

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DO AJUSTE DO MODELO AIR2WATER NA ESTIMATIVA DE TEMPERATURA DE ÁGUA EM LAGOA RASA COSTEIRA SUBTROPICAL

Jenifer Lima da Silva¹; Juan Martín Bravo¹; Carlos Henrique Saldanha Ferrari¹, Matheus Henrique Tavares²; Lucia Helena Ribeiro Rodrigues¹ & David da Motta Marques¹

Abstract: Coastal lagoons are ecosystems sensitive to climate change, with water temperature being a key indicator of potential effects in this context. The Air2Water model has proven to be an efficient tool for simulating the thermal dynamics of these environments, utilizing the particle swarm optimization (PSO) method to obtain optimized parameter values. Thus, this study evaluated the performance of three versions of the Air2Water model applied to Mangueira Lake, in southern Brazil, using the Kling-Gupta coefficient (KGE) metric, as well as the impact of using 100, 500 and 1000 particles by PSO during the calibration process. Excellent KGE values were obtained during the calibration and verification periods with different versions of the model, showing that the use of the versions with 6 and 8 parameters of Air2Water obtained similar performance, with KGE above 0.97 in both periods. It was also found that reducing the number of PSO particles from 1000 to 100 shows a ninefold decrease in the processing time during calibration of the Air2Water model when using KGE as the objective function, with no negative impacts on the performance of the model adjustment being identified in any of its versions. These results confirm that the Air2Water model has the capacity to represent lacustrine ecosystems, contributing to the field of applied limnology.

Resumo: Lagoas costeiras são ecossistemas sensíveis às mudanças do clima, tendo destaque que a temperatura da água é um importante indicador de possíveis efeitos decorrentes deste contexto. O modelo Air2Water tem mostrado uma eficiente ferramenta de simulação da dinâmica térmica desses ambientes, com o uso do método de otimização por enxame de partículas (PSO) para obtenção de valores otimizados de parâmetros. Dessa forma, este estudo avaliou o desempenho de três versões do modelo Air2Water aplicadas à Lagoa Mangueira, no sul do Brasil, utilizando a métrica coeficiente de Kling-Gupta (KGE), além do impacto da utilização de 100, 500 e 1000 partículas pela PSO durante o processo de calibração. Foram obtidos valores excelentes de KGE nos períodos de calibração e verificação com as diferentes versões do modelo, evidenciando que o uso das versões com 6 e 8 parâmetros do Air2Water obtiveram desempenho semelhante, com KGE acima de 0,97 em ambos os períodos. Também foi constatado que a redução de 1000 para 100 partículas na PSO diminuiu em nove vezes o tempo de processamento da calibração automática do modelo Air2Water quando utilizado o KGE como função-objetivo, não sendo identificados impactos negativos no desempenho do ajuste do modelo em nenhuma de suas versões. Estes resultados corroboram que o modelo Air2Water possui a devida capacidade de representar ecossistemas lacustres, contribuindo para a área de limnologia aplicada.

Palavras-Chave – Air2Water, calibração de modelo, temperatura superficial da água.

1) Afiliação: Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH/UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500 / Prédio 44302, Agronomia, Porto Alegre – RS, Telefone: (51)3308-6680, email: jeniferlimads@gmail.com; jumarbra@iph.ufrgs.br; carlosh.sferrari@gmail.com; luciarrodrigues@gmail.com.

2) Afiliação: Géosciences Environnement Toulouse, IRD, Université Toulouse 3, Toulouse, France. email: tavaresmatheus@gmail.com.

INTRODUÇÃO

Lagoas costeiras são ecossistemas que desempenham serviços naturais de elevada importância, sendo áreas de transição entre rios de água doce e ambientes marinhos Basset *et al.* (2013). Com o aumento da frequência de fenômenos climáticos extremos e a intensificação do aquecimento global nos últimos anos, os lagos atuam como sentinelas das mudanças do clima, devido a sua sensibilidade em incorporar tais alterações (como temperatura, precipitação, vento, etc.) e assim indicarem a magnitude destes efeitos (Adrian *et al.*, 2009; Jia e Luo, 2022). Dessa forma, a temperatura da água de lagoas é uma das características mais utilizadas para avaliar possíveis impactos decorrentes principalmente de alterações na temperatura do ar.

Modelos matemáticos podem representar a dinâmica térmica de lagoas por meio de simulações computacionais, contribuindo para estudos de limnologia aplicada (Piccolroaz *et al.*, 2024). O modelo Air2Water, que é do tipo 0,5D híbrido, é um modelo simplificado de base física (Piccolroaz *et al.*, 2013), que tem ganhado notoriedade devido a sua capacidade de simular de maneira eficiente a temperatura da água de lagos de diferentes morfologias (Toffolon *et al.*, 2014; Guo *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024). O método de otimização acoplado ao Air2Water é o *Particle Swarm Optimization* (PSO), o qual trata-se de um método heurístico que tem como princípio, o aprendizado individual e coletivo de um enxame de partículas em busca do ótimo global (Piccolroaz *et al.*, 2013).

