

DETERMINAÇÃO DA EVAPORAÇÃO PELO MÉTODO DO BALANÇO DE MASSA EM RESERVATÓRIOS ARTIFICIAIS PARA IRRIGAÇÃO

A. S. Oliveira¹, T. K. S. Borges², N. D. Silva³, J. P. C. Couto⁴

RESUMO: Este trabalho visou quantificar a evaporação em superfície de água livre com baixa turbidez pelo método do balanço de massa, em reservatórios revestidos com manta impermeável. A área experimental está localizada na Fazenda, município de Governador Mangabeira, Bahia (12° 37' S; 39° 03' W; 218 m). Para coleta dos dados meteorológicos foi instalada uma estação meteorológica posicionada no corredor de 2,5 m entre dois reservatórios. Aproveitando a estrutura da torre, foi fixado numa das extremidades ao tripé e apoiado na superfície do solo, dois tubos de aço galvanizado que avançavam horizontalmente para dentro dos dois reservatórios. Os tubos serviram de suporte para dois transdutores de pressão para monitoramento da variação do nível da água, como também de um turbidímetro para monitoramento da turbidez da água, em unidade nefelométricas de turbidez (NTU). O período do experimento foi de 18 de setembro a 30 de novembro de 2016. Com base na equação simplificada do balanço de massa, a lâmina d'água evaporada do reservatório menor (R1) foi aproximadamente 347,2 mm correspondendo a 4,7 mm dia⁻¹. No reservatório maior (R2), a lâmina d'água evaporada foi aproximadamente 509,3 mm, ou seja, 6,9 mm dia⁻¹.

PALAVRAS-CHAVE: nível de água, calor latente, transdutor de pressão

DETERMINATION OF EVAPORATION BY THE METHOD OF THE BALANCE OF MASS IN ARTIFICIAL RESERVOIRS FOR IRRIGATION

ABSTRACT: This work aimed to quantify the evaporation on a free water surface with low turbidity by the mass balance method, in reservoirs coated with impermeable lining material. The experimental area is located at Farm, in the municipality of Governador Mangabeira, Bahia (12° 37' S, 39° 03' W, 218 m). To collect the meteorological data, a meteorological station was installed in the 2,5 m corridor between two reservoirs. Taking advantage of the structure of the

¹ Professor, UFRB Cruz das Almas - Bahia. E-mail: aureo@ufrb.edu.br

² Doutoranda em Engenharia Agrícola, UFRB, Cruz das Almas - Bahia. Profª do IF-Sertão Pernambucano. E-mail: tatyana_kayty@yahoo.com.br /tatyana.borges@ifsertao-pe.edu.br

³ Doutorando em Engenharia Agrícola, UFRB, Cruz das Almas, Bahia. E-mail: neylon_duart@hotmail.com

⁴ Mestre em Engenharia Agrícola, UFRB, Cruz das Almas, Bahia. E-mail: jpauloengagro@gmail.com

tower, two tubes of galvanized steel were positioned with one end attached to the tripod base and the other running horizontally into the two reservoirs. The tubes served as support for two pressure transducers for monitoring water level variation, as well as a turbidimeter for water turbidity monitoring, in nephelometric units of turbidity (NTU). The monitoring period was from September 18 to November 30, 2016, totaling 74 days. Based on the simplified mass balance equation, the evaporated water slide from the smaller reservoir (R1) was approximately 347.2 mm corresponding to 4.7 mm dia⁻¹. In the larger reservoir (R2), the evaporated water depth was approximately 509.3 mm, that is, 6.9 mm dia⁻¹.

KEYWORDS: water level, latent heat, pressure transducer

INTRODUÇÃO

No mundo existem aproximadamente 304 milhões de lagos, correspondendo a uma área total de 4,2 milhões de km² (Downing et al., 2006). Como a água doce está se tornando um recurso escasso, há um incentivo para o desenvolvimento de estudos sobre evaporação.

