

Desestratificação de reservatórios por meio de aeração artificial

Reservoir destratification via artificial aeration

Iran Eduardo Lima Neto^{1*} 

RESUMO

No presente trabalho, avaliou-se em escala de laboratório e por meio de modelagem matemática o processo de desestratificação da coluna d'água usando aeração por ar difuso. Foram identificados dois padrões de escoamento: um regime de pluma, no qual o escoamento induzido pelas bolhas penetra na interface entre as duas camadas de diferentes densidades e ascende à superfície da água; e um regime de fonte, no qual o escoamento penetra parcialmente na interface e colapsa para formar uma camada de densidade intermediária. Os resultados experimentais mostraram que o regime de pluma promove mistura mais rápida da camada superior (epilímnio) do que o regime de fonte. Os tempos de mistura da camada inferior (hipolímnio), entretanto, foram praticamente os mesmos para os dois regimes. Após o ajuste de parâmetros do modelo que descreve a incorporação do fluido ambiente na pluma e na fonte, pôde-se simular o processo de desestratificação da coluna d'água com boa aderência aos dados experimentais obtidos nesta pesquisa e em trabalhos anteriores. Por fim, o modelo validado foi aplicado para a simulação do impacto de diferentes vazões de ar na evolução temporal do processo de desestratificação de reservatórios (escala real), sendo discutidos os custos com energia elétrica para bombeamento e as possíveis implicações na qualidade da água desses corpos hídricos.

Palavras-chave: bolhas; plumas; fontes; estratificação; modelagem matemática; qualidade da água.

ABSTRACT

In the present work, the destratification process of water column using diffused-aeration was evaluated at laboratorial scale by mathematical modelling. Two flow patterns were identified, a plume regime, in which the bubble-induced flow penetrates the interface (density gradient) and rises to the water surface, and a fountain regime, in which the flow partially penetrates the interface and collapses to form an intermediate-density layer. The experimental results showed that the plume regime promotes a faster mixing of the upper layer (epilimnion) than the fountain regime. However, the mixing times of the lower layer (hypolimnion) were practically the same for both regimes. After adjusting the parameters that describe the entrainment of the ambient fluid into the plume and fountain, it was possible to simulate the process of water column destratification with good adherence to the experimental data obtained in this research and previous studies. Finally, the validated model was applied to simulate the impact of different airflow rates on the reservoir destratification process' (real scale) time evolution, and the possible implications for the water quality of these water bodies were discussed.

Keywords: bubbles; plumes; fountains; stratification; mathematical modelling; water quality.

INTRODUÇÃO

Corpos hídricos lênticos como lagos e reservatórios normalmente apresentam estratificação da coluna d'água, em virtude da variação vertical na temperatura da água e, conseqüentemente, da sua densidade (FERREIRA & CUNHA, 2013). Conforme esquematizado na Figura 1, essa estratificação resulta na formação de duas camadas (epilímnio e hipolímnio), as quais são separadas por uma interface delgada, com forte gradiente de densidade, chamada de termoclina (ou metalímnio). Enquanto o epilímnio, que apresenta massa específica ρ_e , é bem misturado e oxigenado, o hipolímnio, que apresenta massa específica $\rho_h > \rho_e$, é

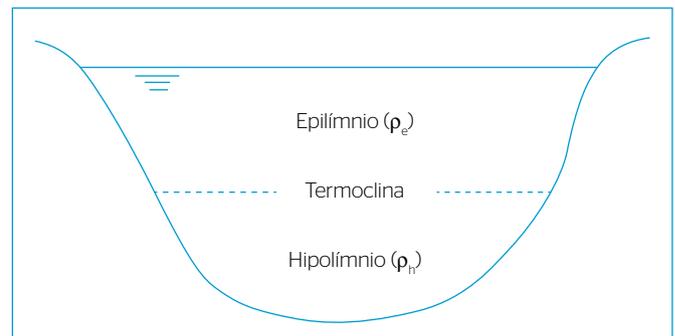


Figura 1 - Estratificação da coluna d'água em corpos hídricos lênticos.

¹Universidade Federal do Ceará - Fortaleza (CE), Brasil.

*Autor correspondente: iran@deha.ufc.br

Recebido: 22/08/2017 - Aceito: 26/01/2018 - Reg. ABES: 184389

estagnado e pouco oxigenado. Em consequência disso, a estratificação da coluna de água pode influenciar significativamente na qualidade da água de lagos e reservatórios, provocando, muitas vezes, ausência de oxigênio dissolvido no hipolímnio. Conforme relatado por Von Sperling (1996), os problemas resultantes dessa anaerobiose no hipolímnio são:

- solubilização do ferro e do manganês, impactando o abastecimento de água;
- solubilização do fósforo, criando uma fonte interna desse nutriente para as algas;
- produção de gás sulfídrico, proporcionando toxicidade à água e geração de maus odores.

