

ZONEAMENTO DO POTENCIAL HÍDRICO NO AQUÍFERO ALUVIAL DO RIO SUCURU, SUMÉ, PB, COMO SUBSÍDIO AO PLANEJAMENTO DE USO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Everton John Camelo Alves⁸²

Jana Yres Barbosa de Sousa⁸³

Hugo Moraes de Alcântara⁸⁴

⁸² Doutorando em Engenharia de Recursos Naturais – PPGEGRN - Universidade Federal de Campina Grande –
- Campus Campina Grande – PB

⁸³ Graduada em Engenharia Agrícola – UAEEA-Universidade Federal de Campina Grande –
- Campus Campina Grande – PB

⁸⁴ Professor Associado II - Universidade Federal de Campina Grande – Campus de Sumé – PB

Introdução

Na região do Semiárido Brasileiro (SAB) há ocorrência de precipitações intensas que geram escoamento, em até cinco meses do ano, com evapotranspiração anual de até 2000 mm, características do clima seco semiárido (Abels et al., 2018; Rêgo et al., 2022). Os aquíferos aluviais desempenham papel importante para a manutenção de atividades agropecuárias nos períodos de seca no SAB, onde o escoamento superficial é responsável por sua recarga.

O uso e ocupação do solo não planejados por produtores rurais que utilizam áreas dos aquíferos aluviais aumentam a insegurança hídrica, sendo necessário mensurar o seu potencial hídrico como subsídio à tomada de decisão dos gestores de recursos hídricos e auxílio ao uso sustentável dos recursos naturais em regiões semiáridas (Al-Djazouli et al, 2021; Castillo et al., 2022; Kham et al., 2022; Kom et al., 2022; Suliman et al., 2022; Guria et al., 2024). A espessura do aquífero em sua extensão denota com maior precisão o volume de água disponível em fluxo e armazenado. Deve-se considerar esses critérios como prioritários para avaliar o potencial hídrico de aquíferos aluviais como subsídio ao planejamento dos usos múltiplos da água em regiões com pequena disponibilidade hídrica.

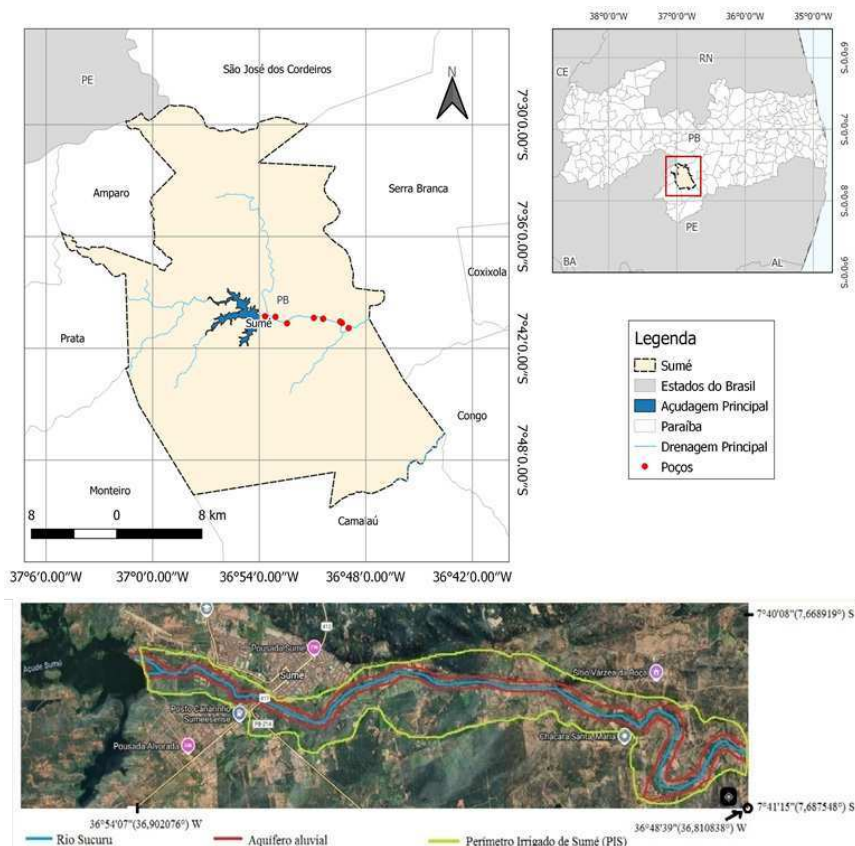
Objetivos

Realizar zoneamento do potencial hídrico no aquífero aluvial do rio Sucuru, no Perímetro Irrigado de Sumé, Paraíba, como subsídio ao planejamento de uso sustentável dos recursos hídricos.