O volume de água evaporado de um lago ou reservatório depende de fatores relacionados à atmosfera (radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar e velocidade do vento), à geometria e profundidade do reservatório, ao regime térmico e qualidade da água (turbidez) bem como fatores associados ao ambiente circundante em termos de vegetação e topografia da área (Finch & Calver, 2008; Rodrigues, 2009; Curtarelli et al., 2013; Rong et al, 2013; McJannet et al., 2013; Majidi et al., 2015).

Em todo o mundo, pesquisadores e organizações desenvolvem trabalhos para quantificar a evaporação em superfícies de água livre (lagos, rios, reservatórios, entre outros), por meio de uma ampla diversidade de métodos, como por exemplo, balanço de massa, balanço de energia com razão de Bowen, transferência de massa, correlação de turbilhões, métodos combinados e medições em tanques evaporimétricos (na superfície ou enterrados) (Singh & Xu, 1997; Gianniou & Antonopoulos, 2007; Jensen & Allen, 2016). O método do balanço de massa baseia-se no princípio da conservação de massa e possibilita a medição direta da evaporação. Entretanto, é um método complexo, possui desvantagem quando a análise ocorre em açudes e lagos naturais, nos quais pode haver muita imprecisão nas medidas dos fluxos de entrada e de saída, em que esse controle não existe, principalmente, por causa do processo de infiltração. Já em reservatórios revestidos a única variável de saída é a evaporação e de entrada é a precipitação, visto que a infiltração e qualquer outra variável são anuladas.

Rong et al. (2013) concluíram que a diferença das fases de precipitação e evaporação induziram a mudanças no nível da água do lago Dongping, na China. Os autores observaram que a precipitação anual concentrou-se nos meses de julho a agosto, enquanto a evaporação mais elevada ocorreu entre os meses de maio a julho. Já Duan & Bastiaanssen, 2013 estimaram as variações do volume de água em lagos e reservatórios de quatro bancos de dados in situ e dados de imagens de satélite, nos lagos Mead (Estados Unidos), Tana (Etiópia) e Ijssel (Holanda), e verificaram que uma boa correlação entre as medidas (r^2 de 0,95 a 0,99).

O Brasil se destaca na disponibilidade de recursos hídricos, com 12% do total de água doce do mundo, entretanto mal distribuídos ao longo do seu território (ANA, 2007). A escassez hídrica no país tem se estendido também para algumas regiões sul e sudeste as quais não tinham esse tipo de problema. Contudo, o desenvolvimento de pesquisas realizadas no país na área de evaporação são escassas, devido à deficiência de informações básicas para atender as mais diversas necessidades nas regiões climáticas do país (Oliveira et al., 2005). Nesse contexto, o trabalho teve como objetivo determinar a evaporação em superfície de água livre com baixa turbidez pelo método do balanço de massa, em reservatórios revestidos com manta impermeável.

MATERIAL E MÉTODOS

Local de estudo

Os trabalhos de campo foram realizados em reservatórios artificiais de armazenamento de água localizados em propriedade privada (Fazenda Santo Antônio) pertencente à empresa DANCO Comércio e Indústria de Fumos Ltda., município de Governador Mangabeira, Bahia (12°37' S; 39°03' W; 218 m). O clima é do tipo Am, descrito como clima de bosque chuvoso quente e úmido, conforme a classificação de Köppen. A precipitação média anual é de 1150 mm, com temperatura média de 25 °C e 65% de umidade relativa. A direção predominante do vento é sudeste, com velocidade média diária de 2,5 m s⁻¹ a 10 m de altura.

A área é de topografia relativamente plana e a fazenda é especializada no cultivo do fumo tipo Sumatra (*Nicotiana tabacum*, L) para capa de charuto. Pelo fato do fumo ser uma cultura nobre e altamente exigente em água de boa qualidade, a água utilizada na irrigação tem que ser de baixa turbidez, graças ao um intenso processo de tratamento de filtração e osmose reversa, para retirar as impurezas sólidas (orgânicas e inorgânicas), principalmente sais de cloro, que prejudicam o desenvolvimento das plantas, interferem na qualidade das folhas, inviabilizando

o produto final. A produção é exportada para Europa, o que justifica os altos investimentos, com impactos positivos diretos na economia local.

