



# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## EFEITO DA ENTRADA E DA RAZÃO PROFUNDIDADE/DIÂMETRO NA QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIOS DE SISTEMAS DE ÁGUA

Harrison Cesar de Souza Coltre<sup>1</sup>

\*Johannes Gerson Janzen<sup>2</sup>

### EFFECT OF THE INLET AND THE DEPTH-TO-DIAMETER RATIO UPON THE WATER QUALITY OF STORAGE TANKS OF WATER SYSTEMS

Recibido el 14 de octubre de 2017; Aceptado el 16 de octubre de 2018

#### Abstract

*The influence of inlet orientation and depth-to-diameter ratio on water quality of cylindrical water storage tanks were investigated using Computational Fluid Dynamics (CFD). The CFD model calculated the flow and chlorine concentration fields for a transient flow regime. The increase of ratio depth-to-diameter diminished the outlet chlorine concentration. The configuration with one vertical or horizontal inlet, near wall, presented the highest outlet chlorine concentration.*

**Keywords:** *chlorine concentration, computational fluid dynamics, water quality, water storage tank.*

<sup>1</sup>Engenheiro Ambiental, Universidade Federal de Rondônia, Brasil

<sup>2</sup>Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil. E-mail: [johannesjanzen@gmail.com](mailto:johannesjanzen@gmail.com)

*Autor correspondente:* Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil. Email: [johannesjanzen@gmail.com](mailto:johannesjanzen@gmail.com)

## Resumo

A influência da orientação de entrada e da razão profundidade/diâmetro na qualidade da água de reservatórios de armazenamento de água cilíndricos foi investigada usando Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC). O modelo DFC calculou os campos de velocidade e de concentração para um regime de escoamento transiente. O aumento da razão profundidade/diâmetro diminuiu a concentração de cloro na saída. A configuração com uma entrada vertical ou horizontal, junto a parede do reservatório, apresentou a maior concentração de cloro na saída.

**Palavras chave:** dinâmica dos fluidos computacional, concentração de cloro, qualidade da água, tanque de armazenamento de água.

---

## Introdução

Nos sistemas de abastecimento urbano de água é usual a adoção de reservatórios de armazenamento de água para atender às flutuações de vazão e pressão. Um dos tipos de reservatório comumente utilizado é o reservatório de jusante (Stache *et al.*, 2009), o qual fica localizado a jusante da rede de distribuição, armazenando água nos períodos em que a demanda de água na rede de distribuição é baixa e complementando o abastecimento quando a demanda de água na rede de distribuição é alta. Os reservatórios de jusante são tradicionalmente concebidos e operados atendendo a condições hidráulicas e funcionais do sistema. Entretanto, estudos recentes mostram que diversos problemas microbiológicos, químicos e físicos, estão relacionados ao armazenamento da água em reservatórios de jusante (Grayman *et al.*, 1999). A maioria dos problemas de qualidade de água está relacionada ao tempo de retenção hidráulico e a pobre mistura da água no interior do reservatório (Grayman *et al.*, 1999).

O tempo de retenção hidráulico é dependente de parâmetros geométricos (e.g. dimensões e geometria do reservatório, diâmetro de entrada e saída, orientação e localização das entradas e saídas), variáveis de escoamento (e.g. vazão de entrada e saída) e propriedades físicas da água (e.g. massa específica da água no interior do reservatório e massa específica da água na entrada do reservatório). Diversos pesquisadores têm investigado a influência desses parâmetros na qualidade da água de reservatórios (e.g. Tian e Roberts, 2008; Xavier *et al.*, 2014; Xavier e Janzen, 2017). Apesar dos esforços, o objeto de estudo tem-se mostrado arduo a quantificações definitivas. Parte dessa dificuldade está associada ao fato dos reservatórios investigados na literatura estarem sujeitos ao regime de escoamento permanente, quando na realidade os reservatórios estão sujeitos ao regime de escoamento transiente.

Neste estudo, pretende-se empregar a técnica Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) para avaliar o impacto da razão altura d'água e diâmetro e configura de entrada/saída na qualidade de água na saída do reservatório funcionando em regime transiente.