Metodologia

A área de estudo é composta pelo aquífero aluvial do rio Sucuru, que possui área de 351 ha, largura de 50 m a 500 m, profundidade de 0,5 m a 10,0 m, comprimento de 12 km e capacidade de armazenamento estimada em 1.700.000 m³ (Rêgo et al., 2022; Abels et al., 2018), cuja recarga varia de 8% a 65% de sua capacidade, sendo dependente da recarga do escoamento superficial gerado por precipitações intensas e de curta duração. Está localizado em trecho do Perímetro Irrigado de Sumé (PIS), entre as coordenadas 36°54'07" W, 7°40'08" S; 36°54'07" W, 7°41'15" S; 36°48'39" W, 7°40'08" S; e 36°48'39" W, 7°41'15" S (Figura 1).

Figura 1 – Área de estudo



Fonte: Adaptado de INSA (2024); IBGE (2024); Autores.

Para consolidar a reativação e modernização do PIS, segundo a Resolução nº. 118/2022 da ANA-AESA, autorizou a captação de vazão média anual de 2,1 L/s (66.225,6 m³/ano) para abastecimento rural e de carros pipa, 117 L/s (3.689.712 m³/ano), conforme Projeto Executivo enviado pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), com taxa média anual de irrigação igual a 0,5 L/s.ha, na área de 234 ha do PIS.

Para mensurar o potencial hídrico na área de estudo foi utilizado o Processo de Análise Hierárquica (AHP), proposto por Saaty (1980), com definição de prioridades para a escolha da melhor decisão, reduzindo comparações complexas em pares e matriz, considerando aspectos subjetivos e objetivos, sintetizando resultados, como critérios de recarga decorrentes da precipitação que gerou escoamento (P), a espessura do aquífero (E), o uso e ocupação do solo (U), devido a possibilidade de aproveitamento da água para irrigação e dessedentação animal,

utilizando dados de precipitação de 2018 e de espessura do aquífero obtidos por Vieira (2002).

O método AHP atribui peso absoluto de 1 a 9, em cada critério de avaliação, onde são realizadas comparações pareadas dos critérios (a_{jk}) e (a_{kj}), em que j representa as linhas da matriz e k , as colunas, gerando pesos relativos.

$$\frac{a_{jk} a_{jk}}{a_{kj} a_{kj}} \quad \text{Eq. 1}$$

Quanto maior o peso mais significativo é o critério (Tabela 1).

Tabela 1 – Pesos relativos e respectivas relevâncias

Peso relativo	Relevância
1	Os critérios a_{jk} e a_{kj} são igualmente relevantes
3	O critério a_{jk} é pouco mais relevante que o a_{kj}
5	O critério a_{jk} é razoavelmente mais relevante que o a_{kj}
7	O critério a_{jk} é muito mais relevante que o a_{kj}
9	O critério a_{jk} é absolutamente mais relevante que o a_{kj}

Fonte: Saaty (1980).

Quando matriz é construída, os critérios são organizados em linhas e colunas com os respectivos pesos, sendo a primeira coluna composta de pesos absolutos atribuídos a cada critério e a última linha com a soma dos pesos relativos de cada coluna (Tabela 2).

Tabela 2 – Matriz com pesos absolutos e relativos

Critério	Peso absoluto	Critério jk	Critério j...k...
Critério jk	X	$x/x = 1$	x/y
Critério j...k...	Y	y/x	$y/y = 1$
	Soma dos pesos relativos	$1 + [y/x]$	$[x/y] + 1$

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

Quando a segunda matriz é construída, cada peso relativo normalizado é calculado, dividindo cada qual pela soma de cada coluna (Saaty, 1980).

$$\frac{\frac{a_{jk}}{a_{kj}}}{\sum \frac{a_{jk}}{a_{kj}}} \quad \frac{\frac{a_{kj}}{a_{kj}}}{\sum \frac{a_{kj}}{a_{kj}}} \quad \text{Eq. 2}$$

Logo, a média aritmética de cada linha dos pesos relativos é calculada (Tabela 3).