Após o tratamento a água com baixa turbidez é armazenada em reservatórios escavados, com seções trapezoidais perpendiculares entre si, com base maior e base menor retangulares. Os reservatórios são revestidos por manta (geomembrana) impermeabilizante em polietileno de alta densidade (PEAD), na cor preta e com 2 mm de espessura. Para o presente estudo dois reservatórios (doravante R1 e R2) foram selecionados e constituem a área experimental, como mostra a Figura 1. A escolha dos reservatórios levou em conta o tamanho do espelho d'água e a idade do material de revestimento. O período de coleta de dados foi de 18 de setembro (dia Juliano, DJ 262) a 30 de novembro de 2016 (DJ 335), totalizando 74 dias.

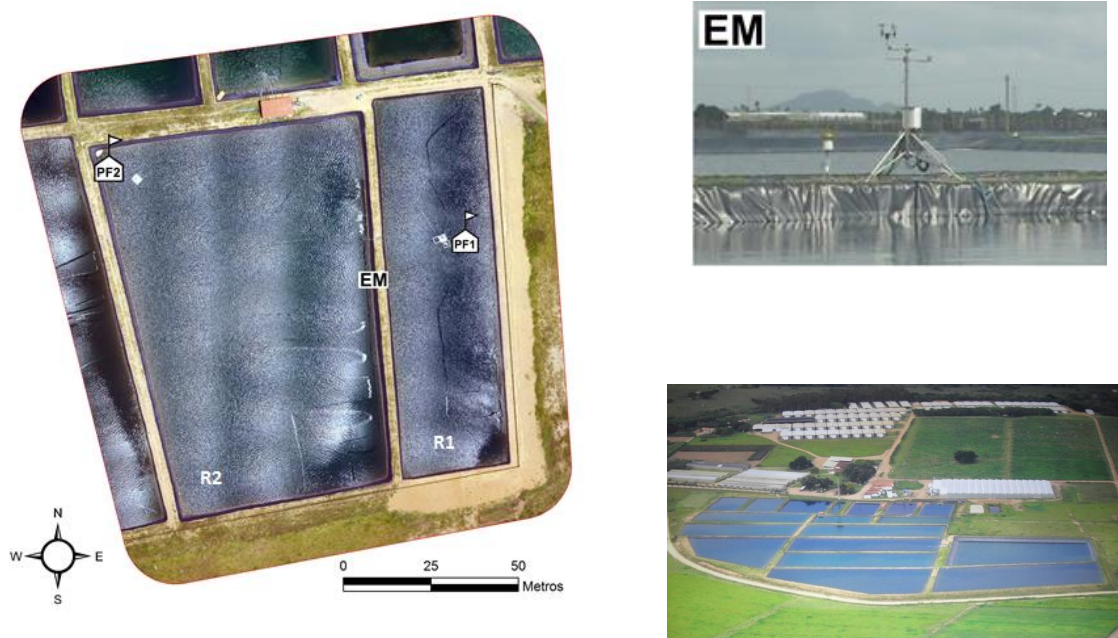


Figura 1. Vista aérea da Fazenda Santo Antônio, mostrando em primeiro plano os reservatórios para armazenamento de água (azul claro) para irrigação da cultura do fumo; dos reservatórios (R1 e R2) selecionados para monitoramento do nível da água; EM = estação meteorológica, no município de Governador Mangabeira, Bahia.

Estrutura para coleta de dados

Entre os dois reservatórios, uma estação meteorológica automática foi instalada em solo, para coleta de dados de: (a) temperatura e umidade relativa do ar com um termohigrômetro (*modelo HMP60, Vaisala, Helsinki*) posicionado a 2 m acima da superfície do solo; (b) velocidade e direção do vento por meio de conjunto anemométrico de canecas (*modelo 03001, R. M. Young, USA*) a 3 m de altura; (c) radiação solar incidente por meio de um piranômetro (*modelo SPLite, Kipp & Zonen, The Netherlands*), com fator de calibração de $16,57 \mu\text{v W}^{-1} \text{m}^2$

² e posicionado a 2,30 m da superfície do solo. Para o registro diário da precipitação utilizou-se um pluviômetro automático (*modelo TE-525MM, Texas Electronics, USA*), instalado próximo à torre com área de captação a 0,80 m da superfície do solo. Todos os instrumentos conectados ao CR1000 da torre meteorológica foram escaneados a cada 30 segundos e os dados agrupados em tabelas de 5, 30 e 60 minutos.