O modelo Air2Water utiliza uma equação diferencial ordinária na qual o número de parâmetros (também chamado de versões) varia de 4 a 8, e estes descrevem variados processos do balanço de calor entre a superfície de lagos e a atmosfera (Toffolon *et al.*, 2014). Além disso, os resultados obtidos em processos de otimização utilizando métodos heurístico são influenciados pelos valores adotados nos próprios parâmetros do método, como o número de partículas, no caso do PSO. Assim, os objetivos do presente estudo foram: i) realizar a modelagem no Air2Water da Lagoa Mangueira, a qual se localiza na planície costeira do Rio Grande do Sul, por meio da aplicação das três diferentes versões do modelo e ii) analisar possíveis impactos do uso de diferentes números de partículas no PSO quanto ao desempenho da calibração automática do Air2Water, utilizando como função-objetivo o coeficiente de Kling-Gupta (KGE - Gupta *et al.*, 2009).

METODOLOGIA

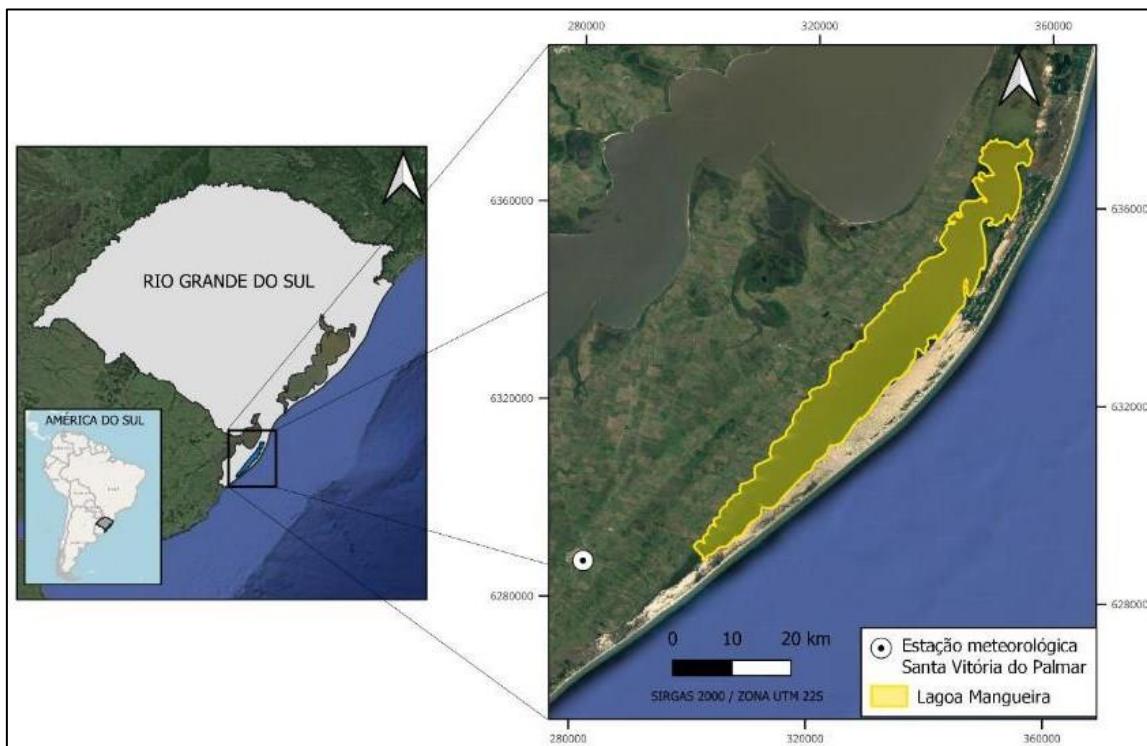
Área de estudo

A lagoa Mangueira localiza-se no extremo sul do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, sendo uma zona costeira na qual pertence ao Sistema Hidrológico do Taim. Possui uma área de aproximadamente 820 km², com profundidade média de 2,49 m e máxima de 6,5 m. Seu formato é alongado na direção Norte-Sul, em torno de 90 km de comprimento e 10 km de largura (Tejadas *et al.*, 2016).

O ecossistema é uma grande lagoa rasa, localizada entre as coordenadas 32°20' a 33°00' S e 52°20' a 52°45' (Cavalcanti *et al.*, 2016), numa região considerada subtropical com clima Cfa [Tavares *et al.*, 2019]. Além de apresentar a área de estudo, a Figura 1 também mostra a localização da estação meteorológica Santa Vitória do Palmar, que forneceu as séries temporárias diárias de temperatura do ar utilizadas neste trabalho.