Tabela 3 – Matriz com pesos normalizados e média aritmética

Critério	Critério jk	Critério j...k...	Média aritmética (peso médio)
Critério jk	$\frac{1}{1 + [y/x]}$	$\frac{x/y}{[x/y] + 1}$	$\frac{\frac{1}{1 + [y/x]} + \frac{x/y}{[x/y] + 1}}{2}$
Critério j...k...	$\frac{y/x}{1 + [y/x]}$	$\frac{1}{[x/y] + 1}$	$\frac{\frac{y/x}{1 + [y/x]} + \frac{1}{[x/y] + 1}}{2}$
Soma dos pesos relativos	1	1	1

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

O nível de consistência do AHP é avaliado para verificar se o método gerou decisões adequadas em relação à realidade da área em estudo, ou seja, se a inconsistência é aceitável. Portanto, é construída a terceira matriz com a soma dos pesos normalizados em cada linha e com a última coluna correspondente aos valores próprios λ , que são a razão entre a soma dos pesos normalizados (S) e a média aritmética dos pesos normalizados (M)(Tabela 4).

Tabela 4 – Matriz com somas dos pesos normalizados, média aritmética e valor λ

Critério	Critério jk	Critério j...k...	Soma dos pesos normalizados (S)	Média aritmética (peso médio) (M)	$\lambda \frac{S}{M} \frac{S}{M}$
Critério jk	$\frac{1}{1 + [y/x]}$	$\frac{x/y}{[x/y] + 1}$	$\frac{1}{1 + [y/x]}$	$\frac{\frac{1}{1 + [y/x]} + \frac{x/y}{[x/y] + 1}}{2}$	λ_1
Critério j...k...	$\frac{y/x}{1 + [y/x]}$	$\frac{1}{[x/y] + 1}$	$\frac{y/x}{1 + [y/x]}$	$\frac{\frac{y/x}{1 + [y/x]} + \frac{1}{[x/y] + 1}}{2}$	λ_n
Soma dos pesos relativos	1	1		1	

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

Portanto, é calculado o índice de consistência (CI).

$$CI = \frac{\lambda_m - n\lambda_m - n}{n-1 \quad n-1} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde λ_m é o valor próprio médio e n é a quantidade de critérios.

Logo, a razão de consistência (CR) pode ser calculada na Eq. 4.

$$CR = CI/RCI \quad \text{Eq. 4}$$

Onde: RCI é o índice de consistência aleatória, que depende do número de critérios com limite de 12 (Tabela 5).

Tabela 5 – Índice de consistência aleatória em função do número de critérios

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RC	0,0	0,0	0,5	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	1,4
I	0	0	8	0	2	4	2	0	1	9	1	8

Fonte: Adaptado de Saaty (1980).

A inconsistência é aceitável se o $CR < 0,10$. Caso for igual ou maior que 0,10, deve-se atribuir outros pesos e repetir os procedimentos até que o CR atinja os valores abaixo do limite estabelecido (Saaty, 1980).

Com a inconsistência aceitável, em cada critério estudado os pesos absolutos (ranks) são atribuídos de 1 a 5 (no máximo). Cada peso representa o grau de potencial hídrico, sendo: 1 - muito baixo, 2 -baixo, 3 - médio, 4 - alto e 5 - muito alto (Castillo et al., 2022).

Somam-se os valores dos subcritérios e divide cada critério por essa soma, gerando o peso normalizado do subcritério (Tabela 6).

