras 3 e 4).

Durante o período de um ano, entre maio de 2021 e maio de 2022, o Poço P2 enfrentou a maior duração de retração no nível de água. Logo após, o Poço P1 apresentou um período de retração de setembro de 2021 a maio de 2022. Por outro lado, os poços P3 e P4 não registraram grandes períodos de escassez de água, com o maior intervalo observado entre setembro de 2020 e janeiro de 2021 (Figura 4).

Para calcular o rendimento específico (Sy), determinou-se a média da condutividade hidráulica (Kméd), seguindo o mesmo procedimento para cada um dos poços analisados. Ao utilizar esse valor de Kméd na Equação 3, foi possível obter o rendimento específico Sy (Tabela 3).

Tabela 3 – Condutividade hidráulica e rendimento específico utilizado para a aluvião do Alto Rio Capibaribe.

Poço	Amostra	K (m/s)	Kméd (m/s)	Sy
P1	1	1,83E-06	1,95E-06	0,09
	2	2,07E-06		
P2	3	9,22E-06	8,43E-06	0,11
	4	7,64E-06		
P3 e P4	5	2,84E-05	2,56E-05	0,13
	6	2,28E-05		

K – condutividade hidráulica; Kméd – condutividade hidráulica média; Sy – rendimento específico

Fonte: Autores (2024).

Com a extrapolação da curva nos pontos onde ocorreram recargas hídras, observa-se os padrões de recarga para cada poço. No caso do Poço P1, as recargas ocorreram em novembro de 2022, janeiro de 2023 e de março a junho de 2023 (Figura 5). Já para o Poço P2, as recargas ocorreram em fevereiro e março de 2021, maio de 2021, junho e julho de 2022 e novembro de 2022 (Figura 6). Em relação ao Poço P3, as recargas foram registradas em fevereiro de 2021, entre maio e agosto de 2021, entre janeiro e fevereiro de 2022, maio de 2022, novembro de 2022 e março de 2023 (Figura 7). Para o Poço P4, as recargas ocorreram entre fevereiro de 2021, entre maio e agosto de 2021, entre janeiro e março de 2022, agosto de 2022, novembro de 2022, março de 2023 e junho de 2023 (Figura 8). Em que, Nc representa o nível calculado e R² é o coeficiente de determinação da equação obtida.

As maiores recargas foram observadas nos meses de março a abril de 2023 no Poço P1, com 168,6 mm e 79,6 mm de precipitação registradas, respectivamente. No caso do Poço P2, o pico de recarga ocorreu em novembro de 2022, com 105,4 mm de precipitação. Quanto aos poços P3 e P4, a maior recarga foi registrada entre janeiro e março de 2022, atingindo 68,2 mm de precipitação em março de 2022.

Os poços P1 e P2, embora apresentem certa similaridade no comportamento da variação do nível de água entre setembro de 2021 e dezembro de 2022, experimentaram recargas distintas, resultando em uma diferença de 13,83%. É importante ressaltar, no entanto, que os dados de monitoramento do Poço P2 foram interrompidos após março de 2023, enquanto o Poço P1 não possuía dados de monitoramento anteriores a setembro de 2021. Essas diferenças nos períodos de monitoramento podem ter influenciado essa discrepância na recarga observada. A recarga hídrica dos poços P3 e P4 pelo método WTF apresentou semelhanças significativas, como era esperado devido à proximidade entre eles, sendo registrada apenas uma pequena diferença de 1,27% na recarga entre esses poços.