Figura 1 – Representação da Lagoa Mangueira e localização da estação meteorológica Santa Vitória do Palmar, RS.

Fonte: adaptado de Ferrari et al. (2024).



Modelo Air2Water

Baseado na equação do balanço de calor integrado no volume e a linearização simplificada dos termos do fluxo de calor usando a expansão de Taylor, o modelo Air2Water se propõe como uma ferramenta acessível para modelagem de lagoas, tendo em vista que se requer como dados de entrada somente a série temporal de temperatura do ar (Piccolroaz *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2020). O modelo possui três diferentes versões, que variam de acordo com o número de parâmetros utilizados, sendo disponível a versão com 4, 6 e 8 parâmetros. A versão mais completa do modelo que utiliza 8 parâmetros é descrita pela Equação 1 (Piotrowski *et al.*, 2022):

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{\delta} \left\{ a_1 + a_2 T_a - a_3 T_w + a_5 \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{t_y} - a_6 \right) \right] \right\} \quad (1)$$

onde δ é um parâmetro adimensional, sendo a razão entre o volume da camada lacustre superficial e um volume de referência que também pode ser considerado como uma profundidade normalizada da camada de mistura (Equação 2).

$$\delta = \exp \left(-\frac{T_w - T_h}{a_4} \right), \text{ se } T_w \geq T_h \quad (2)$$

$$\delta = \exp \left(-\frac{T_h - T_w}{a_7} \right) + \exp \left(-\frac{T_w}{a_8} \right), \text{ se } T_w < T_h$$

Considerando as Equações 1 e 2, t é o dia do ano, T_w é a temperatura da água na superfície da lagoa; t_y é a duração do ano em dias; T_a é a temperatura do ar; T_h é um valor de referência para a temperatura da água em profundidade do lago; e a_1 a a_8 são os oito parâmetros do modelo. Com o uso da versão com 6 parâmetros, a_7 e a_8 são excluídos, resultado em $\delta = 1$ para $T_w < T_h$ (Piotrowski *et al.*, 2023). De maneira semelhante ocorre para a versão com 4 parâmetros, em que os parâmetros a_5 até a_8 são ignorados, simplificando as Equações 1 e 2 (Prats e Danis, 2019).

Os conceitos físicos dos parâmetros consistem em: a_1 é o efeito residual entre a temperatura do ar e a temperatura superficial da lagoa; a_2 constitui os processos relacionados à temperatura do ar e à sua diferença frente à temperatura da água; a_3 compõe os processos relacionados à temperatura da água e à sua diferença frente à temperatura do ar; a_4 representa o nível de temperatura da superfície da lagoa que influencia a força da estratificação térmica direta; a_5 e a_6 representam, respectivamente, a amplitude e a fase da influência meteorológica externa anual; a_7 corresponde ao nível de temperatura da superfície do lago que influencia a força da estratificação térmica inversa; por fim, a_8 leva em conta o efeito da redução do fluxo de calor durante o período em que há cobertura de gelo no lago (Toffolon *et al.*, 2014).

O modelo Air2Water é disponibilizado acoplado a um método de otimização para execução do processo de calibração em qualquer estudo de caso. O método de otimização é denominado *Particle Swarm Optimization* é apresentado em mais detalhe no item a seguir.

Particle Swarm Optimization (PSO)

A PSO é um método de otimização do tipo mono-objetivo (Kennedy e Eberhart, 1995) que tem como função a busca por valores otimizados dos parâmetros do Air2Water. Isso ocorre através da exploração do espaço de busca realizada por um “enxame” de partículas (soluções candidatas do problema), sendo o tamanho do “enxame” um parâmetro do método que deve ser definido pelo usuário. O percurso das partículas se desenvolve a partir de um conhecimento individual, que provém de cada partícula, e do conhecimento coletivo, que é o ótimo global (Gill *et al.*, 2006); Majone *et al.*, 2010). O princípio da PSO é descrito matematicamente por meio da Equação 3 (Kennedy e Eberhart, 1995).

$$V_{(t+1)} = w \cdot V_{(t)} + C_1 \cdot r_1 \cdot (X_{best(t)} - X_{(t)}) + C_2 \cdot r_2 \cdot (G_{best(t)} - X_{(t)}) \quad (3)$$

Em que $V_{(t+1)}$ é a velocidade da partícula na nova iteração ($t+1$); $V_{(t)}$ é a velocidade da partícula na iteração anterior (t); w é o coeficiente de inércia; C_1 é o coeficiente de aprendizado individual; C_2 é o coeficiente de aprendizado coletivo; r_1 e r_2 são números aleatórios com distribuição uniforme $U[0,1]$; $X_{best(t)}$ é a melhor posição da partícula até a iteração anterior; $X_{(t)}$ é a posição da partícula na iteração anterior; $G_{best(t)}$ é a melhor posição entre todas as partículas do enxame até a iteração anterior.

