Estimativa da evaporação do reservatório Cruzeta (RN) por diferentes métodos e avaliação de seus reflexos na disponibilidade hídrica sob diferentes cenários de armazenamento

Maria Helena Faustino Martins de Castro[1]; Lívia Maria Silva Queiroz[2] & Joana D'arc Freire de Medeiros[3] & Adelena Gonçalves Maia[4]

RESUMO - A evaporação representa um dos principais componentes do balanço hídrico de reservatórios localizados em regiões semiáridas, influenciando diretamente a disponibilidade de água armazenada. Neste contexto, o presente estudo estimou a evaporação anual do reservatório Cruzeta (RN) pelos métodos Tanque Classe A (TCA) e Jensen-Haise (JH) e avaliou seus reflexos na disponibilidade hídrica sob diferentes cenários de armazenamento. Os resultados indicaram evaporação média anual de 1,80 m (TCA) e de 2,13 m (JH), correspondendo a uma diferença de aproximadamente 18,5% entre as estimativas. As perdas evaporativas variaram de 5,20 a 11,09 hm³ e de 6,16 a 13,14 hm³ para os métodos Tanque Classe A e Jensen-Haise, respectivamente. No cenário de armazenamento máximo, os volumes evaporados corresponderam a cerca de 47% (TCA) e 56% (JH) da capacidade total do reservatório. Em condições de armazenamento reduzido, observou-se aumento da participação da evaporação em relação ao volume disponível, evidenciando a elevada vulnerabilidade dos reservatórios do semiárido às perdas evaporativas. Os resultados evidenciam que a escolha do método de estimativa influencia significativamente a quantificação das perdas evaporativas e a avaliação da disponibilidade hídrica, reforçando a necessidade de incorporação desse processo nos estudos de planejamento e gestão de reservatórios em regiões semiáridas.

Palavras-chave: evaporação; reservatórios; semiárido.

ABSTRACT - Evaporation represents one of the main components of the water balance of reservoirs located in semiarid regions, directly influencing the availability of stored water. In this context, the present study estimated the annual evaporation of the Cruzeta reservoir using the Class A Pan (CAP) and Jensen-Haise (JH) methods, and evaluated its effects on water availability under different storage scenarios. The results indicated mean annual evaporation of 1,80 m (CAP) and 2,13 m (JH), corresponding to a difference of approximately 18.5% between estimates. Evaporative losses ranged

[1]Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN): Avenida Senador Salgado Filho, s/n, Campus Universitário - Lagoa Nova, CEP: 59078-970 | Natal/RN.Tel.: (84) 99151-7188. E-mail: mhelenafmc@hotmail.com
[2]Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN): Avenida Senador Salgado Filho, s/n, Campus Universitário - Lagoa Nova, CEP: 59078-970 | Natal/RN.Tel.: (84) 99479-1182. E-mail: liviamsq.1606@gmail.com
[3]Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN): Avenida Senador Salgado Filho, s/n, Campus Universitário - Lagoa Nova, CEP: 59078-970 | Natal/RN.Tel.: (84) 99418-2990. E-mail: joanadarc.medeiros@gmail.com
[4]Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN): Avenida Senador Salgado Filho, s/n, Campus Universitário - Lagoa Nova, CEP: 59078-970 | Natal/RN.Tel.: (84) 9163-8633. E-mail: adelena.maia@ufrn.br

from 5,20 to 11,09 hm³ and from 6,16 to 13,14 hm³ for the Class A Pan and Jensen-Haise methods, respectively. At maximum storage, evaporated volumes corresponded to approximately 47% (CAP) and 56% (JH) of the reservoir's total capacity. Under reduced storage conditions, the contribution of evaporation to the available volume increased, highlighting the high vulnerability of semiarid reservoirs to evaporative losses. The results reinforce the need to consider the estimation method adopted in planning and management studies of reservoirs in semiarid regions.

Keywords: evaporation; reservoirs; semi-arid region.

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade hídrica constitui um dos principais desafios para o desenvolvimento sustentável das regiões semiáridas, onde a elevada irregularidade das precipitações, associada às altas taxas de evaporação, favorece a ocorrência recorrente de déficits hídricos. No semiárido brasileiro, a limitação natural da oferta de água levou à implantação de uma extensa infraestrutura de armazenamento superficial, baseada, principalmente, em reservatórios destinados à regularização dos recursos hídricos ao longo dos períodos secos (ANA, 2017; Lopes, 2016).