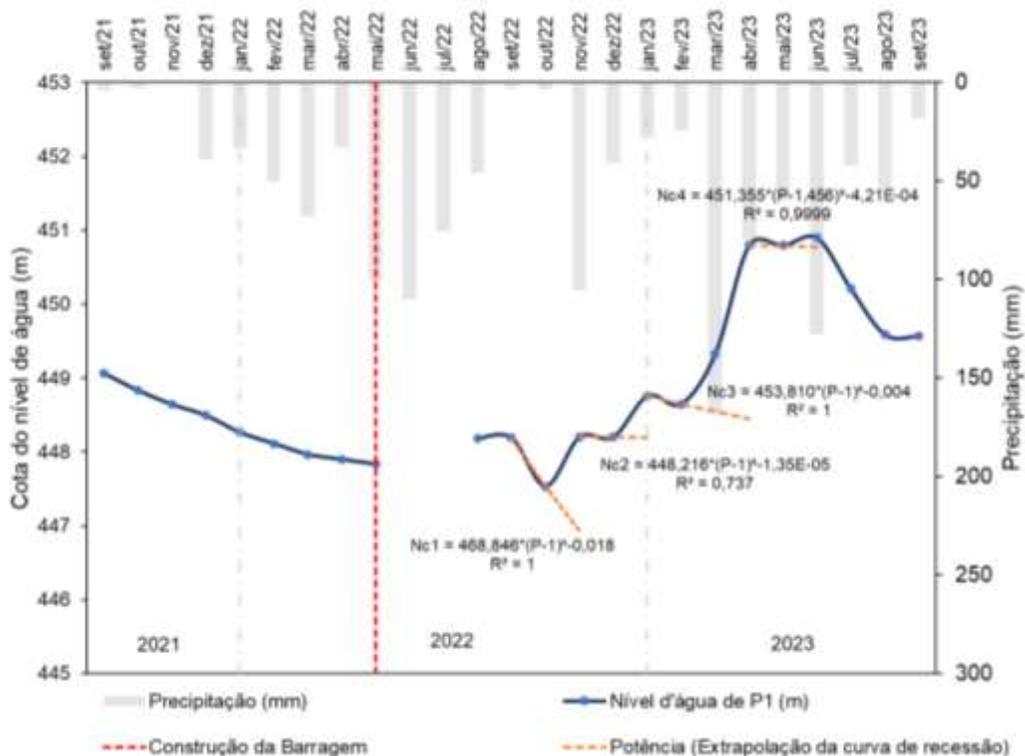


Figura 5 – Aplicação do método WTF no Poço P1, 2021 a 2023, na aluvião do Alto Rio Capibaribe. Fonte: Autores (2024).

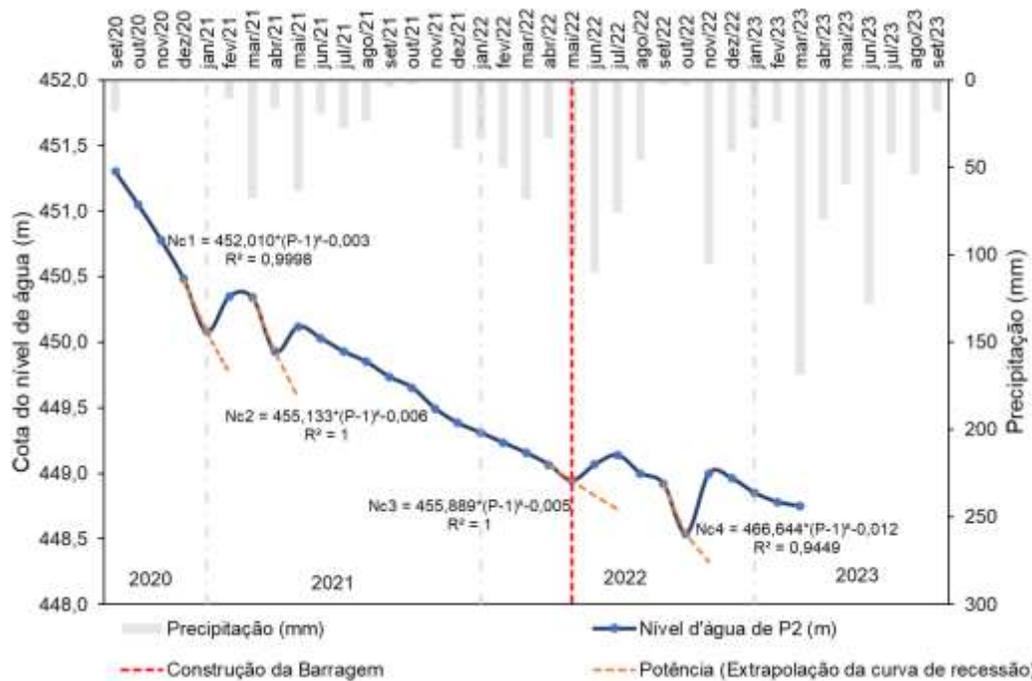


Figura 6 – Aplicação do método WTF no Poço P2, 2021 a 2023, na aluvião do Alto Rio Capibaribe. Fonte: Autores (2024).