Para os coeficientes C_1 e C_2 , que se referem, respectivamente, a memória individual e coletiva, foi estabelecido o valor igual a 2, que é um valor comumente utilizado, enquanto o valor do parâmetro w foi definido entre 0,4 e 0,9 (Kennedy e Eberhart, 1995).

O número de partículas ou tamanho do enxame influencia tipicamente o desempenho da PSO na resolução do processo de otimização, pois quanto maior esse valor, melhor é a exploração do

espaço de busca na procura pelo ótimo global, mas, em contrapartida, maior é o tempo computacional até um resultado ser encontrado.

Experimentos realizados

A calibração e verificação do modelo Air2Water foi feita com dados diários de temperatura superficial da água obtidos através de sensoriamento remoto com o sensor térmico *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). O período de 01/01/2010 até 31/12/2019 foi utilizado na calibração do modelo, e o período de 01/01/2000 até 31/12/2009 na verificação. Os dados de entrada do modelo, referentes a temperatura do ar, foram coletados da estação meteorológica de Santa Vitória do Palmar, a qual apresenta dados desde 1961.

O procedimento de simulação foi realizado para cada versão do modelo Air2Water, ou seja, para 4, 6 e 8 parâmetros, sendo analisada a eficiência do ajuste com o uso da métrica denominada de coeficiente de Kling-Gupta (KGE – equação 4). O KGE varia de $-\infty$ a 1, sendo obtido o valor 1 quando os valores simulados coincidem com os valores observados representando um ajuste hipotético perfeito.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{Tc}}{\sigma_{To}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{Tc}}{\bar{To}} - 1\right)^2} \quad (4)$$

onde: \bar{Tc} é a média das temperaturas superficiais da água calculadas, \bar{To} é a média das temperaturas superficiais da água observadas, r é o coeficiente de correlação de Pearson, σ_{Tc} é desvio padrão das temperaturas superficiais da água calculadas e σ_{To} é desvio padrão das temperaturas superficiais da água observadas.

A etapa de calibração consistiu na maximização do KGE e foram feitas 5 repetições do procedimento para cada versão do modelo Air2Water, com cada configuração do PSO, com o intuito de verificar se os valores obtidos dos parâmetros e da métrica KGE se mantêm similares em cada caso. As execuções foram desenvolvidas em um computador com processadores Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2697 v3 @ 2.60 GHz.

Referente ao número de partículas, foram inseridos no PSO a quantidade de 100, 500 e 1000 partículas já assumindo que o valor *default* de 2000 pode ser reduzido sem comprometimento de desempenho, conforme apresentado por Saldanha-Ferrari *et al.* (2023) em testes conduzidos no Lago Superior. Com isso, o procedimento de ajuste do modelo Air2Water foi realizado 45 vezes da seguinte forma: 1 função-objetivo (KGE) x 3 combinações de versão do modelo Air2Water (4, 6 e 8 parâmetros) x 3 combinações de número de partículas (100, 500 e 1000) x 5 repetições do processo de calibração. Foi avaliado o tempo médio necessário para a calibração ser concluída, e o desempenho do modelo em termos da métrica KGE nos períodos de validação e calibração.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados médios do KGE nas etapas de calibração e validação para a estimativa da temperatura da água da lagoa Mangueira para cada versão do modelo Air2Water, além do tempo médio até a calibração ser concluída, estão apresentados na Tabela 1. Segundo a literatura, valores de

KGE superiores a 0,6 demonstram que o modelo satisfaz a representação do ecossistema simulado (Ayalew *et al.*, 2024; Patil e Stieglitz, 2015). Nota-se que a versão com 4 parâmetros teve um desempenho com menor eficiência que as demais, além de que o tempo operacional foi mais longo. Em contrapartida, as versões com 6 e 8 parâmetros obtiveram uma eficiência semelhante, porém as simulações com a versão de 8 parâmetros decorreram de forma mais rápida.

Outro destaque é de que a redução do número de partículas não afetou negativamente o ajuste do modelo à lagoa, demonstrando a possibilidade de diminuir em aproximadamente nove vezes o tempo de processamento da calibração do Air2Water. Os resultados obtidos condizem com o estudo de Ferrari *et al.* (2024), no qual foi realizada a calibração do Air2Water por meio da versão completa de 8 parâmetros para a lagoa Mangueira, utilizando o coeficiente de Nash-Sutcliffe como métrica, e resultando em um ganho operacional de oito vezes.

Tabela 1 – Valores médios do KGE e tempo de processamento na calibração do modelo Air2Water.