## Material e Método

As simulações computacionais foram realizadas utilizando a técnica DFC que utiliza métodos numéricos e algoritmos para solucionar numericamente as equações discretizadas da conservação da quantidade de movimento, de massa e energia, nas três dimensões. Com DFC é possível obter resultados com detalhamento quase ilimitado, de forma não-intrusiva, reduzindo substancialmente o tempo e os custos quando comparados com métodos convencionais. A aplicação de DFC seguiu os seguintes passos:

O primeiro passo foi o desenho da *geometria* dos reservatórios. R1, R2, R3 e R4 possuem 10 m de altura ( $H$ ) e 5 m de diâmetro ( $D$ ), enquanto os reservatórios R5, R7 e R8 possuem  $H=2.5$  m e  $D=10$  m (Figura 1 e Tabela 1). O diâmetro de entrada (ou de saída) dos reservatórios é de 125 mm. Os reservatórios R1 e R5 possuem entrada (ou saída) vertical no centro do fundo do reservatório; R4 e R8 possuem entrada (ou saída) horizontal na lateral do reservatório a 0.3 m do fundo; R2, R3 e R7, possuem entrada (ou saída) descentralizada junto ao fundo, sendo que as distâncias entre o centro do reservatório até a entrada ( $x$ ) são de 2 m, 1 m e 4 m respectivamente. Os dados geométricos foram definidos considerando os intervalos usualmente encontrados nos reservatórios do Brasil.

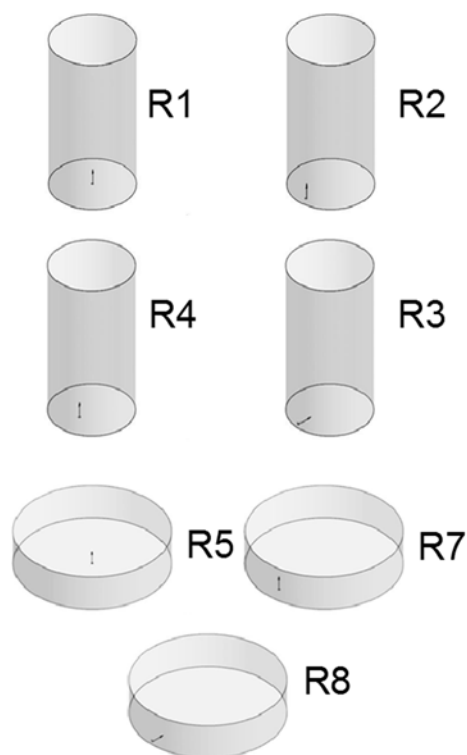


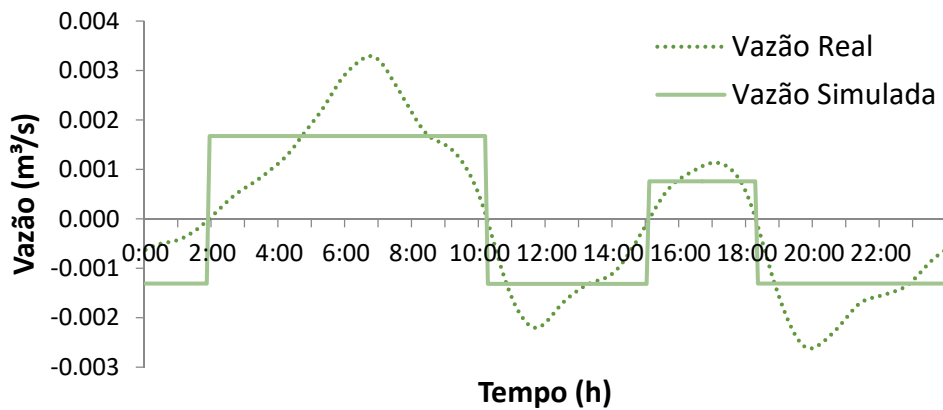
Figura 1. Geometrias dos reservatórios.