A desestratificação de lagos e reservatórios via aeração artificial é uma das medidas corretivas mais utilizadas para melhorar a qualidade da água desses ecossistemas lênticos (WÜEST; BROOKS; IMBODEN, 1992; IMTEAZ & ASAEDA, 2000; ANTENUCCI *et al.*, 2005; LIMA & LIMA NETO, 2018.). Essa técnica consiste em injetar elevadas vazões de ar no fundo desses corpos hídricos para induzir padrões de circulação capazes de quebrar a estratificação da coluna d'água e limitar a disponibilidade de luz e nutrientes para as algas. Com isso, busca-se minimizar florações indesejadas ou, pelo menos, reduzir a participação de cianobactérias em outros tipos de algas presentes no meio (VISSER *et al.*, 2016). Alternativamente, também tem sido utilizada a técnica de aeração ou oxigenação do hipolímnio, que consiste na injeção de vazões relativamente baixas de ar ou oxigênio apenas para reduzir a liberação de fósforo do sedimento e inibir o crescimento de algas, sem necessariamente quebrar a estratificação térmica (SOLTERO *et al.*, 1994;

SINGLETON & LITTLE, 2006; BORMANS; MARŠÁLEK; JANČULA, 2016). Recentemente, Toné, Pacheco e Lima Neto (2017) e Pacheco e Lima Neto (2017) observaram que a circulação e a turbulência geradas por aeração artificial também promovem o decaimento de algas, mesmo em lagos rasos não estratificados. Experimentos realizados por Lima Neto (2010; 2013; 2015) descrevem detalhadamente os padrões de oxigenação e circulação turbulenta induzidos por aeração artificial em tanques de água.

Na escala de laboratório, a desestratificação de tanques por meio de aeração artificial tem sido investigada por diversos autores (SOCOLOFSKY & REHMANN, 2012), no entanto o número de estudos com foco em estratificação de duas camadas, como normalmente observado em lagos e reservatórios (Figura 1), é limitado. Baines e Leitch (1992) e Zic, Stefan e Ellis (1992) observaram a evolução temporal do processo de desestratificação via aeração por ar difuso em tanques com diferentes geometrias e condições experimentais, porém nenhum modelo matemático foi fornecido para descrever os processos observados. Chen e Cardoso (2000) utilizaram microbolhas geradas por eletrólise e desenvolveram um modelo matemático para simular a evolução temporal dos perfis de densidade da água. Kim *et al.* (2010), por sua vez, ajustaram equações empíricas aos seus dados experimentais para prever a eficiência de desestratificação dos tanques. Por outro lado, Lima Neto, Cardoso e Woods (2016) identificaram dois padrões de mistura quando a pluma de bolhas atinge a interface (ou termoclina):

- regime de pluma, em que a massa específica da pluma na interface ρ_i é inferior à massa específica da água na camada superior (ρ_e), resultando em duas frentes de escoamento descendentes (Figura 2A);

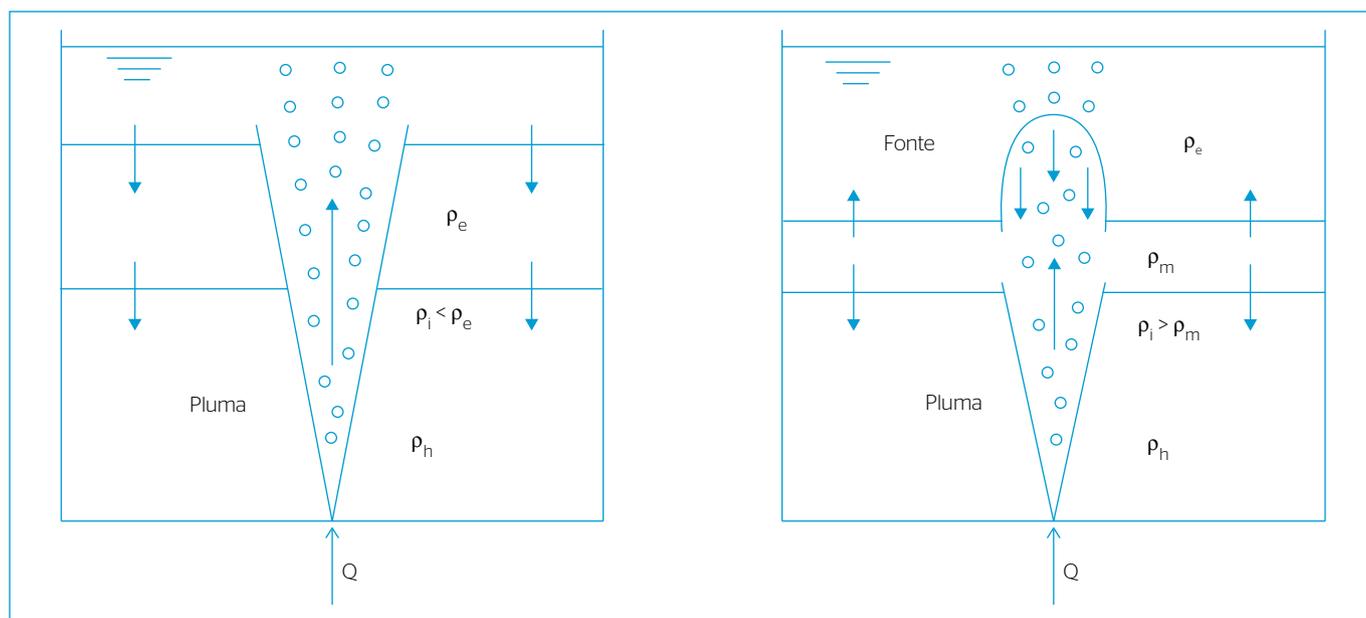


Figura 2 - Pluma de bolhas em ambiente com estratificação de duas camadas ($\rho_h > \rho_e$): (A) regime de pluma, resultando em duas frentes de escoamento descendentes; (B) regime de fonte, resultando em uma frente de escoamento ascendente e outra descendente, bem como na formação de uma camada intermediária com massa específica ρ_m .