Tabela 6 – Pesos absolutos e normalizados de cada subcritério

Critério	Peso médio (M)	Subcritério	Peso absoluto	Peso normalizado (W_j)
Critério jk	$\frac{1}{1 + [y/x]} + \frac{x/y}{[x/y] + 1}$	jka	1	0,07
		jkb	2	0,13
		jkc	3	0,20
		jkd	4	0,27
		jke	5	0,33
		Soma dos valores do subcritério	15	
Critério j...k...	$\frac{y/x}{1 + [y/x]} + \frac{1}{[x/y] + 1}$	j...k...a	1	0,07
		j...k...b	2	0,13
		j...k...c	3	0,20
		j...k...d	4	0,27
		j...k...e	5	0,33
		Soma dos valores do subcritério	15	

Portanto, o índice de potencial hídrico (GWPZ) é obtido em função dos pesos normalizados dos critérios e subcritérios:

$$GWPZ = \Sigma \Sigma (M.W_s) \quad \text{Eq. 5}$$

Sendo que (M.Ws) é o índice em cada subárea com o respectivo peso médio do critério e peso normalizado do subcritério.

As atribuições dos pesos absolutos têm como base o mapeamento das áreas detectando elementos que contribuem para o potencial hídrico, através do sensoriamento remoto e da utilização do sistema de informações geográficas (Al-Djazouli et al, 2021; Castillo et al., 2022; Kom et al., 2022; Suliman et al., 2022; Guria et al., 2024).

Os critérios utilizados para avaliação serão P, EeU, com pesos absolutos 5, 7 e 3, respectivamente.

Para as faixas de dados obtidos por Abels et al. (2018), atribui-se para os

subcritérios de P, os pesos:

- 1, para áreas sob recarga de 11,3 mm/ano a 22,8 mm/ano (subcritério a);
- 2, para 22,8 mm/ano a 36,2 mm/ano (subcritério b);
- 3, para 36,2 mm/ano a 49,0 mm/ano (subcritério c);
- 4, para 49,0 mm/ano a 62,9 mm/ano (subcritério d).

Como a espessura (E) é variável de 0,5 m a 10,0 m, com material de alta permeabilidade e largura variando de 50 m a 500 m, os subcritérios de E, para as faixas de dados obtidos por Vieira (2002), atribuíram-se os pesos:

- 1, para espessuras de 0,5 m a 2,0 m (subcritério e);
- 2, de 2,0 m a 4,0 m (subcritério f);
- 3, de 4,0 m a 6,0 m (subcritério g);
- 4, de 6,0 m a 8,0 m (subcritério h);
- 5, de 8,0 m a 10,0 m (subcritério i).

O terceiro critério (U), por comprometer a disponibilidade hídrica, mesmo havendo manejo proposto pela ANA (2022), foram atribuídos os seguintes pesos para os subcritérios de U, para as atividades e quantidade de animais de grande porte, levantadas por Rêgo et al. (2022):

Para irrigação de cultivos de gramíneas, frutas, grãos e vegetais, 1 (subcritério j);

- Para dessedentação de 61 a 130 animais, 2 (subcritério k);
- Para dessedentação de 31 a 60 animais, 3 (subcritério l);
- Para dessedentação de 1 a 30 animais, 4 (subcritério m).

Posteriormente, com o uso do software QGIS3.3.4, com informações dos critérios foram elaborados mapas de zoneamento dos potenciais hídricos. Em seguida os mapas foram sobrepostos, para a obtenção do zoneamento do potencial hídrico em toda a área de estudo.

Resultados e Discussão

Na tabela 7 pode-se observar a matriz com pesos absolutos e relativos aos três critérios utilizados para avaliação.

Tabela 7 – Matriz com pesos absolutos e relativos

Critério	Peso absoluto	P	E	U
P	5	1	5/7	5/3
E	7	7/5	1	7/3
U	3	3/5	3/7	1
	Soma dos pesos relativos	3	2,14	5

Após a obtenção da matriz com os pesos absolutos, foram calculados os pesos normalizados e a média aritmética (Tabela 8).

Tabela 8 – Matriz com pesos normalizados e média aritmética

Critério	P	E	U	Média aritmética (peso médio)
P	$\frac{1}{3}$	$\frac{5/7}{2,14}$	$\frac{5/3}{5}$	0,33
E	$\frac{7/5}{3}$	$\frac{1}{2,14}$	$\frac{7/3}{5}$	0,47
U	$\frac{3/5}{3}$	$\frac{3/7}{2,14}$	$\frac{1}{5}$	0,60
Soma dos pesos relativos	1	1	1	1

Para avaliação de inconsistência aceitável, pode-se observar os valores na Tabela 9.