**Tabela 1.** Características geométricas dos reservatórios.

Reservatório	H/D	D (m)	H (m)	x (m)
R1	0.5	5.0	10.0	0.0
R2	0.5	5.0	10.0	2.0
R3	0.5	5.0	10.0	1.0
R4	0.5	5.0	10.0	2.5
R5	4.0	10.0	2.5	0.0
R7	4.0	10.0	2.5	2.0
R8	4.0	10.0	2.5	5.0

O segundo passo foi a discretização do domínio e geração da malha. A geometria foi dividida em um conjunto de pontos de aplicação das equações para obtenção das soluções numéricas denominado de malha. Cada malha apresentou cerca de 87000 nós e aproximadamente 500000 elementos. A malha gerada foi do tipo não-estruturada, pois permite maior flexibilidade nas células da superfície de contorno. Nas regiões de maior gradiente de velocidade, tal como na entrada, a densidade de elementos é maior. Estudos preliminares mostraram que os resultados independem da densidade de elementos da malha, isto é, a malha foi refinada a tal ponto que seu resultado não ocasiona alteração significativa do resultado encontrado (Coltre et al., 2011). O terceiro passo consiste em introduzir as condições de contorno e iniciais necessárias para resolução das equações. Com relação a vazão, foi adotada a variação típica de um reservatório de sobras de um sistema (Figura 2). Durante os períodos das 1:55 às 10:15 h e das 15:05 às 18:20 as vazões são positivas, indicando que a rede de distribuição está abastecendo o reservatório. Durante os períodos das 10:15 às 15:05 h e das 18:20 às 1:55 h as vazões são negativas indicando que o reservatório está fornecendo água para a rede de distribuição. Para fins de simplicidade, foram adotados valores médios na simulação. Na entrada de água, a concentração de cloro foi igual a 0.4 mg/L. O reservatório foi considerado inicialmente cheio de água com velocidade igual a zero e com concentração de cloro igual a 0.3 mg/l. As paredes dos reservatórios foram consideradas como sendo feitas de concreto liso, apresentando rugosidade de 0.04 mm.

Para fins de simplicidade, a atmosfera acima da superfície da água não foi simulada. Ou seja, o nível d'água não foi variado, apesar da entrada ou saída de água do reservatório; a água foi permitida entrar ou sair através da superfície da água com a mesma vazão da saída ou da entrada, mantendo o volume do reservatório constante. Esta condição de contorno modifica levemente o escoamento no interior do reservatório. Entretanto a influência dessa condição de contorno no escoamento no interior do reservatório não é importante, pois o diâmetro do topo (entre 5 e 10 m) é muito maior que o da entrada (de 125 mm), fazendo com que as velocidades de entrada ou de saída através do topo sejam muito menores do que as da entrada.



**Figura 2.** Perfil da vazão de entrada no reservatório em um período de 24 horas.

O quarto passo foi a resolução das equações de transporte e modelo de turbulência. Conforme já dito, DFC é uma ferramenta que utiliza métodos numéricos e algoritmos para solucionar numericamente as equações discretizadas da conservação de massa, quantidade de movimento e concentração, as quais são apresentadas, respectivamente, em sua forma diferencial:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Equação (1)}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + g_i \frac{\rho - \rho_r}{\rho_r} \quad \text{Equação (2)}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_j \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D \frac{\partial C}{\partial x_i} - \overline{u_i C} \right) + S_C \quad \text{Equação (3)}$$

Em que  $t$  é o tempo,  $U_i$  é a componente da velocidade média na direção  $x_i$ ,  $P$  é a pressão média,  $\rho_r$  e  $\rho$  são, respectivamente, a massa específica de referência e a massa específica do fluido,  $C$  é a concentração de algum composto ou uma quantidade escalar,  $S_C$  é uma fonte ou sumidouro volumétrico (expressando, por exemplo, o decaimento de cloro),  $\nu$  e  $D$  são, respectivamente, a viscosidade cinemática e difusividade molecular (de  $C$ ),  $\overline{u_i u_j}$  representa a correlação entre flutuações de velocidade,  $\overline{u_i C}$  representa a correlação entre as flutuações de velocidade e um escalar.

As correlações representam fisicamente a transferência de quantidade de movimento e massa devido ao movimento turbulento. A solução dessas correlações conduz a correlações sempre mais complexas (ordens superiores), não se obtendo equacionamento definitivo. A fim de obter solução para as equações 1 a 3 é necessário utilizar equações auxiliares (modelos de turbulência) que não introduzam parâmetros além daqueles já utilizados. Neste estudo, foi utilizado o modelo de turbulência  $k-\epsilon$ . Para o decaimento do cloro no interior do reservatório ( $S_C$  da Equação 4) adotou-se o modelo cinético de primeira ordem simples:

$$S_c = C_0 e^{-kt}$$

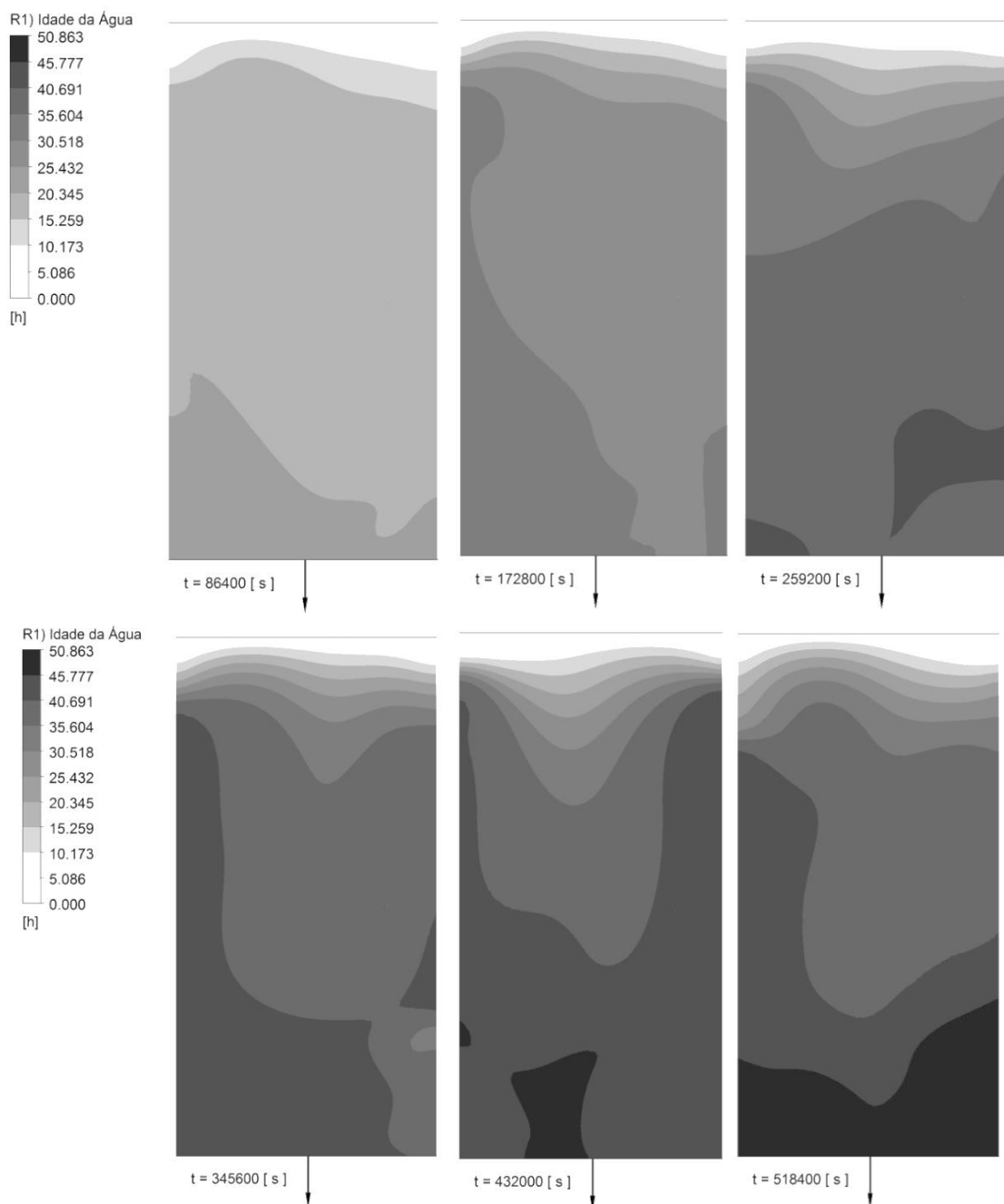
**Equação (4)**

Onde  $C_0$  é a concentração inicial de cloro e  $k$  é a constante de decaimento de primeira ordem. O valor da constante de decaimento adotado neste estudo foi de  $3.97 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