- regime de fonte, em que a massa específica da pluma na interface ρ_i é superior à massa específica da água na camada superior (ρ_e), resultando no colapso do escoamento (formação de uma fonte) acima da interface, bem como na formação de duas frentes de escoamento: uma ascendente e outra descendente (Figura 2B). Em virtude disso, forma-se uma camada intermediária com massa específica ρ_m , que aumenta sua espessura à medida que o processo de desestratificação avança no tempo.

Os estudos de Baines e Leitch (1992), Zic, Stefan e Ellis (1992), Chen e Cardoso (2000) e Kim *et al.* (2010) foram todos limitados ao regime de fonte, enquanto o estudo de Lima Neto, Cardoso e Woods (2016) analisou os momentos iniciais de formação da pluma ou da fonte na interface, sem explorar os processos de desestratificação da coluna d'água.

A presente pesquisa foi realizada no mesmo aparato experimental de Lima Neto, Cardoso e Woods (2016), entretanto os padrões de escoamento foram avaliados até atingir a desestratificação completa da coluna d'água. Além disso, foram consideradas novas condições de vazão de ar e novos contrastes de densidade entre as camadas inferior e superior. O objetivo do trabalho foi obter um modelo matemático geral que pudesse descrever o processo de desestratificação da água para ambos os regimes identificados (pluma e fonte) e ser aplicado a casos práticos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de laboratório foram realizados em um tanque quadrado com lado de 40 cm e altura de 50 cm, equipado com um sistema de iluminação de fundo (painel translúcido) para aumentar o contraste entre as cores e permitir melhor visualização dos padrões de escoamento. Esses experimentos foram conduzidos no BP Institute da Universidade de Cambridge, e a temperatura ambiente do laboratório foi mantida a 20°C.

Para o processo de calibração, o tanque foi preenchido com água até a altura de 40 cm. Em seguida, foram adicionadas e misturadas à água diferentes quantidades de corante vermelho, sendo as imagens capturadas por uma câmera de alta resolução. Utilizou-se o MATLAB para gerar curvas de calibração para cada *pixel*, relacionando a intensidade da cor vermelha com a concentração de corante na água.

Para a realização dos experimentos, o tanque foi preenchido até a altura de 20 cm com soluções salinas de diferentes massas específicas ρ_h . Em seguida, adicionou-se e misturou-se o corante vermelho à solução salina. Posteriormente, adicionou-se água fresca com massa específica ρ_e até a altura de 40 cm por meio de um difusor de fluxo flutuante, com o intuito de gerar estratificações de duas camadas ($\rho_h > \rho_e$), conforme mostrado esquematicamente na Figura 3. Assim, a concentração máxima do corante ficou relacionada à massa específica da solução salina na camada inferior (ρ_h), enquanto a concentração nula se relacionou à

massa específica da água na camada superior (ρ_e). Utilizou-se uma bomba peristáltica para fornecer diferentes vazões de ar (Q) ao tanque, as quais foram medidas por um rotâmetro. O ar foi injetado no fundo do tanque por meio de um difusor poroso, gerando bolhas com diâmetros de aproximadamente 1 a 4 mm. A câmera de alta resolução foi novamente utilizada para capturar as imagens do escoamento gerado ao longo do processo de desestratificação da coluna d'água, as quais foram processadas em ambiente MATLAB. Isso permitiu realizar um mapeamento espaço-temporal dos padrões de densidade da água para cada condição experimental mostrada na Tabela 1.

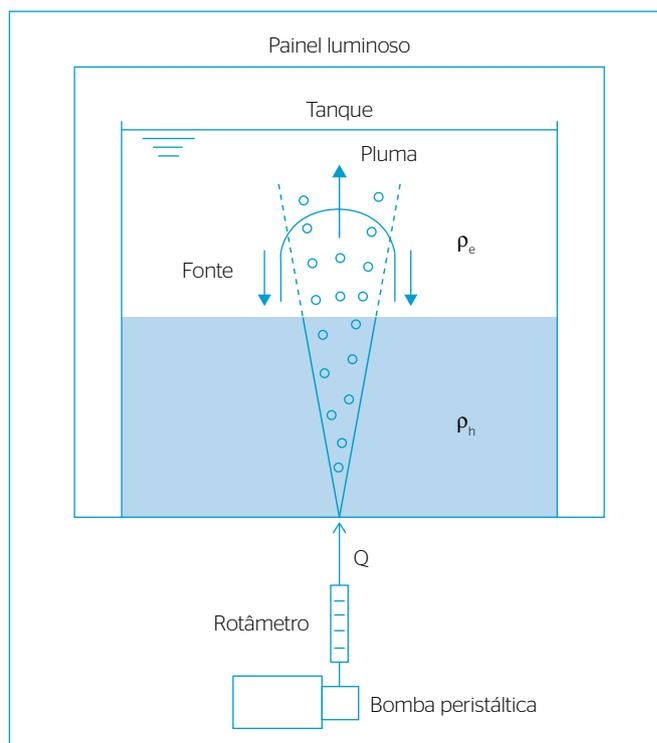


Figura 3 - Esquema experimental para avaliação do processo de desestratificação da coluna d'água ($\rho_h > \rho_e$) por meio de aeração artificial. Ambos os regimes (pluma e fonte) foram avaliados.