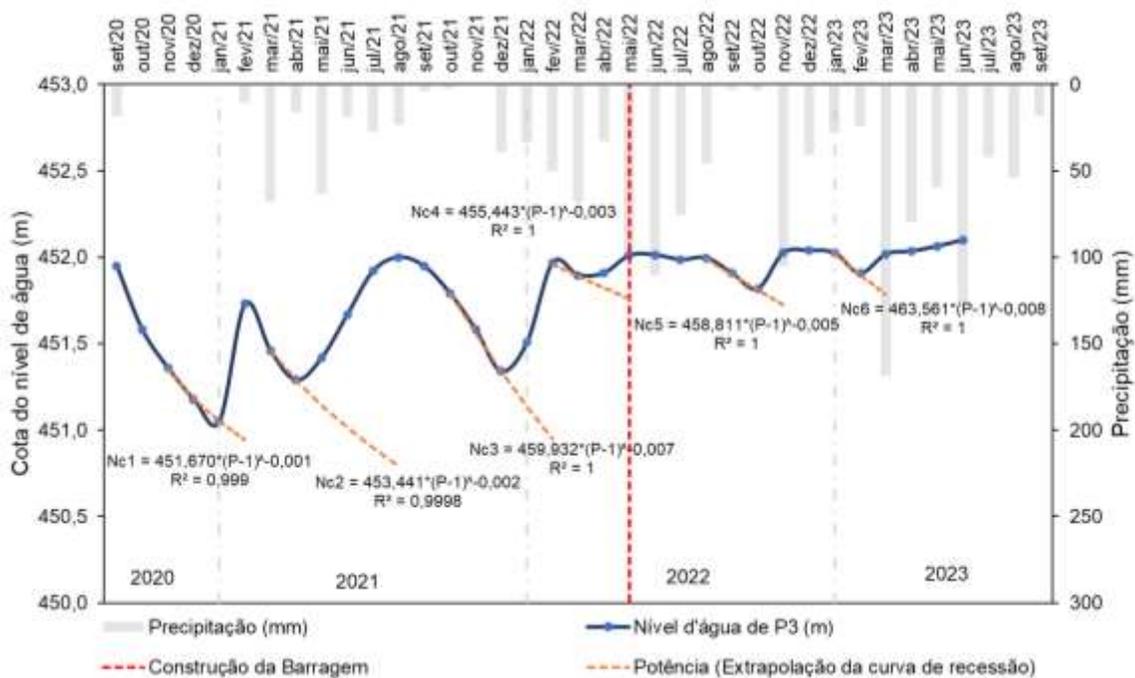


Figura 7 – Aplicação do método WTF no Poço P3, 2021 a 2023, na aluvião do Alto Rio Capibaribe. Fonte: Autores (2024).