### Resultados e Discussão

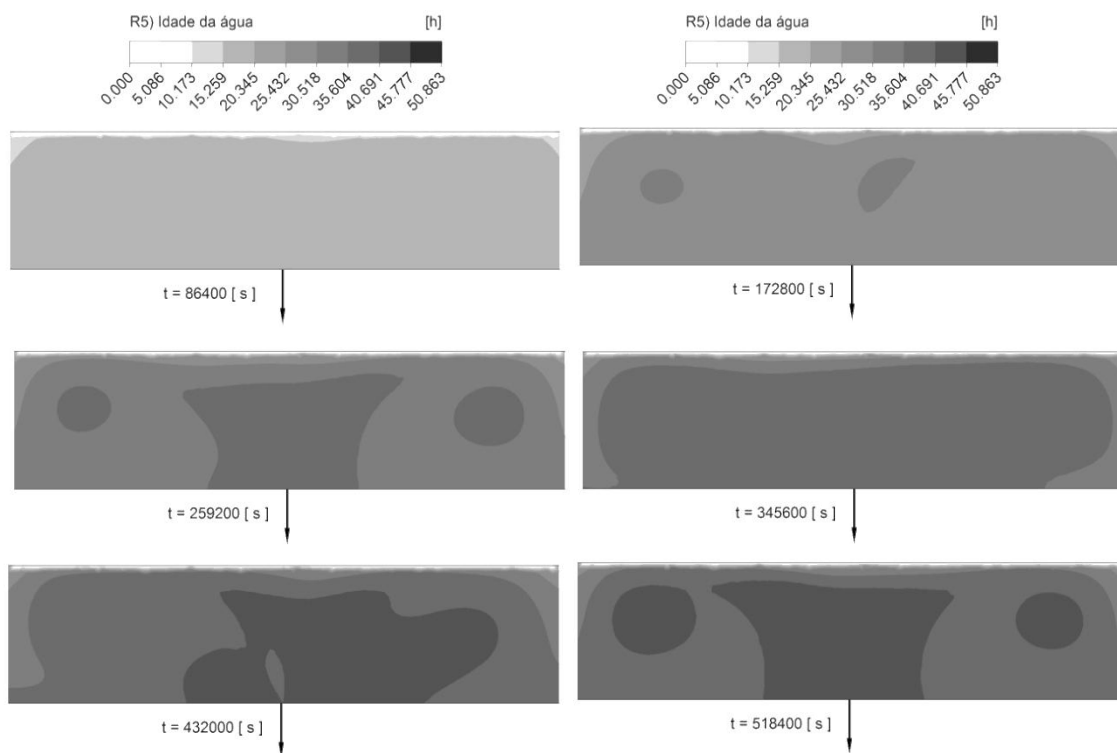
Inicialmente será avaliada a influência da relação  $H/D$  através da comparação dos reservatórios R1 e R5, os quais possuem configuração de entrada (ou saída) igual (vertical e no centro) e relações  $H/D$  diferentes. Durante o período de saída de água, a água que sai primeiro do reservatório possui uma idade menor do que aquela que sai por último (Figuras 3 e 4). A saída de água praticamente não gera mistura no interior do reservatório. Ou seja, a água que está mais próxima da saída no momento do início da saída é também a primeira a sair do reservatório. A configuração de saída, em ambos os reservatórios, não está projetada para gerar mistura. O decaimento do cloro no interior do reservatório depende da idade da água (Figura 5); não devido à idade teórica da água no interior do reservatório, mas devido à idade real da água no interior do reservatório. Em R1 e R5 as idades teóricas da água são iguais, mas a idade real da água é diferente (Figuras 3 e 4). A distribuição da idade da água mostra que R1 possui um regime de escoamento mais próximo do pistonado que R5. No escoamento pistonado todos os elementos numa determinada seção transversal possuem a mesma idade da água. Sabe-se que o regime de escoamento do tipo fluxo de pistão ocasiona uma diminuição maior do cloro do que o regime de escoamento do tipo mistura completa (Rossman e Grayman, 1999). Como a idade da água em R1 é até 13% superior à da em R5, então R5 apresenta uma concentração de cloro na saída até 8.5% maior que R1 (Figura 5). Portanto, o aumento de  $H/D$  diminui a qualidade da água. Esta conclusão é similar à de Tian e Roberts (2008); entretanto, Tian e Roberts (2008) realizaram seus experimentos em regime permanente e avaliaram somente o tempo de mistura, enquanto que no presente estudo o regime foi transiente e foi avaliada a concentração de cloro.