Tabela 1 - Condições experimentais adotadas no presente estudo. Consideraram-se massa específica do ar $\rho_{ar} = 1,2 \text{ kg/m}^3$ e massa específica da água fresca $\rho_e = 998,2 \text{ kg/m}^3$.

Exp.	$Q \text{ (cm}^3/\text{s)}$	$\rho_h \text{ (kg/m}^3)$	Regime
1	5	1.001,7	Pluma
2	5	1.012,5	Fonte
3	10	1.001,7	Pluma
4	10	1.026,8	Fonte
5	20	1.008,9	Pluma
6	20	1.034,0	Fonte
7	35	1.012,5	Pluma
8	35	1.041,2	Fonte

Os modelos integrais de Lima Neto (2012) e Lima Neto, Cardoso e Woods (2016) foram utilizados como base para simular o processo de desestratificação da coluna d'água para cada condição experimental.

Considerando perfis uniformes de velocidade e densidade dentro da pluma (Figura 2A), o modelo integral de Lima Neto (2012) pode ser reescrito da seguinte forma (Equações 1 e 2):

$$\frac{d}{dz}(ub^2) = 2\alpha ub \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz}(u^2b^2) = \frac{\rho_a - \rho}{\rho_a} gb^2\lambda^2 \quad (2)$$

A Equação 1 representa o princípio de conservação de massa ao longo da coordenada vertical z , sendo u e b a velocidade e a largura da pluma, respectivamente, e α o coeficiente de entrada turbulenta, cujo valor é da ordem de 0,1 (WOODS, 2010). A Equação 2 representa o princípio da conservação de quantidade de movimento, sendo ρ_a e ρ_p as massas específicas da água ambiente ($\rho_a = \rho_h$) e da mistura de água e bolhas de ar dentro da pluma, respectivamente, e λ a fração da largura da pluma ocupada pelas bolhas, considerada igual a 0,8 (LIMA NETO, 2012). Assim, caso a massa específica da pluma na interface seja inferior à massa específica da água na camada superior ($\rho_i < \rho_e$), será formada uma nova pluma (Figura 2A). Logo, as Equações 1 e 2 devem ser novamente utilizadas, porém considerando $\rho_a = \rho_e$. Desse modo, podem-se utilizar as Equações 3 e 4 para avaliar a evolução temporal das duas frentes de escoamento descendentes:

$$A \frac{dz_e}{dt} = -Q_s \quad (3)$$

$$A \frac{dz_h}{dt} = -Q_i \quad (4)$$

Em que:

A = área transversal do tanque;

dz_e/dt e dz_h/dt = velocidades das frentes descendentes nas camadas superior (epilímnio) e inferior (hipolímnio), respectivamente;

Q_s e Q_i = vazões da pluma na superfície da água e na interface, respectivamente.

Nota-se que $Q_s = \pi u_s b_s^2$ e $Q_i = \pi u_i b_i^2$.

Caso a massa específica da pluma na interface seja superior à massa específica da água na camada superior ($\rho_i > \rho_e$), ocorrerá colapso do escoamento, formando-se uma fonte (Figura 2B). Nesse caso, a vazão da fonte na interface poderá ser quantificada pela Equação 5:

$$Q_f = \beta Fr_i^2 Q_i \quad (5)$$

Em que:

β = aproximadamente 0,05;

Fr_i = número de Froude densimétrico na interface dado pela Equação 6 (LIMA NETO; CARDOSO; WOODS, 2016):

$$Fr_i = \frac{u_i}{\sqrt{b_i g (\rho_h - \rho_e) / \rho_h}} \quad (6)$$

Assim, pode-se utilizar a Equação 7 para avaliar a evolução temporal da frente de escoamento ascendente:

$$A \frac{dz_e}{dt} = Q_f \quad (7)$$

A evolução temporal da frente de escoamento descendente (Figura 2B) também pode ser avaliada pela Equação 4, como no regime de pluma.

Por fim, o modelo proposto foi codificado em MATLAB e os resultados das simulações foram comparados aos dados experimentais. Após a realização de ajustes e a validação do modelo, o mesmo foi aplicado a um problema prático: avaliação do impacto de diferentes vazões de ar no processo de desestratificação de um reservatório em escala real.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 mostra a evolução temporal em intervalos de 10 s do processo de desestratificação do tanque, considerando os dois regimes de escoamentos observados:

- regime de pluma (Exp. 1);
- regime de fonte (Exp. 2).