Os reservatórios desempenham papel fundamental na segurança hídrica da região, permitindo o abastecimento humano, a irrigação e outros usos múltiplos da água. Entretanto, além das retiradas destinadas ao atendimento das demandas, esses sistemas estão sujeitos a perdas significativas por evaporação. Em ambientes semiáridos, caracterizados por elevada disponibilidade energética e altas temperaturas ao longo do ano, a evaporação pode representar parcela expressiva do balanço hídrico dos reservatórios, reduzindo o volume efetivamente disponível para utilização (ANA, 2017; Nascimento *et al*., 2023).

A adequada quantificação dessas perdas constitui etapa essencial para estudos de disponibilidade hídrica, planejamento da operação de reservatórios e gestão dos recursos hídricos. Diversos métodos têm sido empregados para estimar a evaporação em superfícies livres de água, abrangendo desde técnicas baseadas em observações diretas até modelos empíricos fundamentados em variáveis meteorológicas. Segundo Sanches *et al.* (2023), a escolha do método pode influenciar significativamente os resultados obtidos, especialmente em regiões submetidas a elevada demanda evaporativa.

Entre os métodos amplamente utilizados destacam-se o Tanque Classe A e o método de Jensen-Haise. O primeiro baseia-se em medições diretas da evaporação atmosférica realizadas em campo e

apresenta aplicação consolidada em estudos hidrológicos, em razão de sua simplicidade operacional, da ampla disponibilidade de séries históricas e da possibilidade de utilização em regiões com limitada disponibilidade de dados meteorológicos. O método de Jensen-Haise, por sua vez, fundamenta-se na relação entre temperatura do ar e radiação solar, permitindo estimar a evaporação a partir de variáveis climáticas de fácil obtenção (Allen *et al.*,1998; Jensen e Haise 1963).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo estimar a evaporação anual do reservatório Cruzeta (RN) por meio dos métodos Tanque Classe A e Jensen-Haise, quantificar as perdas evaporativas associadas a diferentes cenários de armazenamento e avaliar suas implicações para a disponibilidade hídrica de reservatórios localizados em regiões semiáridas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido para o reservatório Cruzeta, localizado no município de Cruzeta, na região Seridó do estado do Rio Grande do Norte. Inserido no semiárido brasileiro, o reservatório está sujeito a elevadas taxas de evaporação em decorrência das altas temperaturas e da intensa incidência de radiação solar ao longo do ano.

Segundo dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), o reservatório possui capacidade máxima de armazenamento de aproximadamente 23,55 hm³ e área inundada máxima de 6,16 km². Essas características o tornam um importante reservatório estratégico para o armazenamento de água em uma região marcada pela elevada variabilidade climática e recorrência de períodos de estiagem.

2.2 Estimativa da evaporação pelo método do Tanque Classe A

A evaporação do reservatório foi estimada a partir de dados observados de evaporação em Tanque Classe A obtidos junto ao sistema HidroWeb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), referentes à estação meteorológica nº 636003, localizada no município de Cruzeta (RN) (ANA, 2026). Para este estudo, foi utilizada a série histórica disponível para o período de 1930 a 1978 (Tabela 1).

Tabela 1 - Evaporação média mensal observada no Tanque Classe

EVAPORAÇÃO - TANQUE CLASSE A

Tanque	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Classe A (mm)	240,40	173,65	140,17	124,60	145,08	176,41	202,49	259,86	275,47	297,71	267,53	268,28

A evaporação da superfície do reservatório foi calculada por meio da correção da evaporação observada no tanque, utilizando-se o coeficiente de tanque (Kp), conforme a Equação 1:

$$E_{reservatório} = Kp \times E_{tanque} \quad (1)$$

em que $E_{reservatório}$ corresponde à evaporação da superfície do reservatório (mm mês^{-1}), Kp é o coeficiente adimensional de ajuste e E_{tanque} representa a evaporação observada no Tanque Classe A (mm mês^{-1}).

Adotou-se Kp = 0,70, valor amplamente empregado em estudos hidrológicos para converter a evaporação observada no tanque em estimativas mais representativas de superfícies de água livre (Allen *et al*., 1998; Pereira *et al*., 2009).

2.3 Estimativa da evaporação pelo método de Jensen-Haise

A evaporação do reservatório também foi estimada pelo método empírico de Jensen-Haise, que relaciona a evaporação às condições térmicas e energéticas da atmosfera, representadas pela temperatura do ar e pela radiação solar incidente.