Para analisar a influência da configuração de entrada nos reservatórios do tipo *standpipe*,  $H/D = 2$ , a Figura 6 apresenta a variação temporal da concentração de cloro na saída dos reservatórios R1, R2, R3 e R4. Os resultados foram normalizados em relação a concentração de saída de R1. Nas saídas com duração de 8h, em geral R1 apresentou a menor concentração de saída. Já nas saídas com duração de 3h, o desempenho de R1 foi, em geral, melhor que os demais reservatórios. Em relação aos demais reservatórios, ora um reservatório teve maior concentração de cloro, ora outro reservatório. Entretanto, aparentemente a tendência é de R4 apresentar as menores concentrações de cloro. Não obstante, as diferenças na concentração de cloro ainda não são tão relevantes, estando entre 0 e 7%.

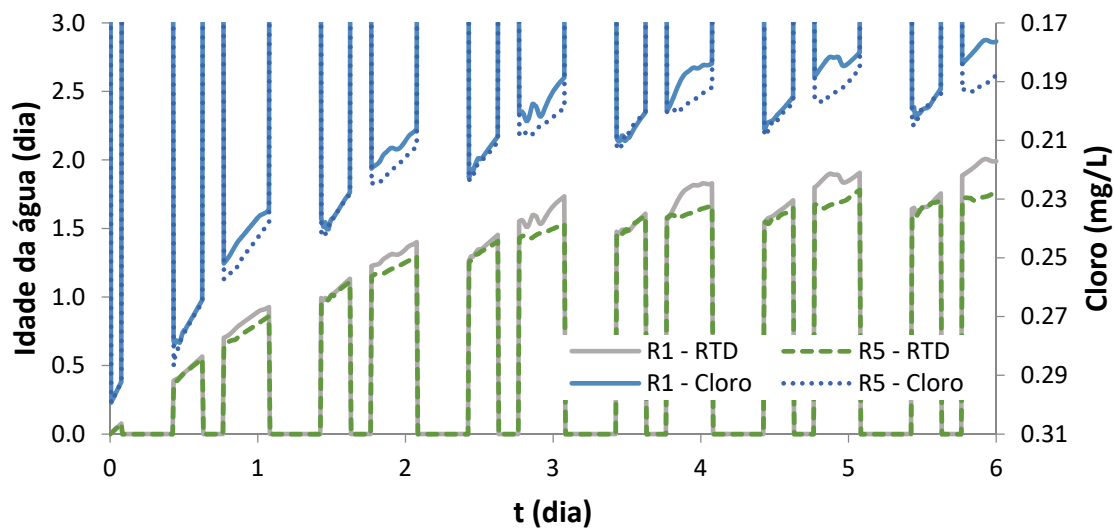


**Figura 3.** Mapas de contorno da idade da água no plano do centro para diferentes instantes de tempo para o reservatório R1.





**Figura 4.** Mapas de contorno da idade da água no plano do centro para diferentes instantes de tempo para o reservatório R5.