Para cada regime, as imagens superiores indicam as fotografias obtidas pela câmera de alta resolução, enquanto as imagens inferiores representam os campos de densidade processados em MATLAB. No regime de pluma (Figura 4A), verifica-se mistura completa da

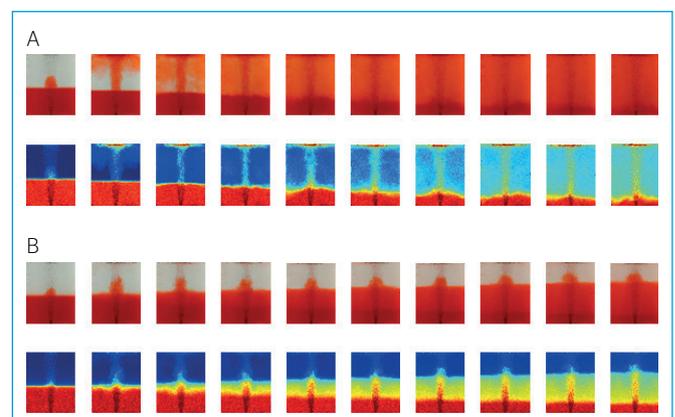


Figura 4 – Imagens e seus respectivos campos de densidade observados a cada 10 s: (A) regime de pluma (Exp. 1); (B) regime de fonte (Exp. 2).

camada superior em aproximadamente 30 s, enquanto a camada inferior foi completamente desestratificada somente após 100 s do início do experimento. Já no regime de fonte (Figura 4B), o processo de mistura da camada superior foi bem mais lento do que no regime de pluma, enquanto a desestratificação da camada inferior ocorreu na mesma escala de tempo para os dois regimes. Ressalta-se que padrões semelhantes de escoamento foram observados para as demais condições experimentais apresentadas na Tabela 1. Nota-se que o processo de desestratificação via aeração artificial mostrado na Figura 4A não havia sido reportado anteriormente na literatura. Os resultados apresentados na Figura 4B, contudo, são consistentes com aqueles observados por Baines e Leitch (1992), Zic, Stefan e Ellis (1992) e Chen e Cardoso (2000). Vale salientar, no entanto, que os tempos de mistura das camadas inferior e superior diferiram significativamente para as diferentes condições experimentais adotadas em cada estudo.

O modelo matemático representado pelas Equações 1 a 7 foi comparado aos resultados obtidos para cada condição experimental, apresentados na Tabela 1. Verificou-se que o uso de um coeficiente de entrada turbulenta $\alpha=0,1$ forneceu tempos de mistura da camada inferior muito próximos daqueles observados experimentalmente. O valor de $\beta=0,05$ proposto por Lima Neto, Cardoso e Woods (2016), no entanto, forneceu tempos de mistura da camada superior muito menores do que os obtidos nos experimentos. De fato, observou-se que esse valor somente é válido nos momentos iniciais após a pluma atingir a interface. Posteriormente, o parâmetro β reduz-se a valores da ordem de 0,01. Pode-se afirmar que isso ocorre, principalmente, porque a fonte diminui sua altura ao longo do tempo e passa a estar confinada à superfície da água (Figura 4B), restringindo-se, assim, sua capacidade de incorporar o líquido da camada superior. Após diversas simulações do modelo considerando diferentes valores para o parâmetro β , conclui-se que $\beta=0,02$ é o valor mais apropriado para simular o processo de desestratificação completa da camada superior para as condições experimentais observadas no presente trabalho. A Figura 5 mostra a comparação entre os resultados obtidos com o modelo proposto e a partir dos experimentos, considerando novamente os dois regimes de escoamento:

- regime de pluma (Exp. 3);
- regime de fonte (Exp. 4).

Observa-se boa aderência do modelo aos perfis de densidade da água, o que indica que os valores de $\alpha=0,1$ e $\beta=0,02$ são adequados para a simulação da evolução temporal do processo de desestratificação da coluna d'água para ambos os regimes estudados (pluma e fonte).

A Figura 6 mostra a comparação entre os valores medidos e modelados dos tempos de mistura obtidos para as camadas inferior e superior,

para diferentes condições experimentais, incluindo os dados de Baines e Leitch (1992) e Zic, Stefan e Ellis (1992). Observa-se, novamente, boa aderência do modelo aos dados experimentais, o que corrobora a ideia de que o modelo proposto, juntamente com os coeficientes ajustados ($\alpha=0,1$ e $\beta=0,02$), pode ser usado para simular o processo de desestratificação da coluna d'água via aeração artificial. Vale ressaltar que

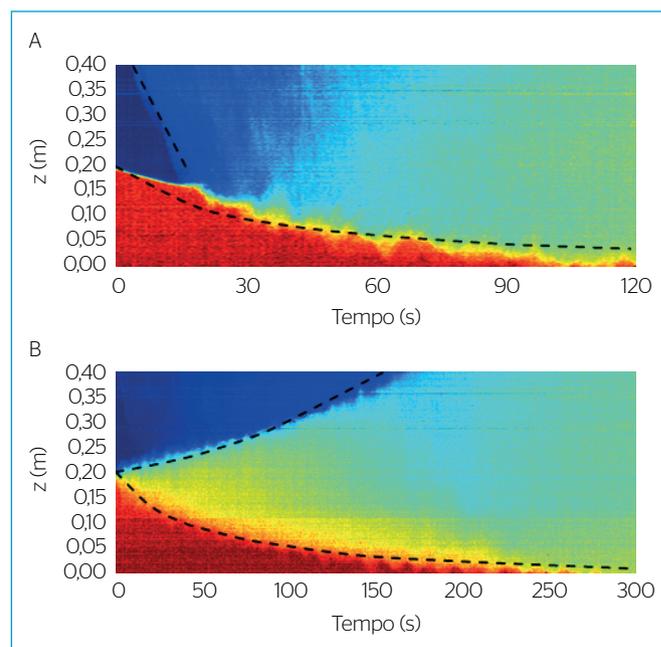


Figura 5 - Comparação entre os resultados obtidos com o modelo proposto (linhas tracejadas) e com os experimentos (campos de densidade em escala de cores) para ambos os regimes de escoamento: (A) regime de pluma (Exp. 3); (B) regime de fonte (Exp. 4).