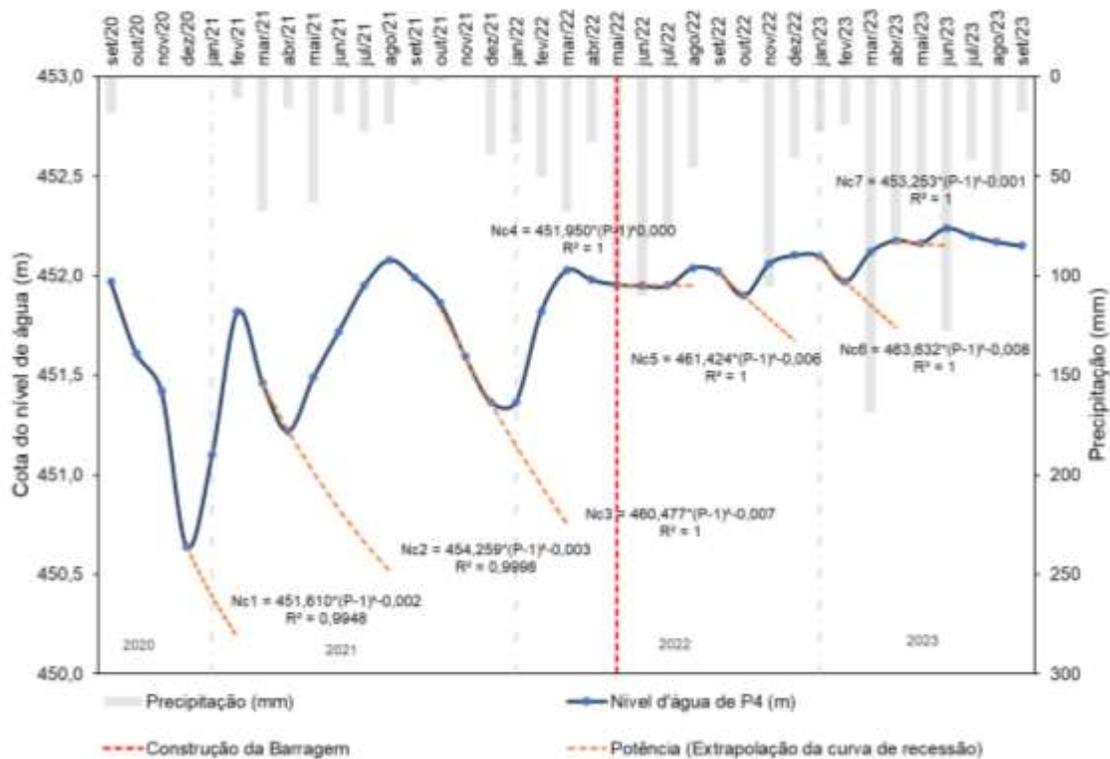


Figura 8 – Aplicação do método WTF no Poço P4, 2021 a 2023, na aluvião do Alto Rio Capibaribe. Fonte: Autores (2024).

O Poço P1 registrou o maior valor de Δh , atingindo 2,351 metros (Δh_3), representando a maior variação pontual de nível de água entre os poços analisados. O Poço P2 obteve a maior variação de 0,676 metros (Δh_4), o Poço P3 obteve 1,208 metros (Δh_2) e o Poço P4 obteve 1,267 metros (Δh_4) (Tabela 4).

Na Tabela 5 observa-se os valores estimados da recarga total, abrangendo todo o período em análise, para os quatros poços monitorados.

Com base na recarga mensal de cada poço, observou-se que, embora o Poço P4 tenha registrado a maior recarga total em relação aos outros, o Poço P1 apresentou a maior taxa de recarga mensal, com 16,21 mm por mês. Por outro lado, o Poço P2 registrou a menor recarga total, com 246 mm, e uma taxa de 6,83 mm por mês. Os valores de recarga expressos como parcela da precipitação variaram entre 15,71% e 32,82%, com média de 27,40% (Tabela 5).

Tabela 4 – Variação do nível de água Δh , para os poços na aluvião do Alto Rio Capibaribe, 2021 a 2023.

Δh (m)	P1	P2	P3	P4
Δh_1	1,260	0,580	0,779	0,692
Δh_2	0,560	0,545	1,208	0,933
Δh_3	2,351	0,404	1,013	1,267
Δh_4	0,120	0,676	0,249	0,09
Δh_5	-	-	0,294	0,424
Δh_6	-	-	0,225	0,427
Δh_7	-	-	-	0,089
$\Sigma \Delta h$	4,292	2,205	3,770	3,921

Fonte: Autores (2024).

Tabela 5 – Recarga hídrica pelo método WTF, na aluvião do Alto Rio Capibaribe, 2021 a 2023.

Poço	Período (meses)	R (mm)	R mensal (mm/mês)	R/P (%)
P1	24	389,18	16,21	29,54
P2	36	246,00	6,83	15,71
P3	36	494,06	13,72	31,55
P4	36	513,85	14,27	32,82
Média				27,40

Fonte: Autores (2024).