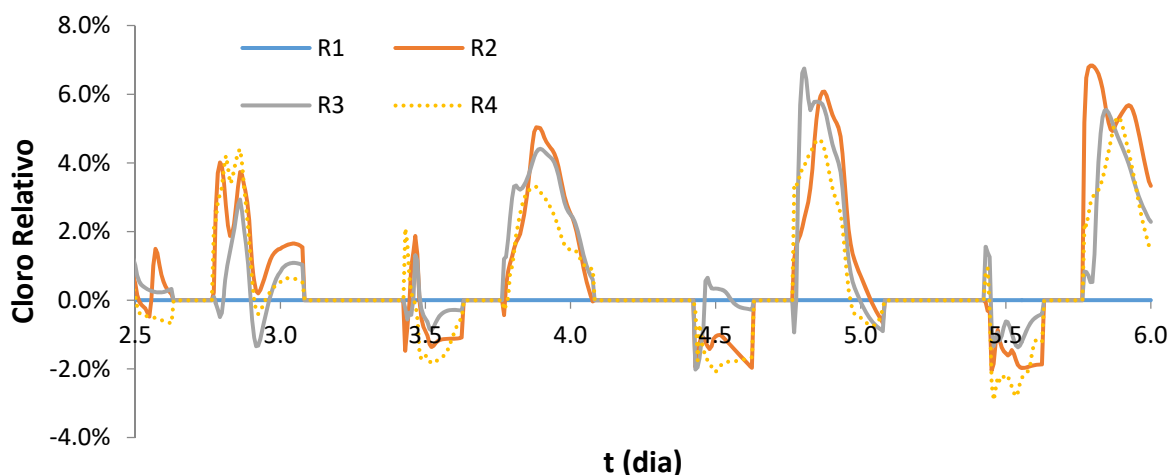


**Figura 5.** Comparação das concentrações de cloro e da idade da água na saída dos reservatórios R1 e R5.

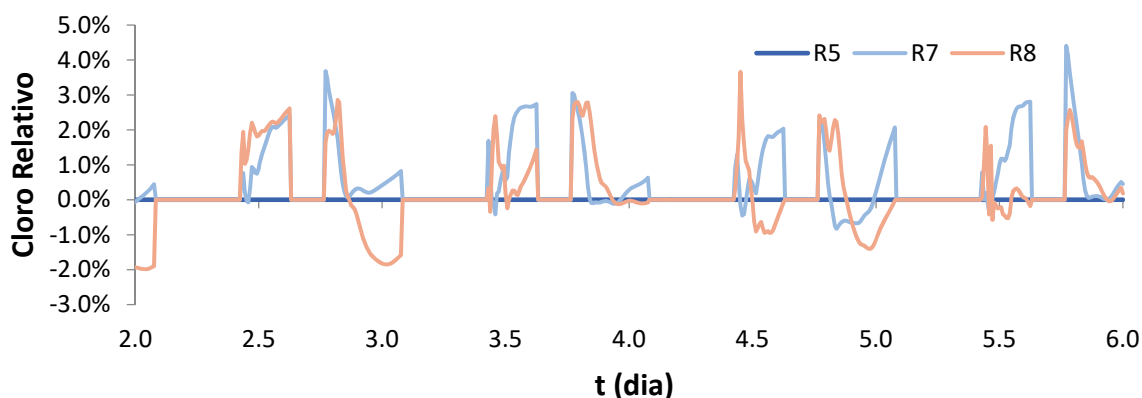


Para analisar a influência da configuração de entrada nos reservatórios do tipo  $H/D = 0.25$ , a Figura 7 apresenta a variação temporal da concentração de cloro na saída dos reservatórios R5, R7 e R8. Os resultados foram normalizados em relação a concentração de saída de R5. Mesmo havendo pouca diferença entre os reservatórios (a maior diferença é na ordem de 4%) é possível perceber que R7 e R8 mantem valores de cloro superiores a R5 na maior parte do tempo. Em diversas saídas de água, R8 apresentou uma maior concentração de cloro no início, enquanto que R7 apresentou uma maior concentração de cloro no final. Apesar dos resultados oscilarem bastante, os reservatórios com entrada (ou saída) na lateral, seja vertical ou horizontal, e seja para  $H/D = 2$  ou  $0.25$ , apresentaram as maiores concentrações de cloro.

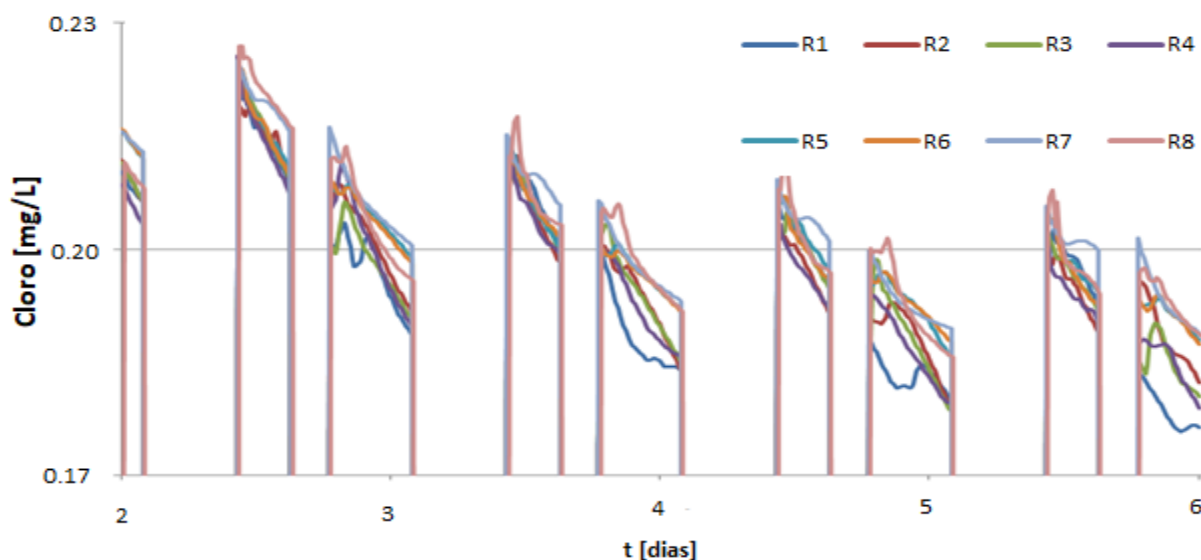
No fim do terceiro dia, todos os reservatórios passaram a fornecer água com concentração de cloro menor do que  $0.2 \text{ mg/L}$  (Figura 8). No padrão de potabilidade atual, regulamentado pela Portaria MS nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), são estabelecidas referências para uma série de parâmetros de qualidade, dentre eles o cloro livre mínimo de  $0.2 \text{ mg/L}$  em qualquer ponto da rede, para que não haja riscos de contaminação durante o consumo de água. Por essa razão, uma concentração de cloro inferior a  $0.2 \text{ mg/L}$  é preocupante. Como a concentração de cloro na saída não varia muito para as diferentes configurações, então a solução seria a água de entrada no reservatório possuir uma concentração de cloro maior.