Para tanto, foram utilizados dados médios mensais de temperatura média compensada do ar obtidos das Normais Climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes ao período de 1961–1990 (INMET, 2026). Os dados de radiação solar global média mensal foram obtidos do Atlas Solarimétrico do Brasil (Tiba *et al*., 2000) (Tabela 2).

Tabela 2 - Dados médios mensais de temperatura do ar e radiação solar de cruzeta (RN)

EVAPORAÇÃO - JENSEN - HAISE												
Temperatura (ºF)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
	82,76	81,50	80,78	79,52	78,80	78,08	77,72	78,62	80,42	81,86	82,22	82,76
Radiação solar (W/m2)	957,87	943,29	934,95	920,37	912,04	903,70	899,54	909,95	930,79	947,45	951,62	957,87

A evaporação diária foi calculada por meio da Equação 2:

$$E_{JH} = 0{,}03523 \times R_{Solar} \times (0{,}014 \times T_{Ar} - 0{,}37) \quad (2)$$

em que E_{JH} corresponde à evaporação estimada (mm dia^{-1}), R_{solar} é a radiação solar global incidente (W m^{-2}) e T_{Ar} é a temperatura média do ar em graus Fahrenheit (°F).

2.4 Definição dos cenários de armazenamento

Com o objetivo de avaliar a influência do armazenamento sobre as perdas evaporativas, foram considerados três cenários operacionais do reservatório: capacidade máxima (100%), 50% da capacidade máxima e 25% da capacidade máxima.

Os volumes correspondentes a cada cenário foram obtidos a partir da curva cota-área-volume do reservatório. Para os cenários de 50% e 25% da capacidade máxima, as respectivas cotas e áreas superficiais foram determinadas por interpolação linear entre os pontos da curva batimétrica (Tabela 3).

Tabela 3 - Cenários de armazenamento considerados no estudo.

Cenário	Cota (m)	Área (km²)	Volume (hm³)
Capacidade máxima	123,5	6,161	23,55
50% da Capacidade máxima	121,15	4,116	11,77
25% da Capacidade máxima	119,51	2,889	5,89

2.5 Estimativa dos volumes evaporados

Os volumes evaporados anuais foram calculados para cada cenário de armazenamento por meio do produto entre a evaporação anual estimada, em metros, e a área superficial, em metros quadrados, correspondente ao nível de armazenamento considerado, conforme a Equação 3.

$$V_{Evaporado} = E_{estimada} \times \text{Área} \quad (3)$$

Os resultados foram expressos em metros cúbicos (m³) e hectômetros cúbicos (hm³), permitindo a comparação das perdas evaporativas obtidas pelos diferentes métodos e cenários de armazenamento.

Ressalta-se que os dados utilizados neste estudo são provenientes de séries históricas distintas, sendo a evaporação em Tanque Classe A referente ao período de 1930–1978 e a temperatura

empregada no método de Jensen-Haise oriunda das Normais Climatológicas do INMET (1961–1990). Embora ambas representem médias climatológicas de longo prazo para a região de Cruzeta (RN), essa diferença temporal pode introduzir incertezas na comparação entre os métodos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estimativa da evaporação anual pelos métodos Tanque Classe A e Jensen-Haise

A aplicação do método do Tanque Classe A, utilizando coeficiente de tanque igual a 0,70, resultou em uma evaporação média anual de 1,80 m. Por sua vez, o método de Jensen-Haise, calculado a partir de dados médios de temperatura do ar e radiação solar, forneceu uma evaporação média anual de 2,13 m.

Observa-se que o método de Jensen-Haise produziu uma estimativa aproximadamente 18,5% superior à obtida pelo Tanque Classe A. Tal diferença evidencia a sensibilidade das estimativas evaporativas ao método empregado, uma vez que cada abordagem representa os processos físicos de forma distinta. Enquanto o Tanque Classe A baseia-se em medições observacionais locais ajustadas por um coeficiente empírico, o método de Jensen-Haise considera explicitamente a disponibilidade energética associada à radiação solar e à temperatura do ar.

Essa influência da metodologia adotada sobre os valores estimados de evaporação tem sido amplamente reportada na literatura. Segundo Sanches et al. (2023), diferentes métodos podem produzir resultados significativamente distintos para uma mesma condição climática em função das variáveis meteorológicas consideradas e das simplificações inerentes a cada abordagem. Em regiões semiáridas, caracterizadas por elevada disponibilidade energética ao longo do ano, métodos que incorporam explicitamente os efeitos da radiação solar tendem a fornecer estimativas mais elevadas de evaporação potencial.