Versão	Nº de partículas	KGE calibração	KGE verificação	Tempo [min]
4 parâmetros	100	0,97	0,96	2,37
	500	0,97	0,96	12,98
	1000	0,97	0,96	22,88
6 parâmetros	100	0,98	0,97	2,15
	500	0,98	0,97	10,51
	1000	0,98	0,97	19,94
8 parâmetros	100	0,98	0,97	1,67
	500	0,98	0,97	8,30
	1000	0,98	0,97	15,71

Constata-se também a convergência das partículas da PSO em torno do ótimo global com 100 e 1000 indivíduos na versão completa de 8 parâmetros, ocorrer de maneira semelhante, como pode-se observar comparando a Figuras 2 com a Figura 3. Isso significa que mesmo em menor quantidade de partículas, o desempenho da exploração do espaço de busca praticamente não foi prejudicado, e trouxe ganhos computacionais devido à redução do tempo de processamento.

A título de ilustração, as séries temporais diárias de temperatura superficial da água observadas a partir de satélites e as simuladas a partir do modelo Air2Water na versão com 8 parâmetros são apresentadas na Figura 4 (modelo calibrado utilizando 100 partículas na PSO) e na Figura 5 (modelo calibrado utilizando 1000 partículas na PSO). Conforme a comparação dessas duas figuras, os resultados obtidos foram os mesmos, demonstrando que a calibração do modelo mantém o bom desempenho utilizando um menor número de partículas na PSO.

A série temporal diária de temperatura superficial da água da lagoa Mangueira simulada pelo modelo Air2Water acompanha muito bem os dados observados diários a partir de satélites, conforme

apresentado na Figura 4 e na Figura 5. Existe apenas uma pequena superestimativa dos valores mínimos de temperatura superficial da água observados a partir de satélites, além de uma pequena subestimativa dos valores máximos.

Figura 2 – Convergência de 100 partículas da PSO na busca por valores otimizados de parâmetros.

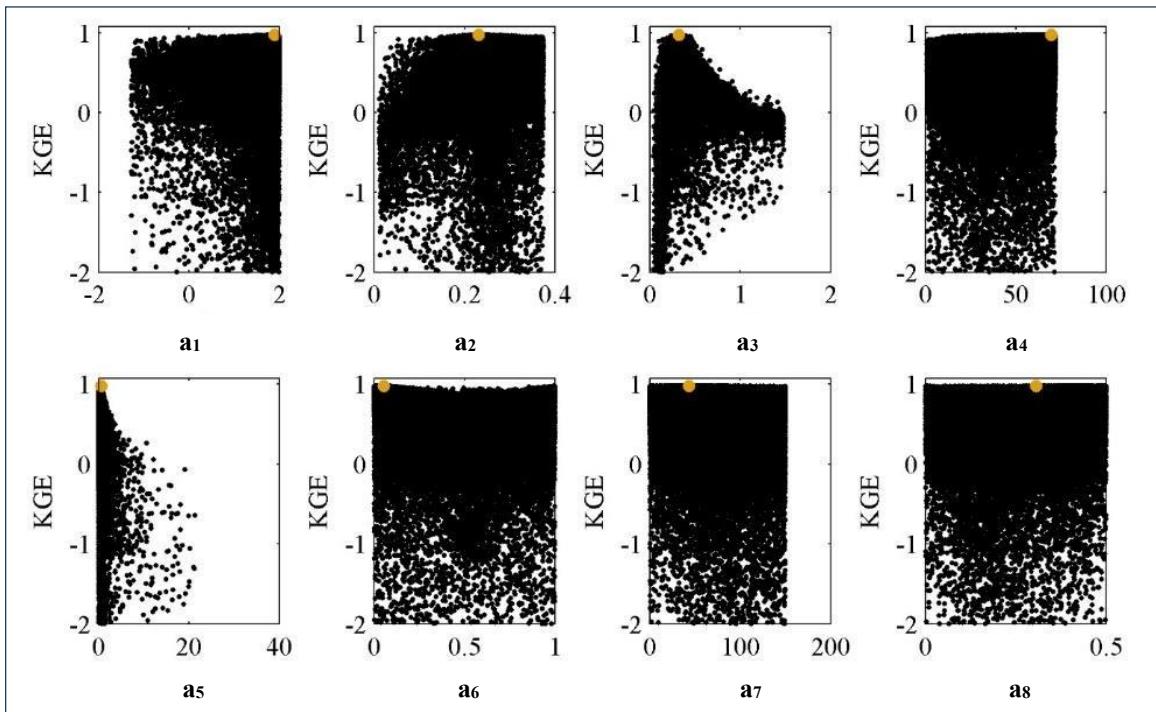


Figura 3 – Convergência de 1000 partículas da PSO na busca por valores otimizados de parâmetros.