Ainda como parte da torre meteorológica, dois transdutores de pressão (*modelo CS451, Campbell Scientific, USA*), um em cada reservatório, foram utilizados para monitoramento da variação do nível da água. Especificações técnicas do transdutor de pressão indicam capacidade de detectar variações de até 0,36 mm (0,0035% da escala total) no intervalo de 0 a 60°C. Em cada reservatório e para instalação do CS451, um tubo em aço-galvanizado de 50 mm de diâmetro e 6 m de comprimento foi utilizado. Fixado numa das extremidades ao tripé da torre meteorológica e apoiado na superfície do solo, o tubo avançava horizontalmente para dentro do reservatório. Passou-se o cabo do instrumento, a partir do datalogger, por dentro do tubo em direção ao reservatório. Na extremidade do tubo o CS451 descia, preso numa corda esticada, para dentro da água. Com essa configuração, no reservatório R1 o transdutor foi posicionado na vertical a 1,82 m abaixo do nível da água e no R2 o outro CS451 foi posicionado a 1,25 m de profundidade. Aproveitando a estrutura, instalou-se também no R2 um segundo turbidímetro de mesmo modelo daquele do R1.

Método do balanço de massa (BM)

O método do BM baseia-se no princípio de conservação de massa e possibilita a medição direta da evaporação. É o método utilizado em evaporímetros como o tanque Classe A, e lisímetros de pesagem contínua. O BM é a contabilidade do volume de água armazenado quando se considera as variáveis de entrada (precipitação, escoamento superficial e fluxo subterrâneo) e as de saída (evaporação, infiltração no substrato e derivação).

Variações no volume de água armazenado num reservatório são detectadas através da oscilação da lâmina de água durante um determinado intervalo de tempo (WMO, 2012; Duan & Bastiaanssen, 2013). Esse método foi aplicado nos dois reservatórios da área experimental, por meio da instalação de um transdutor de pressão em cada um deles. O reservatório R1 é o controle, pois trata-se de construção recente (primeiro trimestre de 2016) enquanto o reservatório R2 é uma construção mais antiga (2010). Portanto, pode-se antecipar problemas de infiltração de água no R2 enquanto que no R1 essa perda é mínima ou inexistente. Os componentes do balanço de massa para um lago são expressos na Eq. (1) (Keijman & Koopmans, 1973):

$$\Delta h = P + I + S_1 - E_{BM} - S_2 - U \quad (1)$$

Em que: Δh é a variação de nível da lâmina d'água (mm), P é lâmina d'água precipitada no espelho d'água (mm), I é o escoamento superficial (mm), S_1 é o fluxo subterrâneo para dentro do lago (mm), E_{BM} é a lâmina d'água evaporada (mm) segundo método do BM, S_2 é o fluxo de perda por infiltração (mm), U é a lâmina d'água derivada do reservatório (mm), ou seja, água retirada de água para diversos fins, como por exemplo, irrigação.

Resolvendo a Eq. (1) para evaporação e assumindo $I = S_1 = S_2 = U = 0$ devido às características dos reservatórios da área experimental, tem-se:

$$E_{BM} = P - \Delta h = P - (h_t - h_{t-1}) \cdot 10 \quad (2)$$

Onde: h_t é a altura da lâmina d'água no instante posterior t (cm) e h_{t-1} é a altura da lâmina d'água no instante anterior ($t-1$) (cm). O fator 10 converte água evaporada de cm para mm.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 mostra a variação do nível d'água no reservatório menor R1 juntamente com os eventos de precipitação pluviométrica. Dados obtidos no reservatório maior R2 também mostraram padrão semelhante de decréscimo da lâmina d'água. Em R1, a leitura inicial do transdutor de pressão foi 184,2 cm e a leitura final, após 74 dias de medição, foi 159,2 cm, correspondendo a uma variação total de 24,9 cm ou 249 mm. No caso do reservatório R2, a leitura inicial do CS451 ali instalado foi 120,5 cm e a final 79,3 cm, resultando numa variação total de 41,2 cm ou 412 mm.

