

## MODELO MATEMÁTICO ZERO-DIMENSIONAL PARA ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM RESERVATÓRIOS

*Einara Zahn*<sup>1\*</sup> & *Michael Mannich*<sup>2</sup> & *Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes*<sup>3</sup>

**Resumo** – As hidrelétricas sempre foram vistas como fontes limpas de energia, contudo, a partir de estudos publicados na década de 90, iniciou-se uma grande preocupação acerca do problema das emissões de gases de efeito estufa em reservatórios. A partir de então, muitas pesquisas apresentam foco na medição dos fluxos desses gases, todavia, poucos modelos matemáticos foram propostos com o intuito de estimar o fluxo dos mesmos. Dentro deste contexto, o objetivo da presente pesquisa é o de desenvolver um modelo matemático zero dimensional capaz de estimar os fluxos difusivos e ebulitivos do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>). A partir da separação das frações do carbono em compartimentos, um balanço de massa foi realizado. O fluxo difusivo de CO<sub>2</sub> foi calculado a partir do gradiente de concentração entre a superfície do reservatório e o ar, e o fluxo ebulitivo do CH<sub>4</sub> se dá a partir do sedimento. O modelo foi aplicado para um período de aproximadamente quatro anos, e os resultados mostraram-se coerentes com as respostas físicas do sistema. Os fluxos iniciais dos dois gases são altos no início das condições iniciais e diminuem com o tempo, influenciados principalmente pela degradação da matéria orgânica presente no sedimento.

**Palavras-Chave** – modelo matemático, reservatórios, gases de efeito estufa.

## ZERO-DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODEL FOR GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN RESERVOIRS

**Abstract** – Hydroelectric power plants always have been seen as clean sources of energy. Since early 90s, a big concern about greenhouse gas emissions from reservoirs has been studied by different researchers, with focus on measurement of gases fluxes. There are few mathematical models developed aiming to calculate the greenhouse gases fluxes. Thus, the main goal of this paper is to develop a zero-dimensional mathematical model to estimate the diffusion and ebullition of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>). A mass balance approach is proposed from the separation of carbon fractions in pools. The carbon dioxide diffusive flux was calculated based upon the concentration gradient between reservoir surface and air, and the methane bubbles come from sediment to the surface. The model was applied for approximately four years, and the results show consistency with the physical responses of the system. The initial fluxes of both gases were high and decreased with time, mainly driven for organic matter degradation in the sediments.

**Keywords** – mathematical model, reservoirs, greenhouse gases.

## INTRODUÇÃO

A partir da década de noventa, estudos começaram a surgir apontando que reservatórios de hidrelétricas, até então consideradas fontes de energia limpa, são possíveis emissores de gases de efeito estufa, principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>), e.g. Rudd *et al.* (1993) e Kelly *et al.* (1994). Segundo Rudd *et al.* (1993), por unidade de energia produzida, os fluxos de

<sup>1</sup> Graduanda Engenharia Ambiental – UFPR, Av. Cel. Francisco H. dos Santos s/n, 81530-900 Curitiba. E-mail einara.zahn@gmail.com

<sup>2</sup> Doutorando UFPR, DHS, Av. Cel. Francisco H. dos Santos s/n, 81530-900 Curitiba. E-mail mannich@ufpr.br

<sup>3</sup> Professor Adjunto da UFPR, DHS, Av. Cel. Francisco H. dos Santos s/n, 81530-900 Curitiba. E-mail cris.dhs@ufpr.br

gases de efeito estufa dos reservatórios para a atmosfera podem ser significativos quando comparados com a emissão causada pela geração de energia a partir de combustíveis fósseis. Foi determinado que, em reservatórios com baixa razão entre a área inundada pela energia gerada pela hidrelétrica, a relação entre o dióxido de carbono produzido por unidade de energia está entre 0,04–0,06 Tg CO<sub>2</sub> TW<sup>-1</sup>hr<sup>-1</sup>, enquanto que em reservatórios com uma alta razão entre a área inundada pela energia elétrica gerada, essa razão fica em torno de 0,3–0,5 Tg CO<sub>2</sub> TW<sup>-1</sup>hr<sup>-1</sup>, o que é similar ao efeito da geração de energia a partir da queima do carvão.