Coelho et al. (2017) realizaram um estudo na região semiárida do nordeste brasileiro, especificamente na bacia do Rio Ipanema, no Riacho Mimoso, durante os anos de 2011 e 2012. O estudo comparou os resultados obtidos através do método WTF com os do método WB (Water Balance). Os resultados indicaram uma taxa de recarga total de 13,3% em relação à precipitação pelo método WTF, enquanto o método WB apresentou uma taxa de recarga total de 10,3%.

Tesfaldet, Puttiwongrak e Arpornthip (2019) analisaram a estimativa de recarga de 28 poços em Thepkasattri na Tailândia, a partir do método WTF, com dados entre 2012 e 2015. A recarga estimada resultou em 26% da precipitação anual em 2015.

Outros estudos, como o de Andrade et al. (2014), também identificaram uma recarga hídrica semelhante com a recarga média deste artigo, sendo uma recarga de 27% usando o método WTF para um aquífero aluvial na região semiárida de Pernambuco, especificamente no riacho Mimoso, no município de Pesqueira, durante o ano de 2004. Teramoto e Chang (2018) também encontrou valores semelhantes aos relatados nesta dissertação, registrando uma recarga de 33% para um aquífero em São Paulo no ano de 2011.

4. Considerações finais

A aplicação do método WTF demonstrou facilidade de estimar recargas quando há disponibilidade de dados de nível d'água ao longo do tempo, embora os valores de recarga encontrados para P3 (31,55%) e P4 (32,82%) tenham sido um

pouco mais altos do que os que geralmente são relatados na literatura. Isso também se deve ao fato de que o período analisado foi marcado por uma precipitação maior do que o esperado.

A determinação do Sy é um fator que influencia diretamente no cálculo da recarga hídrica pelo método WTF. Este parâmetro é variável não apenas da localização, mas também em relação à profundidade, tornando-se o aspecto mais complexo de determinar nesta metodologia.

Após a construção da barragem subterrânea, observou-se maior estabilização nos níveis de água dos poços, com exceção do Poço P2. A presença da barragem subterrânea pode influenciar os níveis de água encontrados no estudo ao atuar como uma barreira para o fluxo de água subterrânea natural, permitindo que a água se acumule, como um reservatório subterrâneo, e conseqüentemente observar-se-á o aumento o nível de água nos poços próximos, mantendo uma estabilidade nos níveis. A barragem subterrânea também reduz a perda de água por evaporação, que possui altas taxas no semiárido, já que a água é acumulada nos poros do material granular da aluvião, minimizando o efeito da radiação solar diretamente sobre água. Potencialmente, a barragem subterrânea, quando também atingir cotas acima do nível da aluvião inicial, poderá auxiliar no acúmulo de sedimentos, aumentando o fluxo de água infiltrando no solo, melhorando a eficiência da recarga do aquífero. Esses fatores combinados explicam as alterações nos níveis de água observados após a instalação da barragem subterrânea, no entanto, é necessária uma série maior de dados para confirmar essa tendência já esperada. No geral, as medições dos níveis potenciométricos através dos poços apresentaram um bom desempenho relacionado a recarga hídrica durante o período analisado, com a média de recarga em relação à precipitação de 27,40%. O poço que obteve maior desempenho foi o Poço P4 com 32,82% de recarga em relação à precipitação, e o que teve pior desempenho foi o Poço P2 com 15,71%. Os poços P1 e P2 não demonstraram uma relação tão próxima com os poços P3 e P4, sendo que apresentaram um desempenho inferior em termos de acumulação de água em comparação com os poços P3 e P4.

Portanto, dada a importância da água subterrânea para as regiões semiáridas do Brasil, sugere-se que futuros estudos considerem uma amostragem mais ampla de poços e um período de análise mais extenso. Isso permitirá uma análise mais abrangente das recargas hídricas e possibilitará quantificar os efeitos da construção de barragem subterrânea, beneficiando a população local.

Agradecimentos

A FACEPE pela concessão de bolsa para a realização desta pesquisa e apoio com recursos financeiros de pesquisa no projeto UNIVERSITAS. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), campus Caruaru.