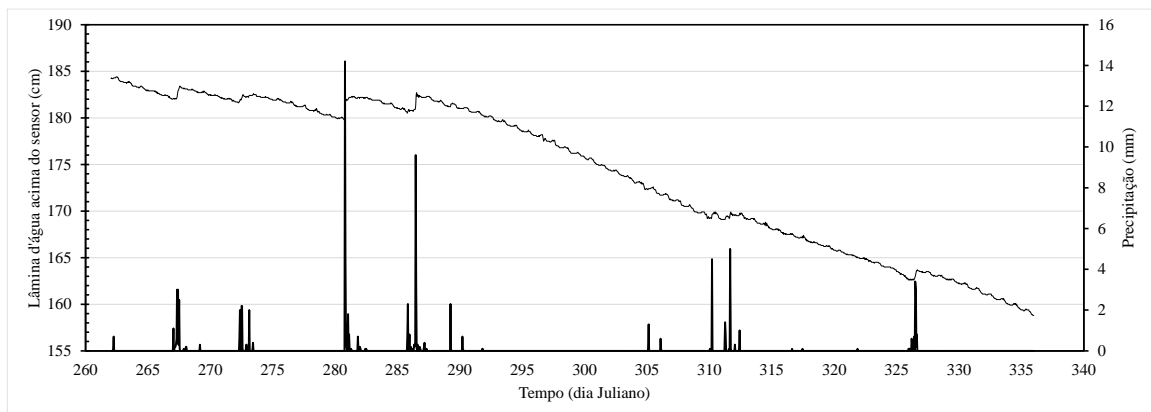


Figura 2. Distribuição temporal da variação da lâmina d'água acima do transdutor de pressão (cm) e da precipitação (mm) durante o período experimental. Fazenda Santo Antônio, Governador Mangabeira, Bahia.

No mesmo período a precipitação total foi de 97,8 mm. Portanto, e com base na equação simplificada do balanço de massa (Eq. 2), a lâmina d'água evaporada do reservatório R1 foi aproximadamente 347,2 mm correspondendo a 4,7 mm dia⁻¹. No reservatório R2, a lâmina d'água evaporada foi aproximadamente 509,3 mm, ou seja, 6,9 mm dia⁻¹. A máxima precipitação em 24 horas foi 20,4 mm no dia 06 de outubro de 2016 (DJ 280).

A obtenção de lâmina d'água evaporada maior no reservatório R2 já era esperada, pois como mencionado anteriormente, o reservatório R1 é de construção recente (2016) e foi testado para ocorrência de perdas de água por infiltração através do revestimento do fundo. Os testes realizados pelos técnicos da Fazenda Santo Antônio após a construção do reservatório, ainda que de natureza qualitativa (simples monitoramento visual da velocidade de descida da lâmina d'água) indicaram infiltração nula no R1. O reservatório R2, por outro lado, foi construído em 2010 e devido à idade, é frequente a necessidade de no início de cada estação, se fazer reparos no revestimento. Esses reparos consistem basicamente em se soldar sobre a parte rasgada um pedaço de plástico do mesmo material; procedimento este que não garante prevenção total de infiltrações. Além disso, o reservatório R2 é maior que o R1, o que aumenta ainda mais as chances de perdas de água por infiltração. Portanto, no R2, a perda de água de 509,3 mm em 74 dias provavelmente inclui perdas por infiltração. Assumindo R1 como controle, as perdas por infiltração em R2 podem ser estimadas pela diferença entre as duas lâminas, ou seja, 509,3 mm – 347,2 mm = 162,1 mm, equivalente a 2,2 mm dia⁻¹. Essa taxa de perda por infiltração através do revestimento do reservatório é coerente com valores reportados por Craig (2006) e McJannet et al. (2013). Estes autores mencionam valores estimados de perdas por infiltração da ordem de 1 a 2 mm dia⁻¹ em reservatórios artificiais na Austrália par fins agrícolas. Essa comparação entre os reservatórios assume que para as condições atmosféricas durante o experimento, o reservatório R2 evaporaria na mesma proporção que R1, independente das dimensões de R2 (maior espelho d'água e menor profundidade média).