Após esse alerta inicial sobre o potencial impacto ao meio ambiente oferecido por esse tipo de energia, pesquisas vêm sendo frequentemente realizadas nessa área. A maioria tem focado na quantificação das emissões através de medições e no entendimento da mudança na dinâmica do carbono com a criação do reservatório. Já com o objetivo de estimar as emissões desses gases, tanto em reservatórios quanto em lagos, alguns pesquisadores têm proposto modelos matemáticos. Um tipo especial de abordagem, que considera o sistema modelado um reator homogêneo de mistura completa, ou zero-dimensional, tem sido adotada, e.g. Hanson *et al.* (2004), Sbrissia *et al.* (2011) e Weissenberger *et al.* (2010).

Hanson *et al.* (2004) e Sbrissia *et al.* (2011) modelaram o sistema a partir da dinâmica do ciclo do carbono na água e na atmosfera através de um balanço de massa do mesmo, separando-o em compartimentos, sendo estes, carbono orgânico dissolvido (COD), carbono orgânico particulado, vivo (COP<sub>V</sub>) e morto (COP<sub>M</sub>), carbono no sedimento (CS) e carbono inorgânico dissolvido (CID). Dessa forma o sistema é encarado como um conjunto de compartimentos no qual as espécies químicas de carbono interagem através de reações cinéticas de primeira ordem. No modelo proposto por Hanson *et al.* (2004), as taxas dessas reações foram estimadas a partir de dados da literatura, e o modelo simulou a emissão de dióxido de carbono em 60 lagos, possuindo diferentes gradientes de concentração de fósforo e carbono, da região Northern Highlands Lake District of Wisconsin, EUA. O estudo mostrou que lagos com baixas concentrações de COD e altas concentrações de fósforo são sumidouros de carbono atmosférico. Já no modelo desenvolvido por Sbrissia *et al.* (2011), os parâmetros foram estimados através de um método de identificação de sistemas, utilizando dados de campo. Nesse modelo, além de ser considerado o CO<sub>2</sub>, levou-se em consideração as emissões de CH<sub>4</sub>. O modelo simulou as emissões desses dois gases do reservatório da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) de Salto Natal, Paraná, Brasil, mostrando que o reservatório, nas condições de carga identificadas no monitoramento, é emissor de dióxido de carbono e que não emite metano para a atmosfera.

O modelo proposto por Weissenberger *et al.* (2010) foi desenvolvido a fim de investigar o impacto gerado pela criação de sete reservatórios no complexo hidroelétrico La Grande, Canadá. Ele contempla os fluxos entre as formas de carbono originadas da bacia de drenagem, o carbono liberado do solo inundado e as trocas água-atmosfera. A simulação foi executada para períodos de 50 e 100 anos, e os resultados sugeriram que a criação dos reservatórios conduziu a um aumento no fluxo de carbono para a atmosfera quando todas as mudanças regionais no ciclo do carbono foram levadas em conta. Concluiu-se que o principal responsável pelo aumento da evasão do carbono para a atmosfera é o aumento na área de superfície aquática, e, conseqüentemente, no tempo de residência da água. Dentro deste contexto, o objetivo do presente artigo é o de aprimorar um modelo matemático zero-dimensional (0D) a fim de se obter estimativas dos fluxos de dióxido de carbono e metano para a atmosfera.



$$\frac{dC_{COD}}{dt} = \frac{QC_{CODin} - QC_{COD}}{V} + K_{CA}C_{COP_V} - K_{AB}C_{COD} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC_{CID}}{dt} = & \frac{QC_{CIDin} - QC_{CID}}{V} + K_{CB}C_{COP_V} + K_{DB}C_{COP_M} \\ & + K_{AB}C_{COD} - K_{PROD} + K_{EB}C_{CS_{LAB}} \frac{V_S}{V} - \frac{A \times F_{CO_2}}{V} \end{aligned} \quad (2)$$

A taxa de reação  $K_{PROD}$  na Equação 2 representa a taxa de produtividade dentro do reservatório [ $ML^{-3}T^{-1}$ ], e é considerada constante e independente da concentração de CID. O termo  $F_{CO_2}$ , multiplicado pela área da superfície do reservatório (A), representa o fluxo de dióxido de carbono da água para a atmosfera, e é expresso por:

$$F_{CO_2} = k [CO_2]_A - [CO_2]_E \quad (3)$$

O termo  $[CO_2]_A$  representa a concentração de dióxido de carbono dissolvido na água, e  $[CO_2]_E$  representa a concentração de equilíbrio do  $CO_2$ , sendo calculado através da lei de Henry, que diz que a quantidade de gás que se dissolve na água é proporcional à pressão que o gás exerce sobre o líquido (STUMM e MORGAM; 1996).  $k$  é a velocidade de transferência do gás, e depende principalmente da velocidade do vento e da temperatura (WANNINKHOF, 1992).