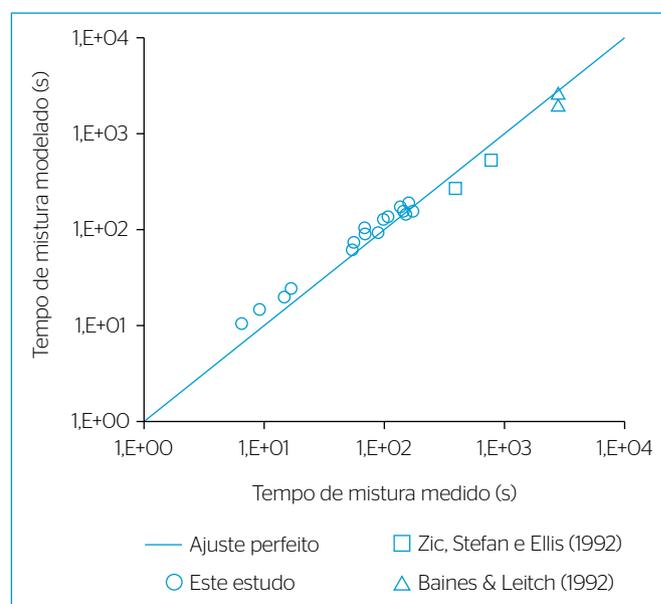


Figura 6 - Aderência do modelo proposto aos dados obtidos neste estudo e na literatura sob diferentes condições experimentais.

os estudos de Baines e Leitch (1992) e Zic, Stefan e Ellis (1992) foram limitados ao regime de fonte e não apresentaram modelos matemáticos para prever os processos observados. Por outro lado, o modelo de Chen e Cardoso (2000) reproduziu relativamente bem o processo de desestratificação da camada inferior, mas não foi capaz de prever o tempo de mistura da camada superior. Isso ocorreu, provavelmente, por dois motivos: Chen e Cardoso (2000) utilizaram microbolhas com diâmetro de 0,15 mm, as quais eram bem menores do que as utilizadas no presente estudo (1 a 4 mm), resultando em diferentes impactos nas fontes geradas; e o número de Froude densimétrico por elas adotado foi relativamente baixo ($Fr_i \gg 1$) em comparação aos deste trabalho ($2 < Fr_i < 7$). Os resultados obtidos também não puderam ser comparados aos dados fornecidos por Kim et al. (2010), uma vez que o referido estudo se baseou na obtenção de relações empíricas para prever a eficiência de desestratificação de reservatórios, e não na evolução temporal do processo.

Após a validação do modelo considerando os coeficientes ajustados ($\alpha=0,1$ e $\beta=0,02$), pôde-se aplicá-lo a problemas práticos. A Figura 7 mostra como exemplo uma avaliação do impacto de diferentes vazões de ar ($Q=1, 10$ e 100 L/s) no processo de desestratificação do reservatório Banabuiú/CE, com profundidade máxima de aproximadamente 50 m, considerando-se a altura inicial da termoclina de 25 m e a diferença de massa específica entre as camadas inferior e superior ($\rho_h - \rho_e$) de $2,5 \text{ kg/m}^3$.

Na presente aplicação, adota-se um sistema de aeração composto de compressores, tubulações e uma matriz quadrada de 100 difusores pontuais com espaçamento (raio de ação) entre plumas adjacentes de 50 m, instalada na porção mais profunda do reservatório.

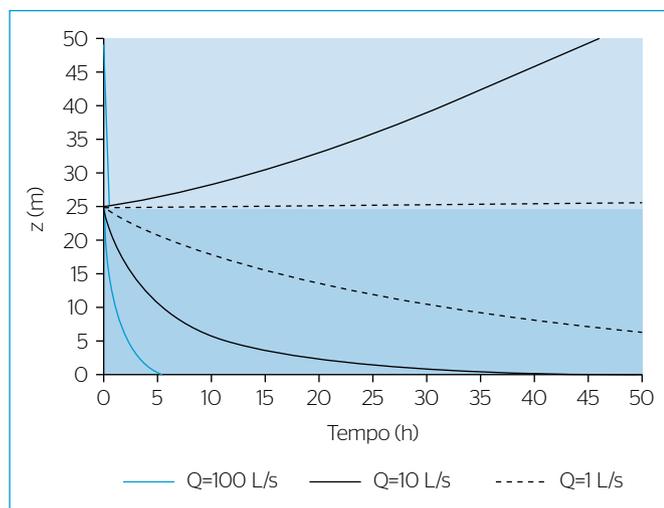


Figura 7 – Simulação do impacto de diferentes vazões de ar ($Q=1,10$ e 100 L/s) no processo de desestratificação de um reservatório com profundidade de 50 m, sendo a altura inicial da termoclina de 25 m e a diferença de massa específica entre as camadas inferior e superior ($\rho_h - \rho_e$) de $2,5 \text{ kg/m}^3$.