Tabela 9 – Matriz com somas dos pesos normalizados, média aritmética e valor próprio λ

Critério	P	E	U	Soma dos pesos normalizados (S)	Média aritmética (peso médio) (M)	$\sum S$ λ (MM)
P	$\frac{1}{3}$	$\frac{5/7}{2,14}$	$\frac{5/3}{5}$	1	0,33	3,03
E	$\frac{7/5}{3}$	$\frac{1}{2,14}$	$\frac{7/3}{5}$	1,40	0,47	2,98
U	$\frac{3/5}{3}$	$\frac{3/7}{2,14}$	$\frac{1}{5}$	0,60	0,20	3,00
Soma dos pesos relativos	1	1	1		1	

Logo:

- o CI é 0,00, pois λ_m é 3,00 e o número de critérios é 3, de acordo com a equação 3;
- a CR é $0,00 < 0,10$, sendo $CRI = 0,58$, com base na tabela 5 e na equação 4.

Na Tabela 10 pode-se observar os pesos absolutos e normalizados.

Tabela 10 – Pesos absolutos e normalizados de cada subcritério

Critério	Peso médio (M)	Subcritério	Peso absoluto	Peso normalizado (W_s)
P	0,33	a	1	0,10
		b	2	0,20
		c	3	0,30
		d	4	0,40
		Soma dos valores do subcritério	10	
E	0,47	e	1	0,07
		f	2	0,13
		g	3	0,20
		h	4	0,27
		i	5	0,33
		Soma dos valores do subcritério	15	
U	0,20	j	1	0,10
		k	2	0,20
		l	3	0,30
		m	4	0,40
		Soma dos valores do subcritério	10	

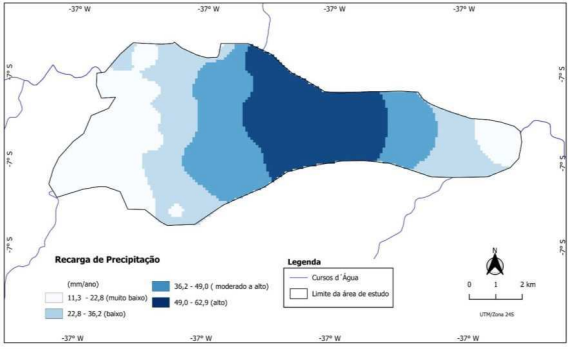
Por fim,o GWPZ é 1,00, o que é esperado para toda a área avaliada, sendo particionado em cada subárea de acordo com os valores W_s de cada subcritério presente (Tabela 11).

Tabela 11 – M. W_s para cada subcritério

Critério	Peso médio (M)	Subcritério	Peso normalizado (W_s)	M. W_s
P	0,33	a	0,10	0,033
		b	0,20	0,066
		c	0,30	0,099
		d	0,40	0,132
E	0,47	e	0,07	0,0329
		f	0,13	0,0611
		g	0,20	0,094
		h	0,27	0,1269
		i	0,33	0,1551
U	0,20	j	0,10	0,02
		k	0,20	0,04
		l	0,30	0,06
		m	0,40	0,08

Na Figura 2, pode-se observar o zoneamento do potencial hídrico considerando o critério de recarga pelo escoamento devido a precipitação, onde o maior índice de potencial hídrico está localizado na porção central do aquífero aluvial,por apresentar maior permeabilidade para infiltração de água em relação às áreas localizadas nos extremos do corpo hídrico.

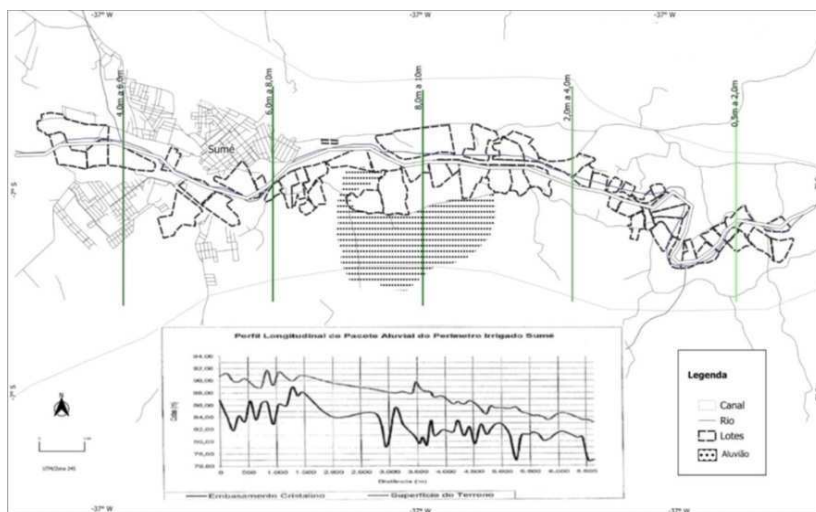
Figura 2 – Zoneamento do potencial hídricodevido a recarga de escoamento devido a precipitação de 2018.