**Figura 6.** Variação temporal da concentração de cloro na saída dos reservatórios R1, R2, R3 e R4 normalizada com os valores da concentração de cloro na saída do reservatório R1.



**Figura 7.** Variação temporal da concentração de cloro na saída dos reservatórios R5, R7 e R8, normalizada com os valores da concentração de cloro na saída do reservatório R5.



**Figura 8.** Concentração de cloro na saída dos tanques comparado ao padrão de potabilidade regulamentado pela Portaria MS nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

### Conclusões

DFC foi utilizado para modelar em regime transiente a distribuição de velocidade e da concentração de cloro no interior de sete reservatórios de sobras de sistemas urbanos de água. O aumento da razão profundidade/diâmetro diminuiu a concentração de cloro na saída do reservatório. A configuração com entrada/saída na lateral do reservatório, seja horizontal ou vertical, apresentou a maior concentração de cloro na saída. Ressalta-se que neste último caso a variação percentual da concentração de cloro na saída foi baixa.

### Referências bibliográficas

- Brasil (2011) Portaria MS nº2914/2011: Procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. MS nº 2914/2011. SAÚDE, M. D. Brasília: Diário Oficial da União 2011.
- Coltre, H.C., Rosa, A.L.D., Janzen, J.G., Souza, V.A.S. (2011) Estudo dos processos de mistura em reservatório de água predial, *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Maceió, Brasil.
- Grayman, W., Rossman, L., Arnold, C., Deininger, R., Smith, C., Smith, J., Schnipke, R. (1999) Water quality modeling of distribution system storage facilities. Denver, USA: AWWA Research Foundation and American Water Works Association.
- Palau, G., Weitbrecht, V., Stoesser, T., Bleninger, T., Hofmann, B., Maier, M., Roth, K. (2007) Numerical simulations to predict the hydrodynamics and the related mixing processes in water storage tanks, *IAHR Congress*. Veneza, Itália.
- Rossman, L.A., Grayman, W.M. (1999) Scale-model studies of mixing in drinking water storage tanks, *Journal of Environmental Engineering*, **125**(8), 755-61.
- Stache, N., Bleninger, T., Hofmann, B., Jirka, G., Maier, M., Roth, K. (2009) Mixing in drinking water storage tanks: Field and laboratory experiments, *33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*. ISBN: 978-94-90365-01-1
- Tian, X., Roberts, P.J. (2008) Mixing in water storage tanks. I: No buoyancy effects, *Journal of Environmental Engineering*, **134**(12), 974-85.
- Xavier, M.L.M., Janzen, J.G. (2017) Effects of inlet momentum and orientation on the hydraulic performance of water storage tanks, *Applied Water Science*, **7**(5), 2545-57.
- Xavier, M.L.M., Lima, P.H.S., Janzen, J.G. (2014) Impact of inlet and outlet configurations on the mixing behavior in water storage tanks, *Engenharia Sanitária Ambiental*, **19**(3), 315-24.