$$\begin{aligned} \frac{dC_{COP_V}}{dt} = & \frac{QC_{COP_Vin} - QC_{COP_V}}{V} - K_{CB}C_{COP_V} - K_{CA}C_{COP_V} - K_{CD}C_{COP_V} \\ & + K_{PROD} - K_{CE}C_{COP_V} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dC_{COP_M}}{dt} = \frac{QC_{COP_Min} - QC_{COP_M}}{V} + K_{CD}C_{COP_V} - K_{DB}C_{COP_M} + K_{ED}C_{CS_{LAB}} \frac{V_S}{V} - K_{DE}C_{COP_M} \quad (5)$$

$$\frac{dC_{CS_{LAB}}}{dt} = -K_{EEB} - K_{EB} - K_{ED} C_{CS_{LAB}} + K_{FE}C_{CS_{REF}} + \frac{K_{DE}VC_{COP_M} + K_{CE}VC_{COP_V}}{V_S} \quad (6)$$

$$\frac{dC_{CS_{REF}}}{dt} = -K_{FE}C_{CS_{REF}} - K_{FEB}C_{CS_{REF}} \quad (7)$$

Nas Equações 1 a 7,  $V$  é o volume do reservatório [ $L^3$ ];  $K_{MN}$  é a taxa de reação de primeira ordem do componente M em N [ $T^{-1}$ ];  $V_S$  é o volume do sedimento [ $L^3$ ];  $Q$  é a vazão afluente e efluente [ $L^3T^{-1}$ ];  $A$  é a área do reservatório [ $L^2$ ];  $C$  é a concentração de carbono dentro do reservatório [ $ML^{-3}$ ] e os subscritos indicam a espécie, de acordo com o diagrama da Figura 1, e o subscrito “in” indica a entrada da espécie de carbono no reservatório [ $ML^{-3}$ ].

O presente modelo é acoplado a um balanço de energia térmica, uma vez que as reações que ocorrem na água são proporcionais à temperatura da mesma. Quando ocorre aumento na radiação solar durante o verão, o metabolismo na coluna de água torna-se mais acelerado. A taxa de reciclagem de componentes orgânicos e minerais nos lagos aumenta com o aumento da temperatura,

onde as reações químicas e atividades biológicas tais como respiração e excreção aproximadamente dobram com um aumento na temperatura de 10°C (HORNE e GOLDMAN, 1994). A seguir é apresentada a equação resultante do balanço de energia térmica.

$$\frac{dT_S}{dt} = \frac{Q}{V} T_{IN} - \frac{Q}{V} T_S - \frac{A_S}{\rho C_p V} (R_{SL} + R_{AL} - R_{RA} + R_C + R_E) \quad (8)$$

Na qual  $T_S$  é a temperatura dentro do reservatório,  $T_{IN}$  é a temperatura da água que flui para dentro do reservatório,  $Q$ ,  $A$  e  $V$  são a vazão, área e volume do sistema,  $\rho$  é a densidade da água e  $C_p$  o calor específico da água. Os termos entre parênteses representam as trocas de energia na superfície da água.  $R_{SL}$  é a radiação solar líquida (GIANNIOU; ANTONOPOULOS, 2007) (KOTSOPOULOS; BABAJIMOPOULOS, 1997),  $R_{AL}$  é a radiação atmosférica líquida,  $R_{RA}$  é a radiação emitida pela água,  $R_C$  é o termo devido à condução e convecção e  $R_E$  é devido à evaporação e condensação (CHAPRA, 1997).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A solução das equações do modelo foi obtida com o emprego do método numérico de Runge Kutta de 4ª ordem, utilizando passo de tempo fixo de 0,01 dia, aproximadamente 14,4 minutos. Para a simulação do modelo foram admitidas cargas constantes na entrada do reservatório. O modelo foi executado para um período de aproximadamente quatro anos. A Tabela 1 apresenta alguns dos parâmetros característicos do reservatório utilizados para a simulação. O volume do sedimento foi estimado supondo-se uma camada ativa no sedimento de 10 cm, e o valor da vazão é o mesmo para a vazão afluente e efluente ao reservatório. As taxas de reações entre as frações de carbono foram fundamentados em Hanson *et al.* (2004), e discutidos em Zahn (2012).