Fonte: dos próprios autores.

Na Figura 3, por meio do zoneamento do potencial hídrico de acordo com a espessura do aquífero, foi possível identificar que o maior valor do potencial hídrico ocorreu na parte central do aquífero aluvial, com faixa de espessura de 8,0 m a 10,0 m, devido a superfície do terreno ter menor declividade longitudinal e trechos de profundidade consideráveis.

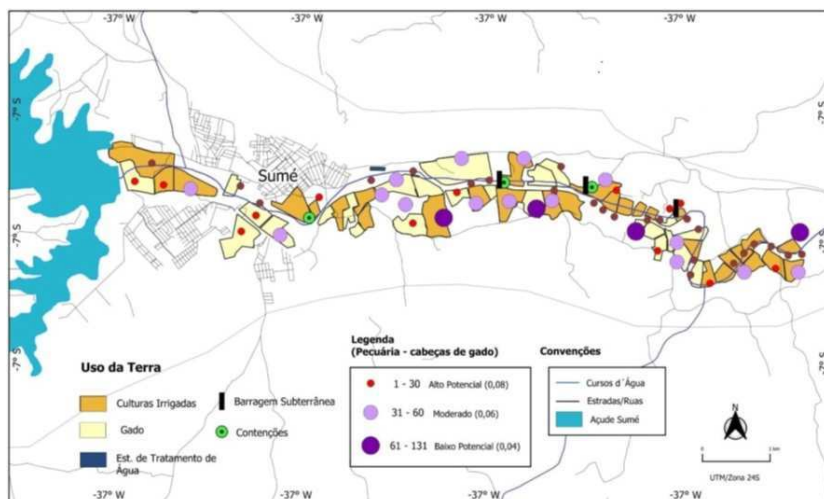
Figura 3 - Zoneamento do potencial hídrico devido a espessura do aquífero aluvial.



Fonte: dos próprios autores.

Na Figura 4, pode-se observar devido ao uso e ocupação do solo que os maiores valores do potencial hídrico ocorreram nos extremos Leste e Oeste, com baixo potencial nas áreas irrigadas, devido ao impacto de maior consumo de água para irrigação e dessedentação animal, corroborando com os consumos de água estimados por Alves (2016).

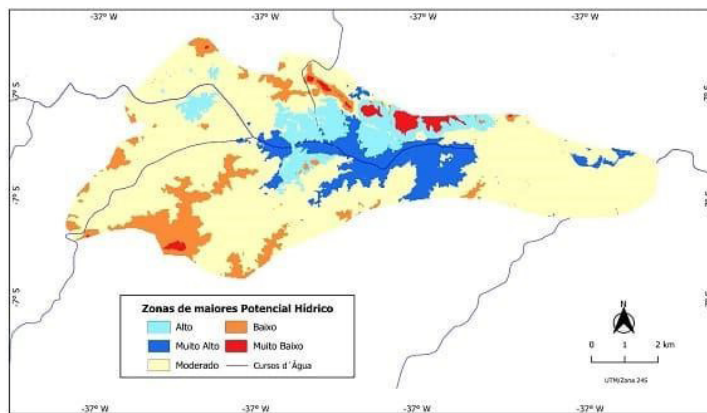
Figura 4 - Zoneamento dos índices de potencial hídrico devido ao uso e ocupação do solo.



Fonte: dos próprios autores.

Na Figura 5, pode-se observar após a sobreposição dos mapas obtidos para os três critérios escolhidos, que o maior potencial hídrico é concentrado na área central e o menor, nos extremos da área de estudo, onde há necessidade de estabelecimento de limites de uso da água disponível, para o uso racional nas áreas de menor potencial hídrico.