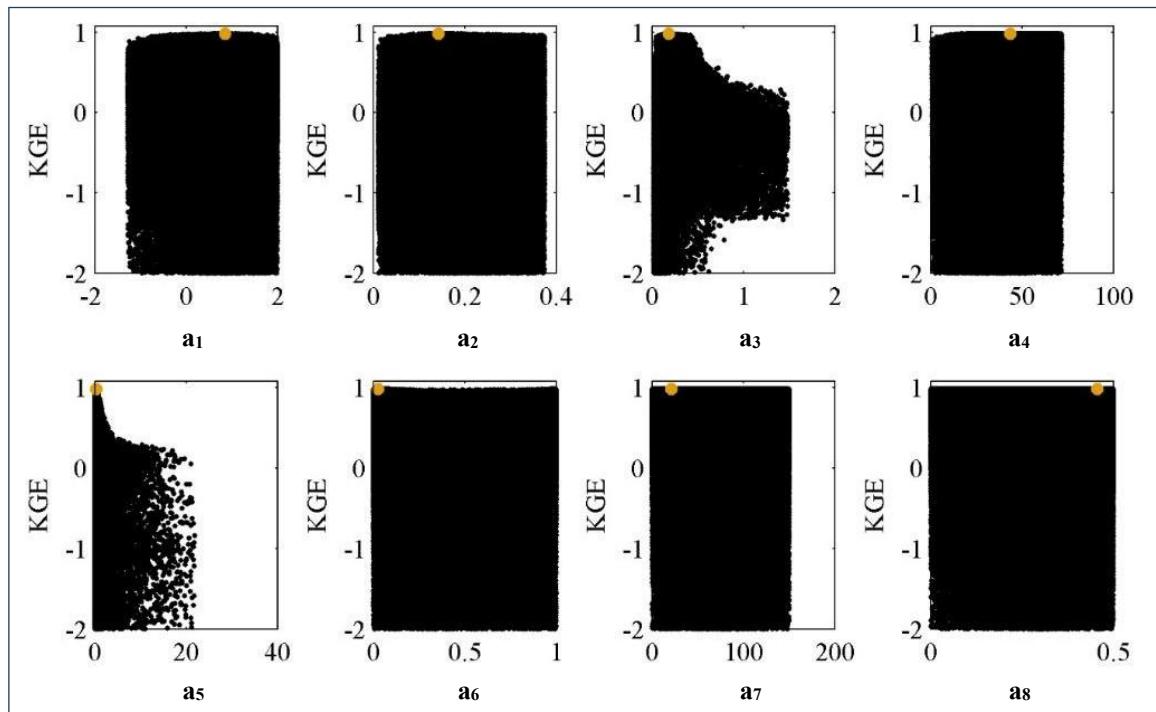


Figura 4 – Resultados do ajuste do Air2Water (versão 8 parâmetros) utilizando 100 partículas na PSO, no período de (a) calibração e (b) verificação.