Referências

- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Hidroweb*. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 08/12/2023.
- ALBUQUERQUE, C. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. *Recarga de aquífero aluvial sob uso agrícola*. Águas Subterrâneas, 29(1), 60–71, 2015.
- ANDRADE, T. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. DE A.; RODRIGUES, D. F. B. *Estimation of alluvial recharge in the semiarid*. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.34, n.2, p.211-221, 2014.
- BOUMIS, G.; KUMAR, M.; NIMMO, J. R.; CLEMENT, T. P. *Influence of shallow groundwater evapotranspiration on recharge estimation using the water table fluctuation method*. Water Resources Research, 58, e2022WR032073, 2022.
- BRAGA, R. A. P. *Águas de Areias*. 1. ed. Recife: Ed. Clã. 366p. 2016.
- CAVALCANTI, J. E. *Extremos climáticos na bacia do rio Capibaribe: Estudo de caso no município de Santa Cruz do Capibaribe-PE*. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Humanidades, Campina Grande-PB, 2018.
- CIRILO, J. A.; CABRAL, J. J. S. P.; LOBO FERREIRA, J. P.; OLIVEIRA, M. J. P. M.; LEITÃO, T. E.; MONTENEGRO, S. M. G.; GÓES, V. C. O. *Uso Sustentável dos Recursos Hídricos em Regiões Semi-Áridas*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, 2007.

- COELHO, V. H. R. *Estimativa da recarga subterrânea em bacia hidrográfica do semiárido pernambucano a partir de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, CTG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2016.
- COELHO, V. H. R.; MONTENEGRO, S.; ALMEIDA, C. N.; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M.; GUSMÃO, A. C. V.; FREITAS, E. S.; MONTENEGRO, A. A. A. *Alluvial groundwater recharge estimation in semi-arid environment using remotely sensed data*. Journal of Hydrology, Volume 548, Pages 1-15, ISSN 0022-1694, 2017.
- CROSBIE, R.S.; DOBLE, R.C.; TURNADGE, C.; TAYLOR, A.R. *Constraining the Magnitude and Uncertainty of Specific Yield for Use in the Water Table Fluctuation Method of Estimating Recharge*. Water Resources Research, 55, pp.7343–7361, 2019.
- DELOTTIER, H.; PRYET, A.; LEMIEUX J.M.; DUPUY, A. *Estimating groundwater recharge uncertainty from joint application of an aquifer test and the water-table fluctuation method*. Hydrogeology Journal, 26, pp.2495–2505, 2018.
- GOOGLE EARTH PRO. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/>>. Acesso em: 09/07/2023.
- HEALY, R. W.; COOK, P. G. *Using ground-water levels to estimate recharge*. Hydrogeology Journal, v.10, P.91-110, 2002.
- HEALY, R. W. *Estimating Groundwater Recharge*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., 245 pp. 2010.
- HIRATA, R. C. A.; ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, F. R. *Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial*. In: *BICUDO, Tundisi, Scheuenstuhl (orgs.)*. Águas do Brasil: análises estratégicas. Cap. IX, p. 149-161, 2010.
- MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. *Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, SP*. II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. USP. São Carlos, 2005.
- MEINZER, O.E. *The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles*. U.S. Geol. Survey Water Supply, Pap 489, 321pp, 1923.
- MELO, R. F.; BRITO, L. T. L.; PEREIRA, L. A.; ANJOS, J. B. *Avaliação do uso de adubo orgânico nas culturas de milho e feijão caupi em barragem subterrânea*. Revista Brasileira de Agroecologia, 4 (2), p. 1264-1267, 2009.
- MENDONÇA, Z. C. L.; CANDEIAS, A. L. B.; SELVA, V. F.; SILVA, M. M.; RODRIGUES, G. G.; SANTOS, S. M. *Aspectos sanitários e de uso da água em pequenas comunidades rurais do Semiárido Pernambucano*. Revista Brasileira de Geografia Física, v.5, p. 1191-1202, 2012.
- PAIVA, A. L. R.; CAETANO, T. O.; SILVA, D. J.; CABRAL, J. J. S. P.; BRAGA, R. A. P. *Ocorrência e características construtivas de poços escavados em aluvião - trecho alto do Rio Capibaribe – PE*. Anais do XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE. Natal, RN, 2014.
- PARALTA, E. A.; OLIVEIRA, M. M.; LUBCZYNSKI, M. W.; RIBEIRO, L. F. *Avaliação da recarga do sistema aquífero dos Gabros de Beja segundo critérios múltiplos: disponibilidades hídricas e implicações agro-ambientais*. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, Cabo Verde, 6., 2003.
- PAZDRO, Z. *Hydrogeologia Ogólna*, W.G. Warszawa, p.575. In: ALVAREZ, R.H.; NIEDZIELSKI, H., 1996. *Estimacion de la recarga en la subcuena Rio de las Avenidas Pachuca Hidalgo México*. In: Congresso Latino-Americano de Hídr. Sub., 3. Atas..México: ALHSUD, p.35-46, 1983.
- PINTO, E. J. de A.; LIMA, J. do E. S.; DAVIS, E. G.; SILVA, A. J. da.; DANTAS, C. D. de. O.; CANDIDO, M. de. O.; PALMIER, L. R.; MONTE-MOR, R. C. de. A. *Estimativa da recarga natural do aquífero livre de uma sub-bacia da bacia representativa de Juatuba (MG) aplicado o método da variação dos níveis d'água (VNA)*. In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XVII ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS. São Luís – MA, 2010.