A estimativa da lâmina d'água evaporada em R1 com base nas leituras inicial e final do período experimental de 74 dias é coerente com a aplicação do método (Eq. 2) em escala diária, ou seja, variação da lâmina d'água em 24 horas mais a chuva do período. O cálculo diário da evaporação é provável que forneça resultados mais precisos da evaporação total ocorrida no reservatório já devido à maior resolução temporal.

Em escala diária, a lâmina d'água evaporada em R1 (EBM) foi de 352,8 mm em 74 dias, equivalente a 4,8 mm dia⁻¹ e diferença positiva de 5,6 mm em relação à aplicação do método uma única vez para todo o período. No reservatório R2, com o balanço de massa diário a lâmina total evaporada foi 517,1 mm, equivalente a 7 mm dia⁻¹ e diferença de 7,8 mm em relação à

aplicação do balanço de massa no final do período de coleta de dados. A diferença entre os dois reservatórios neste caso é de $517,1 - 352,8 = 164,3$ mm equivalente a 2,2 mm.

A aplicação do balanço de massa com frequência diária apresenta importante vantagem em relação à aplicação do balanço de massa de uma única vez no final do período, no sentido de que o primeiro permite visualizar a distribuição da lâmina no tempo. A lâmina de água acumulada foi de 353 mm para o reservatório R2, conforme a Figura 3. Resultados semelhantes foram encontrados por Borges (2017) ao avaliar a evaporação por métodos com princípios físicos distintos, como o método de transferência de massa (424 mm) e pelo método do balanço de energia com Razão de Bowen (350 mm). A autora explica que o método de transferência de massa apresentou um valor superior em razão da evaporação ser diretamente proporcional à velocidade do vento e com este método valores negativos de calor latente não ocorrem já que a diferença ($e_{sw} - e_a$) é sempre positiva.

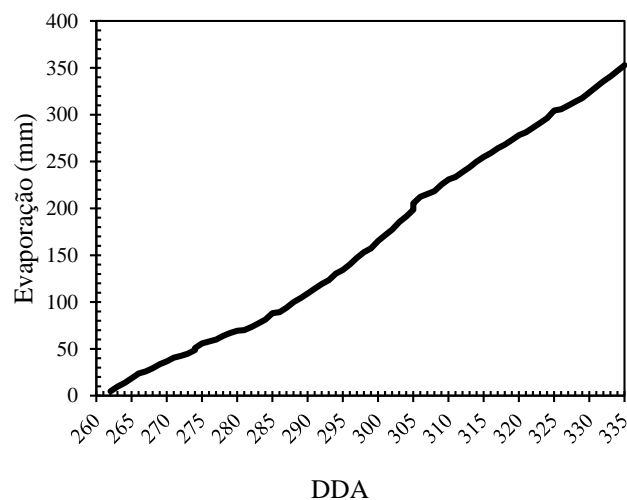


Figura 3. Lâmina de evaporação acumulada no reservatório R2 pelo método de balanço de massa.

A evaporação diária obtida foi relativamente baixa, uma vez que a água é de baixa turbidez e não há impedimento para propagação da radiação solar a grandes profundidades. Na Austrália, aproximadamente 40% da água armazenada em reservatórios é perdida por evaporação (Craig et al, 2005).

A evaporação diária variou de 0,7 a 8,2 mm, com média de $4,8 \text{ mm dia}^{-1}$, ao longos dos 74 dias do período experimental. Curtarelli et al. (2013) determinaram a dinâmica temporal da evaporação no reservatório da usina hidrelétrica de Itumbiara, encontraram uma evaporação média de $8,2 \text{ mm dia}^{-1}$ no período seco e $3,7 \text{ mm dia}^{-1}$ no período chuvoso, com um evaporação acumulada máxima de 20 mm dia^{-1} no verão.