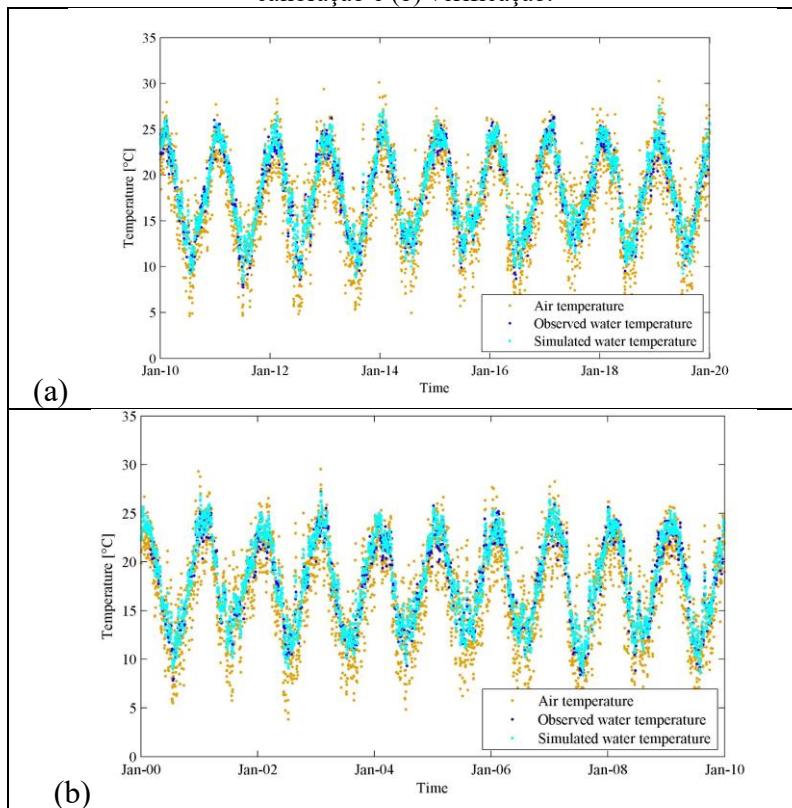
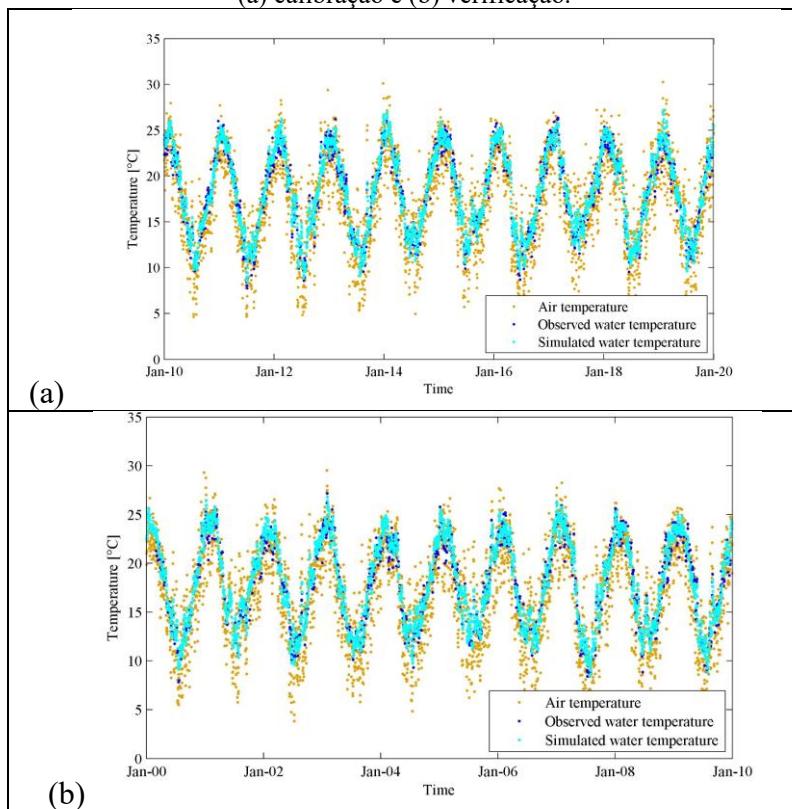


Figura 5 – Resultados do ajuste do Air2Water (versão 8 parâmetros) utilizando 1000 partículas na PSO, no período de (a) calibração e (b) verificação.



CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi realizado no presente estudo o ajuste do modelo Air2Water à Lagoa Mangueira a fim de se obter estimativas da temperatura superficial da água, por meio de diferentes versões do modelo. Além disso, foi avaliado o impacto no ajuste, de utilizar a métrica coeficiente de Kling-Gupta (KGE) como função-objetivo, e um número diferente de partículas no método de calibração automática (PSO).

As três versões do modelo resultaram em um desempenho de simulação da temperatura superficial da água excelente, com KGE superior a 0,96 e com destaque para as versões do Air2Water com 6 e 8 parâmetros que tiveram igual eficiência, apresentando KGE igual a 0,98 na etapa de calibração e KGE igual a 0,97 na etapa de validação.

Na análise da redução da quantidade de partículas de 1000 para 100, utilizadas pela PSO durante a calibração do modelo Air2Water utilizando o KGE como função-objetivo, não foram identificados impactos negativos no desempenho do ajuste do modelo em nenhuma de suas versões. O desempenho foi praticamente o mesmo. Além disso, a diminuição do número de partículas de 1000 para 100 na PSO trouxe um ganho computacional pela redução do tempo necessário para concluir o processo de calibração. O tempo de processamento da calibração diminuiu aproximadamente nove vezes com a redução do número de partículas.

Com isso, destaca-se a eficiência da representação de ecossistemas lacustres pelo modelo Air2Water, contribuindo para a área de limnologia aplicada.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelas agências de fomento FINEP, FAPERGS, CAPES e CNPq.