Os resultados indicam que a vazão de 100 L/s seria capaz de gerar um regime de pluma no reservatório, sendo os tempos de mistura completa das camadas superior e inferior de cerca de 1 e 5 h, respectivamente. Reduzindo-se essa vazão para 10 L/s , porém, o regime passaria a ser do tipo fonte, com tempos de mistura completa das camadas superior e inferior de 45 e 50 h, respectivamente. Finalmente, reduzindo-se a vazão para 1 L/s , a mistura completa da camada inferior ocorreria na escala de uma semana, enquanto a mistura completa da camada superior ocorreria na escala de meses. Desse modo, a maior vazão (100 L/s) poderia ser utilizada para a desestratificação rápida do reservatório, promovendo a movimentação das águas superficiais (oxigenadas) para as camadas inferiores, bem como a redução das populações de algas/cianobactérias por meio da limitação da disponibilidade de luz e nutrientes, conforme relatado por Imteaz e Asaeda (2000), Antenucci et al. (2005), Visser et al. (2016), Toné, Pacheco e Lima Neto (2017) e Pacheco e Lima Neto (2017).

Cuidados deverão ser tomados, no entanto, para evitar a ressuspensão de sedimentos e nutrientes depositados no fundo do reservatório, o que poderia provocar a degradação da qualidade da água. Já a vazão intermediária (10 L/s) poderia ser utilizada quando não houvesse necessidade de desestratificação rápida da coluna d'água nem de deslocamento das massas de águas superficiais para as camadas mais profundas. Os resultados seriam os mesmos esperados para a vazão de 100 L/s , porém os efeitos seriam sentidos em uma escala de tempo cerca de dez vezes maior. Por fim, a menor vazão (1 L/s) seria mais adequada para a técnica de aeração (ou oxigenação) do hipolimnio, buscando-se impedir ou reduzir a liberação de fósforo do sedimento e inibir o crescimento de algas/cianobactérias, sem interferir significativamente nos padrões de estratificação, conforme descrito por Soltero et al. (1994), Singleton e Little (2006) e Bormans, Maršálek e Jančula (2016).

Ressalta-se que essa condição de baixa vazão também serviria para promover melhor circulação na camada inferior, podendo impactar positivamente a qualidade da água do hipolimnio. Por fim, utilizando-se as metodologias descritas por Mueller, Boyle e Pöpel (2002), podem-se estimar os gastos com energia elétrica para a desestratificação do referido reservatório, considerando-se, por exemplo, as vazões Q de 10 e 100 L/s . Os resultados fornecem potências elétricas de cerca de 700 e 7.000 kW , respectivamente. Vale destacar, porém, que a maior vazão fornece tempo total de desestratificação de cerca de 5 h, ou seja, dez vezes menor do que o tempo necessário com a menor vazão (50 h). Logo, considerando uma tarifa rural de $0,2 \text{ R\$/kWh}$, obtém-se um valor da ordem de $\text{R\$ } 7$ mil para a desestratificação do reservatório em ambos os casos. O que definiria, portanto, a vazão a ser adotada seria a necessidade de desestratificação rápida ou lenta do reservatório, em função de suas demandas de qualidade da água.

CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, avaliou-se a evolução temporal do processo de desestratificação da coluna d'água via aeração artificial em um tanque de laboratório e por meio de modelagem integral. Foram identificados dois padrões de escoamento: regime de pluma e regime de fonte. Os resultados experimentais mostraram que, para uma mesma vazão de ar, o regime de pluma acarretou tempo de mistura da camada superior (epilímnio) bem mais curto do que o regime de fonte. Os tempos de mistura da camada inferior (hipolímnio), entretanto, foram praticamente os mesmos para os dois regimes. Após o ajuste de parâmetros do modelo integral ($\alpha=0,1$ e $\beta=0,02$), pôde-se simular o processo de desestratificação da coluna d'água com boa aderência aos dados observados na presente pesquisa e em estudos anteriores. Finalmente, mostrou-se uma aplicação prática do modelo proposto a um reservatório real com 50 m de profundidade, o que indicou que elevadas vazões de ar por pluma (10–100 L/s) podem ser usadas para o deslocamento das águas superficiais para as camadas inferiores, resultando em desestratificação relativamente rápida da coluna d'água e, potencialmente, em melhoria da qualidade da água em geral. Por outro lado, baixas vazões (1 L/s) podem ser usadas para aeração ou oxigenação do hipolímnio, sem interferir significativamente nos padrões de estratificação. Uma análise

econômica simplificada mostrou também que os gastos com energia elétrica para a desestratificação do reservatório seriam da ordem de R\$ 7 mil, independentemente da vazão adotada, e que menores vazões resultam, no entanto, em maiores tempos de bombeamento. Logo, o que definiria a magnitude da vazão a ser adotada seria a necessidade de desestratificação rápida ou lenta do corpo hídrico, em função de suas demandas de qualidade da água.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — CNPq (Processo 203260/2014-7) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico — FUNCAP (Processo PNE-0112-00042.01.00/16) pelo apoio financeiro para a realização do presente trabalho, bem como aos professores Andrew W. Woods e Silvana S. S. Cardoso pela disponibilização dos laboratórios da Universidade de Cambridge.

FONTE DE FINANCIAMENTO

CNPq.