Nesse contexto, os resultados obtidos para o reservatório Cruzeta demonstram que a escolha do método de estimativa pode influenciar na quantificação das perdas evaporativas e, consequentemente, as avaliações de disponibilidade hídrica.

3.2 Impacto da evaporação sobre o volume armazenado

Os volumes evaporados anuais estimados para os diferentes cenários de armazenamento do reservatório Cruzeta são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Volume armazenado, área superficial e volume evaporado anual estimados para diferentes condições de armazenamento do reservatório Cruzeta.

Condição do reservatório	Volume armazenado (hm^3)	Área (km^2)	Volume evaporado (hm^3 ano^{-1})	
			Tanque Classe A	Jensen-Haise
Capacidade máxima	23,55	6,161	11,09	13,14
50% da capacidade máxima	11,77	4,116	7,41	8,78
25% da capacidade máxima	5,89	2,889	5,2	6,16

Conforme apresentado na Tabela 4, os maiores volumes evaporados ocorreram no cenário correspondente à capacidade máxima de armazenamento, em razão da maior área superficial exposta à atmosfera. Em todos os cenários analisados, o método de Jensen-Haise produziu estimativas superiores às obtidas pelo Tanque Classe A.

No cenário de armazenamento máximo, as perdas evaporativas foram estimadas em 11,09 hm^3 pelo método do Tanque Classe A e em 13,14 hm^3 pelo método de Jensen-Haise. Para os cenários correspondentes a 50% e 25% da capacidade máxima, as perdas variaram entre 5,20 hm^3 e 8,78 hm^3, evidenciando que a redução do volume armazenado não implica redução proporcional das perdas por evaporação.

A diferença entre os métodos torna-se particularmente relevante quando expressa em termos volumétricos. No cenário de armazenamento máximo, por exemplo, a discrepância entre as estimativas alcançou aproximadamente 2,05 hm^3 por ano, valor que representa parcela expressiva da disponibilidade hídrica do reservatório.

Os resultados demonstram que diferenças relativamente pequenas nas estimativas de evaporação anual podem resultar em diferenças expressivas dos volumes evaporados, reforçando a importância da escolha do método de cálculo em estudos de planejamento e gestão de recursos hídricos.

3.3 Influência do nível de armazenamento nas perdas evaporativas

Os resultados apresentados na Tabela 4 indicam que a redução do volume armazenado não é acompanhada por uma redução proporcional da área superficial do reservatório. Entre os cenários de

100% e 25% da capacidade máxima, o volume armazenado diminui aproximadamente 75%, passando de 23,55 hm³ para 5,89 hm³. No mesmo intervalo, a área superficial reduz-se de 6,16 km² para 2,89 km², correspondendo a uma diminuição de aproximadamente 53%.

Esse comportamento evidencia uma característica importante da geometria do reservatório Cruzeta: mesmo sob condições de armazenamento reduzido, o espelho d'água permanece relativamente extenso. Como consequência, as perdas por evaporação continuam representando parcela expressiva do volume armazenado.

Sob a perspectiva da relação área-volume, observa-se que a redução do armazenamento ocorre de forma mais acentuada que a redução da área superficial. Dessa forma, à medida que o reservatório esvazia, a área exposta à atmosfera permanece elevada em relação ao volume disponível, aumentando a vulnerabilidade do sistema às perdas evaporativas.

Esse fenômeno assume particular relevância em reservatórios localizados em regiões semiáridas, onde a evaporação constitui um dos principais componentes de saída do balanço hídrico e pode comprometer significativamente a disponibilidade hídrica ao longo dos períodos de estiagem.

3.4 Implicações para a gestão hídrica do reservatório Cruzeta

A Tabela 5 evidencia que as perdas evaporativas representam parcela expressiva da disponibilidade hídrica do reservatório Cruzeta, independentemente do método de estimativa adotado.

Tabela 5 - Representatividade das perdas evaporativas em relação à capacidade máxima e ao volume armazenado do reservatório Cruzeta.