CONCLUSÕES

A medição da evaporação da água pelo método do balanço de massa com leitura automática do nível d'água via transdutor de pressão revelou-se numa opção prática e de fácil aplicação. Considerando a robustez do instrumento e a boa resolução das leituras (0,35 mm), este método é confiável para determinação da evaporação em reservatórios artificiais revestidos, onde as perdas por infiltração são mínimas. A lâmina d'água evaporada no reservatório R2 pelo método do balanço de massa foi em média 4,8 mm dia⁻¹, correspondendo a um total acumulado de 353 mm em 74 dias do período experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORGES, T. K. S. EVAPORAÇÃO EM SUPERFÍCIE DE ÁGUA LIVRE COM BAIXA TURBIDEZ. Cruz das Almas-BA, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2017. 134 f. (Tese de doutorado).
- CRAIG, I.; GREEN, A.; SCOBIE, M.; SCHMIDT, E. Controlling Evaporation Loss from Water Storages. NCEA publicação, v. 1, n. 1, p. 148, 2005.
- CRAIG, I. P. Comparison of precise water depth measurements on agricultural storages with open water evaporation estimates. *Agricultural Water Management*, v. 85, n. 1, p. 193-200, 2006.
- CURTARELLI, M. P.; ALCÂNTARA, E. H.; ARAÚJO, C. A. S.; STECH, J. L.; LORENZZETTI, J. A. Avaliação da dinâmica temporal da evaporação no reservatório de Itumbiara, GO, utilizando dados obtidos por sensoriamento remoto. *Revista Ambiente & Água*, v. 8, n. 1, p. 272, 2013.
- DOWNING, J. A.; PRAIRIE, Y. T.; COLE, J. J.; DUARTE, C. M.; TRANVIK, L. J.; STRIEGL, R. G.; McDOWELL, W. H.; KORTELAJINEN, P.; CARACO, N. F.; MELACK, J. M.; MIDDELBURG, J. J. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, v. 51, n. 5, p. 2388-2397, 2006.
- DUAN, Z.; BASTIAANSEN, W. G. M. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment*, v. 134, p. 403-416, 2013.

FINCH, J.; CALVER, A. Methods for the quantification of evaporation from lakes, 2008. 47 p.

GIANNIOU, S. K.; ANTONOPOULOS, V. Z. Evaporation and energy budget in Lake Vegoritis, Greece. *Journal of Hydrology*, v. 345, n. 3, p. 212-223, 2007.

JENSEN, M. E.; ALLEN, R. G. Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements. American Society of Civil Engineers, 2^a ed., 2016, 744 p.

KEIJMAN, J. Q.; KOOPMANS, R. W. R. A comparison of several methods of estimating the evaporation of Lake Flevo. *International Association of Hydrological Sciences Publ*, v. 109, p. 225-232, 1973.

MAJIDI, M.; ALIZADEH, A.; FARID, A.; VAZIFEDOUST, M. Estimating evaporation from lakes and reservoirs under limited data condition in a semi-arid region. *Water Resources Management*, v. 29, n. 10, p. 3711-3733, 2015.

McJANNET, D. L.; COOK, F. J. e BURN, S. Comparison of techniques for estimating evaporation from an irrigation water storage. *Water Resources Research*, v. 49, n. 3, p. 1415-1428, 2013.

OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; GALVÃO, C. O. e LEITÃO, T. J. V. Estimativa da Evaporação e Análise do Uso do Coeficiente (K_p) do Tanque “CLASSE A” nas Regiões do Cariri e Sertão da Paraíba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 73-83, 2005.

RODRIGUES, C. M. M. Cálculo da evaporação de albufeiras de grande regularização do sul de Portugal. Évora, Universidade de Évora, 2009. 269 f. (Dissertação de Mestrado).

RONG, Y.; SU, H.; ZHANG, R.; DUAN, Z. Effects of climate variability on evaporation in Dongping Lake, China, during 2003–2010. *Advances in Meteorology*, v. 2013, 2013.

SINGH, V. P.; XU, C. -Y. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrological Processes*, v. 11, n. 3, p. 311-323, 1997.

WMO - World Meteorological Organization. *International Glossary of Hydrology*, 2012, 471pp.