REFERÊNCIAS

- ADRIAN, R.; O'REILLY, ZAGARESE, B.; BAINES, S.; DAG, D.; KELLER, W.; LIVINGSTONE, D.; SOMMARUGA, R.; STRAILE, D.; DONK, G.; WINDER, M. (2009). *"Lakes as sentinels of climate change"*. Limnol. Oceanogr., 54, pp. 2283–2297.
- AYALEW, A.; WAGNER, P.; SAHLU, D.; FOHRER, N. (2024). *"Unveiling hydrological dynamics in data-scarce regions: experiences from the Ethiopian Rift Valley Lakes Basin"*. Hydrology and Earth System Sciences, 28, pp. 1853–1872.
- BASSET, A.; ELLIOTT, M.; WEST, R.J.; WILSON, J.G. (2013). *"Estuarine and Lagoon biodiversity and their natural goods and services"*. Estuar. Coast Shelf Sci., 132, pp. 1–4.
- CAVALCANTI, J.; MOTTA-MARQUESA, D.; FRAGOSO, C. (2016). *"Process-based modeling of shallow lake metabolism: Spatio-temporal variability and relative importance of individual processes"*. Ecological Modelling, 323, pp. 28–40.
- FERRARI, C. H. S.; BRAVO, J.M.; MARQUES, D. M.; RODRIGUES, L. H. R. (2023). *"Desempenho da PSO no ajuste de modelo de estimativa de temperatura superficial da água de lagos"* in Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto alegre, Nov, 2023.
- FERRARI, C.; TAVARES, M. H.; RODRIGUES, L. H. R.; MARQUES, D. M.; BRAVO, J. M. (2024). *"Desempenho da PSO no ajuste de modelo de estimativa de temperatura de água em lagoa rasa costeira subtropical"* in Anais do Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica", Curitiba, Ago. 2024.

- GILL, M.; KAHEIL, Y.; KHALIL, A.; MCKEE, M; BASTIDAS, L. (2006). “*Multiobjective particle swarm optimization for parameter estimation in hydrology*”. *Water Resources Research*, 42.
- GUO, L., ZENG, H., WU, Y., FAN, L., WEN, M., LI, J., ZHANG, B. (2022). “*An integrated dataset of daily lake surface water temperature over the Tibetan Plateau*”. *Earth System Science Data*, pp. 3411–3422.
- GUPTA, H.; KLING, H; YILMAZ, K; MARTINEZ, G. (2009). “*Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling*”. *Journal of Hydrology*, 377, pp. 80–91.
- JIA, T.; LUO, Y. (2022). “*Using Air2Water model to predict the water temperature of fuxian lake*”. *Climate Change and Environmental Sustainability*, pp. 29-35.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. (1995). “*Particle Swarm Optimization*”. Institute of Eletrical and Eletronics Engineers (IEEE), IV, pp. 1942-1948.
- MAJONE, B.; BERTAGNOLI, A.; BELLIN, A. (2010). “*A non-linear runoff generation model in small Alpine catchments*”. *Journal of Hydrology*, 385, pp. 300–312.
- PATIL, S.; STIEGLITZ, M. (2015). “*Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters*”. *Journal of Hydrology*, 525, pp. 409–417.
- PICCOLROAZ, S.; TOFFOLON, M.; MAJONE, B. (2013). “*A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes*”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, pp. 3323–3338.
- PICCOLROAZ, S.; ZHU, S.; LADWIG, R.; CARREA, L.; OLIVER, S.; PIOTROWSKI, A; PTAK, M.; SHINOHARA, R.; SOJKA, M.; WOOLWAY, R.; Zhu, D. (2024). “*Lake water temperature modeling in an Era of climate change: Data sources, models, and future prospects*”. *Reviews of Geophysics*, 62.
- PIOTROWSKI, A. P.; ZHU, S.; NAPIORKOWSKI, J. J. (2022). “*Air2water model with nine parameters for lake surface*”. *Limnologica*, 94.
- PIOTROWSKI, A. P.; NAPIORKOWSKI, J. J.; ZHU, S. (2023). “*Novel Air2water Model Variant for Lake Surface Temperature Modeling With Detailed Analysis of Calibration Methods*”. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16, pp. 553-569.
- PRATS, J.; DANIS, P. (2019). “*An epilimnion and hypolimnion temperature model based on air temperature and lake characteristics*”. *Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst.*, 2019, 420 (8).
- TOFFOLON, M.; PICCOLROAZ, S.; MAJONE, B.; SOJA, A.-M.; PEETERS, F.; SCHMID, M.; WÜEST, A. (2014). “*Prediction of surface temperature in lakes with different morphology using air temperature*”. *Limnology Oceanography*, 59(6), pp. 2185-2202.
- TAVARES, M., FARIAS, A., MARQUES, D., & RUHOFF, A. (2019). “*Estimativa da temperatura superficial da água por sensores remotos: acurácia e aplicabilidade com modelos de temperatura*”. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- TEJADAS, B. E.; BRAVO, J. M.; SANAGIOTTO, D. G.; TASSI, R.; MARQUES, D. M. L. (2016). “*Projeções de vazão afluente à lagoa mangueira com base em cenários de mudanças climáticas*”. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(3), pp. 262-272.
- WANG, W.; SHI, K.; WANG, X.; ZHANG, Y.; QIN, B.; ZHANG, Y.; WOOLWAY, R. (2024). “*The impact of extreme heat on lake warming in China*”. *Nature communications*.
- ZHU, S., PTAK, M., YASEEND, Z. M., DAIA, J., SIVAKUMARE, B. (2020). “*Forecasting surface water temperature in lakes: A comparison of approaches*”. *Journal of Hydrology*, 585.