-
- SÁ, J. U.; DINIZ, J. A. O. *Aproveitamento das aluviões do semiárido do Nordeste*. In: Anais... XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Suplemento. Bonito, MS. Outubro de 2012.
- SANTOS, W. J. S. *Fluxo de água na aluvião em um trecho do Rio Capibaribe no Semiárido Pernambucano*. UFPE, Caruaru, 2017.
- SANTOS, P. H. N.; FERREIRA, W. S.; SANTANA, B. L. P. *Repercussões do El Niño e La Niña na precipitação do estado de Sergipe-Brasil*. Revista Brasileira de Climatologia, v. 33, p. 409-437, 2023.
- SCANLON, B.R.; HEALY, R.W.; COOK, P.G. *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge*. Hydrogeology Journal, v. 10, n. 1, p.18-39. 2002.
- SILVA, D. J. *Caracterização da Aluvião no Alto Rio Capibaribe*. Trabalho de Conclusão do Curso, graduação em Engenharia Civil, Núcleo de Tecnologia, Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2015.
- SILVA, D. T. et al. *Precipitação estimada por sensoriamento remoto no estado de Sergipe*. Nativa, Pesquisas Agrárias e Ambientais. V.8, n.2, 2020.
- SILVA, M. E. R.; OLIVEIRA, D. E. S.; OLIVEIRA, L. M. M.; SANTOS, S. M.; PAIVA, A. L. R. *Pluviometric variability in the Santa Cruz do Capibaribe city, Pernambuco*. Journal of Hyperspectral Remote Sensing. v.13, n.3, 471-483, 2023.
- TERAMOTO, E. H.; CHANG, H. K. *Métodos WTF e simulação numérica de fluxo para estimativa de recarga – exemplo Aquífero Rio Claro em Paulínia/SP*. Águas Subterrâneas, v. 32, n. 2, p. 173-180, 2018.
- TESFALDET, Y. T.; PUTTIWONGRAK, A.; ARPORNTHIP, T. *Spatial and temporal variation of groundwater recharge in shallow aquifer in the Thepkasattri of Phuket, Thailand*. Journal of Groundwater Science and Engineering, v. 8, n. 1, p. 10-19, 2019.
- WENDLAND, E., BARRETO, C., GOMES, L. H. *Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring*. J. Hydrol. 342, 261–269, 2007.
- YIMAM, A.Y.; SISHU, F.K.; ASSEFA, T.T.; STEENHUIS, T.S.; REYES, M.R.; SRINIVASAN, R.; TILAHUN, S.A. *Modifying the water table fluctuation method for calculating recharge in sloping aquifers*. Journal of Hydrology: Regional Studies, 46(101325), 2023.