Condição de armazenamento	Método	Volume evaporado (hm³/ano)	% da capacidade máxima	% do volume armazenado
100%	Tanque Classe A	11,09	47,1	47,1
	Jensen-Haise	13,14	55,8	55,8
50%	Tanque Classe A	7,41	31,47	62,93
	Jensen-Haise	8,78	37,28	74,56
25%	Tanque Classe A	5,2	22,09	88,34
	Jensen-Haise	6,16	26,16	104,66

Observa-se que os volumes evaporados correspondem a frações substanciais da capacidade máxima de armazenamento do reservatório. No cenário de reservatório cheio, as perdas anuais estimadas variam entre 47% e 56% da capacidade total, conforme o método utilizado. Esses resultados demonstram que a evaporação constitui um componente relevante do balanço hídrico local e pode influenciar significativamente a disponibilidade de água ao longo do ano.

Quando analisadas em relação ao volume efetivamente armazenado, as perdas tornam-se ainda mais expressivas. À medida que o nível de armazenamento diminui, a evaporação passa a representar parcela crescente do volume disponível, alcançando 88% do armazenamento no cenário de 25% da capacidade máxima pelo método do Tanque Classe A e ultrapassando 100% pelo método de Jensen-Haise.

Embora esses percentuais não impliquem a perda integral do volume armazenado ao longo de um ano, uma vez que o reservatório está sujeito a variações de nível, redução da área superficial e eventuais aportes hídricos, os resultados evidenciam a elevada vulnerabilidade dos reservatórios do semiárido às perdas evaporativas, especialmente durante períodos de estiagem prolongada.

Dessa forma, a consideração explícita da evaporação nos estudos de planejamento, operação e gestão de reservatórios mostra-se fundamental para a obtenção de estimativas mais realistas da disponibilidade hídrica. Adicionalmente, os resultados reforçam a importância da adoção de estratégias de gestão que considerem as perdas evaporativas como componente relevante do balanço hídrico de reservatórios localizados em regiões semiáridas.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a escolha do método de estimativa da evaporação influencia significativamente a quantificação das perdas evaporativas e, consequentemente, as avaliações de disponibilidade hídrica do reservatório Cruzeta. Os resultados evidenciaram que diferenças relativamente pequenas nas estimativas de evaporação anual podem resultar em variações expressivas nos volumes evaporados, reforçando a sensibilidade dessas estimativas à metodologia adotada.

Além disso, verificou-se que, em condições de armazenamento reduzido, as perdas por evaporação permanecem representativas devido à redução não proporcional entre o volume armazenado e a área superficial do reservatório, aumentando sua relevância no balanço hídrico.

Assim, o estudo reforça que a consideração explícita das perdas evaporativas e a escolha criteriosa do método de estimativa constituem aspectos essenciais para subsidiar o planejamento, a

operação e a gestão de reservatórios em regiões semiáridas, contribuindo para avaliações mais consistentes da disponibilidade hídrica.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). "*Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*", FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 300 p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (2017). "*Reservatórios do semiárido brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação – relatório síntese*". ANA, Brasília – DF.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (2026). "*HidroWeb – Sistema de Informações Hidrológicas*". Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 18/05/2026.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (2026). "*Banco de Dados Meteorológicos*". Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 18/05/2026.

JENSEN, M.E.; HAISE, H.R. (1963). "*Estimating evapotranspiration from solar radiation*". Journal of the Irrigation and Drainage Division 89(IR4), pp. 15 – 41.

LOPES, J.W.B. (2016). *Disponibilidade hídrica em reservatórios do semiárido brasileiro: interações entre assoreamento e escassez*. UFC Fortaleza – CE, 120 p.

NASCIMENTO, J.C.; ALMEIDA DE MELO, M.G.M.; OLIVEIRA, L.M.M.; CABRAL, J.J.S.P.; PAIVA, A.L.R. (2023). "*Evaporação em pequenos reservatórios, com diferentes coberturas, na região do semiárido brasileiro*". Revista Brasileira de Geografia Física 16(6), pp. 3088 – 3102.

PEREIRA, S.B.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.; RAMOS, M.M. (2009). "*Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório*". Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 13(3), pp. 346 – 352.

SANCHES, F.O.; FRAUCHES, M.S.; FERREIRA, C.C.M.; VIANNA, Y.C.G.; OLIVEIRA, T.A. (2023). "*Evaporação em reservatórios hídricos: uma revisão de métodos/técnicas empíricas*". Revista do Departamento de Geografia, 43, e209203.

TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F.J.M.; NOGUEIRA, A.M.B.; GALLEGOS, H.G. (2000). "*Atlas Solarimétrico do Brasil – Banco de Dados Terrestres*". UFPE, Recife – PE, 111 p.