Figura 5 - Sobreposição dos mapas de potencial hídrico considerando os três critérios escolhidos.



Fonte: dos próprios autores.

Conclusão

De acordo com os resultados obtidos foi possível concluir que existem trechos do zoneamento do potencial hídrico favorecidos pela geologia, como o trecho central do aquífero, que contém a maior oferta de água, mas os extremos Leste e Oeste necessitam de estabelecimento de limites dos usos da água bruta para reduzir a insegurança hídrica.

Agradecimentos

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado, a AESA-PB e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais (PPGERGN) pelo apoio concedido.

Referências

- ABELS, A. et al. Wastewater treatment and reuse (Results from WP4, 5 & 6). In: Abels, A.; Freitas, M.; Pinnekamp, J.; Rusteberg, B. (Org.). BRAMAR Project – Water Scarcity Mitigation in North-East Brazil. Aachen: Bramar, v. 1, p. 78-103, 2018.
- AL-DJAZOULI, M. O.; ELMORABITI, K.; RAHIMI, A.; AMELLAH, O.; FADIL, O. A. M. Delineating of groundwater potential zones based on remote sensing, GIS and analytical hierarchical process: a case of Waddai, eastern Chad. *GeoJournal*, v. 86, 2021.
- ALVES, E. J. C. Potencialidade e manejo dos recursos hídricos do aquífero aluvial em Sumé – PB. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. 2016, 73 p.
- ANA - Agência Nacional de Águas; AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas. Resolução Conjunta nº 118, de 18 abril de 2022. Dispõe sobre condições de uso dos recursos hídricos do sistema hídrico de Sumé, localizado no Estado da Paraíba. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 20 abr. 2022.
- CASTILLO, J. L. U.; CRUZ, D. A. M.; LEAL, J. A. R.; VARGAS, J. T.; TAPIA, S. A. R.; CELESTINO, A. E. M. Delineation of groundwater potential zones (GWPZs) in a semi-arid basin through remote sensing, GIS, and AHP approaches. *Water*, v. 14, 2022.
- GURIA, R.; MISHRA, M.; DUTTA, S.; SILVA, R. M. da; SANTOS, C. A. G. Remote sensing, GIS, and analytic hierarchy process-based delineation and sustainable management of potential groundwater zones: a case study of Jhargram district, West Bengal, India. *Environ Monit Assess*, v. 196, n. 95, 30p, 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pb/sume.html>>. Acesso em: 29 ago. 2024.

INSA – Instituto Nacional do Semiárido. Delimitação do Semiárido Brasileiro (2024).

KHAN, M. Y. A.; EIKASHOUTY, M.; TIAN, F. Mapping groundwater potential zones using analytical hierarchical process and multicriteria evaluation in the Central Eastern Desert, Egypt. *Water*, v. 14, 2022.

KOM, K. P.; GURUGNANAM, B.; SUNITHA, V. Delineation of groundwater potential zones using GIS and AHP techniques in Coimbatore district, South India. *International Journal of Energy and Water Resources*, 2022.

RÊGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P.; PONTES FILHO, J. D.; TSUYUGUCHI, B. B.; SOUZA, T. J.; GALVÃO, C. de O. Sustainable and resilient exploration of small aquifers in the Brazilian semi-arid region: the experience of Sumé. In: Re, V., Manzione, R. L., Abiye, T. A., Mukherji, A., & MacDonald, A. (Eds.). *Groundwater for Sustainable Livelihoods and Equitable Growth*. London: CRC Press. Chapter 6. pp. 101-121, 2022. <https://doi.org/10.1201/9781003024101>

SAATY, T. *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. New York: McGraw-Hill, 1980.

SULIMAN, M.; SAMIULLAH; ALI, M. Identification of potential groundwater recharge sites in a semi-arid region of Pakistan using Saaty's analytical hierarchical process (AHP). *Geomatics and Environmental Engineering*, v. 16, n. 1, 2022.

VIEIRA, L. J. dos S. Emprego de um modelo matemático de simulação do fluxo subterrâneo para definição de alternativas de exploração de um aquífero aluvial. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal da Paraíba. 2002, 134p.