REFERÊNCIAS

- ANTENUCCI, J.P.; GHADOUANI, A.; BURFORD, M.A.; ROMERO, J.R. (2005) The long-term effect of artificial destratification on phytoplankton species composition in a subtropical reservoir. *Freshwater Biology*, v. 50, n. 6, p. 1081-1093. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01374.x>
- BAINES, W.; LEITCH, A. (1992) Destruction of stratification by a bubble plume. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 118, n. 4, p. 559-577. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:4\(559\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:4(559))
- BORMANS, M.; MARŠÁLEK, B.; JANČULA, D. (2016) Controlling internal phosphorus loading in lakes by physical methods to reduce cyanobacterial blooms: a review. *Aquatic Ecology*, v. 50, n. 3, p. 407-422. <https://doi.org/10.1007/s10452-015-9564-x>
- CHEN, M. H.; CARDOSO, S. S. S. (2000) The mixing of liquids by low Reynolds number plumes. *Chemical Engineering Science*, v. 55, n. 14, p. 2585-2594. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00531-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00531-X)
- FERREIRA, D. M.; CUNHA, C. (2013) Simulação numérica do comportamento térmico do reservatório do Rio Verde. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 1, p. 83-93. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522013000100010>
- IMTEAZ, M. A.; ASAEDA, T. (2000) Artificial mixing of lake water by bubble plume and effects of bubbling operations on algal bloom. *Water Research*, v. 34, n. 6, p. 1919-1929. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00341-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00341-3)
- KIM, S.; KIM, J.; PARK, H.; PARK, N. (2010) Effects of bubble size and diffusing area on destratification efficiency in bubble plumes of two layer stratification. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 136, n. 2, p. 106-115. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000152](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000152)
- LIMA, D. D.; LIMA NETO, I. E. Effect of Nozzle Design on Bubbly Jet Entrainment and Oxygen Transfer Efficiency. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 144, n. 8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001493](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001493)
- LIMA NETO, I. E. (2010) Turbulência induzida por jatos bifásicos do tipo gás-líquido em tanques de aeração. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, n. 1, p. 75-82. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522010000100009>
- _____. (2012) Bubble plume modelling with new functional relationships. *Journal of Hydraulic Research*, v. 50, n. 1, p. 134-137. <https://doi.org/10.1080/OO221686.2011.651278>
- _____. (2013) Transferência de massa em sistemas de aeração por jatos bifásicos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 1, p. 9-14. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522013000100002>

- _____. (2015) Tamanho de bolhas de ar formadas por difusores não porosos na água. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 2, p. 175-180. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522015020000119054>
- LIMA NETO, I.E.; CARDOSO, S.S.S.; WOODS, A.W. (2016) On mixing a density interface by a bubble plume. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 802, R3. <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.454>
- MUELLER, J.A.; BOYLE, W.C.; PÖPEL, H.J. (2002) *Aeration: Principles and Practice*. Boca Raton: CRC Press.
- PACHECO, C.H.A.; LIMA NETO, I.E. (2017) Effect of artificial circulation on the removal kinetics of cyanobacteria in a hyper-eutrophic shallow lake. *Journal of Environmental Engineering*, v. 143, n. 12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001289](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001289)
- SINGLETON, V.L.; LITTLE, J.C. (2006) Designing hypolimnetic aeration and oxygenation systems - a review. *Environmental Science and Technology*, v. 40, n. 24, p. 7512-7520. <https://doi.org/10.1021/es060069s>
- SOCOLOFSKY, S.A.; REHMANN, C.R. (2012) Bubble plumes. In: FERDANDO, H.J. (org). *Handbook of Environmental Fluid Dynamics*. Oxford: Taylor & Francis Group. v. 2. p. 55-67.
- SOLTERO, R.A.; SEXTON, L.M.; ASHLEY, K.I.; MCKEE, K.O. (1994) Partial and full lift hypolimnetic aeration of medical lake, WA to improve water quality. *Water Research*, v. 28, n. 11, p. 2297-2308. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90045-0](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(94)90045-0)
- TONÉ, A.J.; PACHECO, C.H.A.; LIMA NETO, I.E. (2017) Circulation induced by diffused aeration in a shallow lake. *Water SA*, v. 43, n. 1, p. 36-41. <http://dx.doi.org/10.4314/wsav.43i1.06>
- VISSER, P.M.; IBELINGS, B.W.; BORMANS, M.; HUISMAN, J. (2016) Artificial mixing to control cyanobacterial blooms: a review. *Aquatic Ecology*, v. 50, n. 3, p. 423-441. <https://doi.org/10.1007/s10452-015-9537-0>
- VON SPERLING, M. (1996) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. Belo Horizonte: DESA-UFMG, ABES. v. 1.
- WOODS, A.W. (2010) Turbulent Plumes in Nature. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 42, p. 391-412. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145430>
- WÜEST, A.; BROOKS, N.H.; IMBODEN, D.M. (1992) Bubble plume modeling for lake restoration. *Water Resources Research*, v. 28, n. 12, p. 3235-3250. <https://doi.org/10.1029/92WR01681>
- ZIC, K.; STEFAN, H.G.; ELLIS, C. (1992) Laboratory study of water destratification by a bubble plume. *Journal of Hydraulic Research*, v. 30, n. 1, p. 7-27. <https://doi.org/10.1080/00221689209498944>