Tabela 1 – Parâmetros do reservatório para simulação do modelo.

Variáveis Locais	
Parâmetro	Valor
Área	$330 \times 10^4 \text{ m}^2$
Vazão	$3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
Volume	$35,7 \times 10^6 \text{ m}^3$
Volume do sedimento	$330 \times 10^3 \text{ m}^3$

O gráfico da Figura 2 apresenta a variação das concentrações de CID, COD,  $COP_M$  e  $COP_V$  em função do tempo. Inicialmente há a variação das concentrações dentro do reservatório, e com o tempo estas entram em equilíbrio, mantendo uma suave oscilação devido à variação da temperatura na coluna de água.

A Figura 3 exibe os fluxos de dióxido de carbono e metano para a atmosfera. Nota-se que ambos os fluxos tendem a ser altos no início e diminuem com o tempo. De acordo com Abril *et al.* (2005), os principais processos responsáveis pela alta emissão de gases de reservatórios jovens é a decomposição microbológica da matéria orgânica inundada, que é composta por solo, liteira, troncos e folhas. Segundo Rudd *et al.* (1993), a duração das altas emissões de gases de efeito estufa de um reservatório após o inundamento é desconhecida. Há um período inicial de rápida decomposição da porção lábil do carbono, como folhas das árvores, no qual a produção e o fluxo de gases para a atmosfera é elevado. Quando a matéria orgânica lábil é completamente decomposta,

segue-se um período de lenta decomposição da matéria orgânica refratária, como os galhos das árvores, que contém lignina que é de lenta degradação na água (St. Louis *et al.*, 2000).

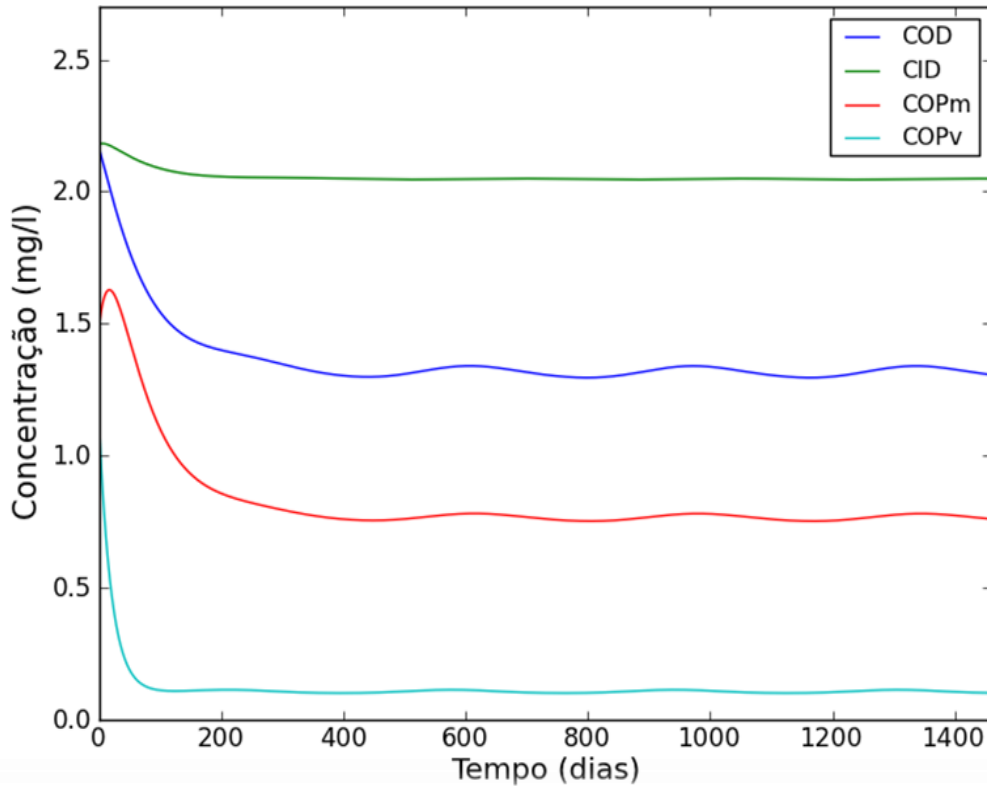


Figura 2- Evolução temporal das concentrações de CID, COD, COPm e COPv no reservatório.

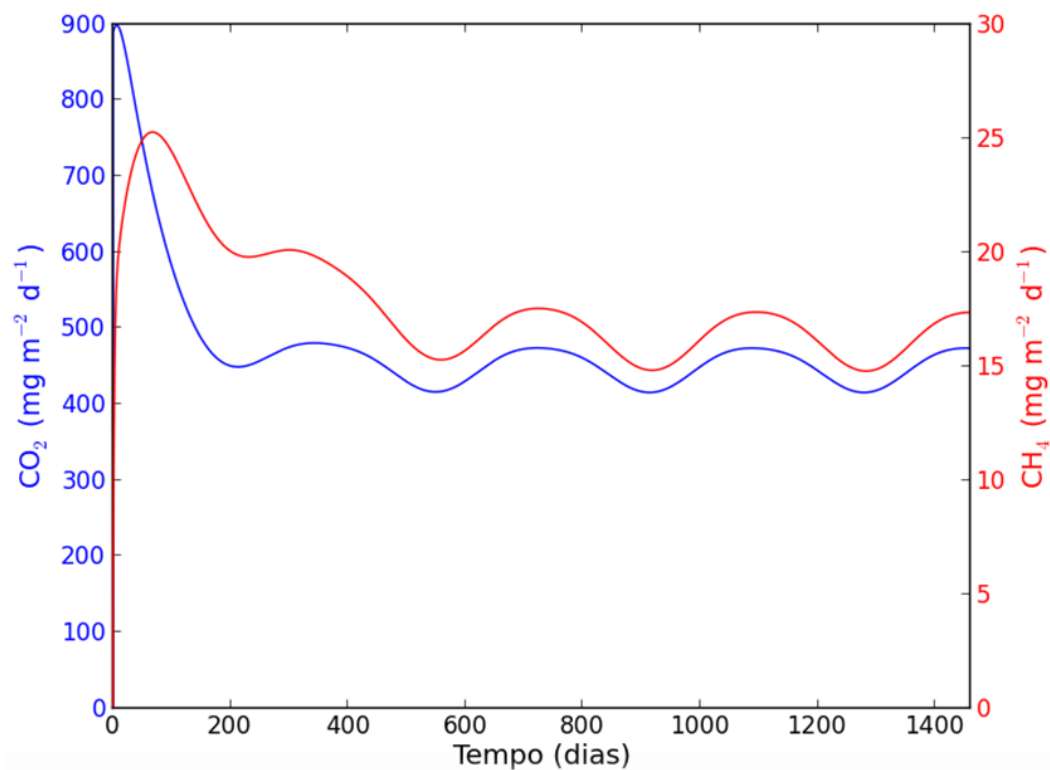


Figura 3 - Fluxos de dióxido de carbono e metano na interface água-ar.



## CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com o modelo proposto mostraram-se coerentes com os resultados de medições apresentados por Abril *et al.* (2005), Rudd *et al.* (1993) e St. Louis *et al.* (2000). Verificou-se a importância da temperatura na velocidade das reações, uma vez que, nesta simulação, foi o único parâmetro que causou uma leve variação nas concentrações das espécies de carbono dentro do reservatório. Constatou-se também a importância da separação do carbono no sedimento em suas porções lábil e refratária, uma vez que essas frações são degradadas em velocidades diferentes, e comandam as emissões dos gases em reservatórios recém-inundados, especialmente do CH<sub>4</sub>.

Deve-se destacar que os resultados obtidos no presente artigo são preliminares, e mais estudo deverá ser conduzido a fim de se obter melhores estimativas. Ressalta-se também a necessidade de calibração do modelo para a determinação das taxas das reações que ocorrem no sistema.

## REFERÊNCIAS

- ABRIL, G., GUÉRIN, F., RICHARD, S., DELMAS, R., GALY-LACAUX, C., GOSSE, P., TREMBLAY, A., VARFALVY, L., SANTOS, M. A. D., MATVIENKO, B. (2005). Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana), *Global Biogeochem. Cycles* 19, GB4007, doi:10.1029/2005GB002457.
- CHAPRA, S. C. (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. New York: McGraw-Hill, pp. 560–573.
- GIANNIOU, S. K., ANTONOPOULOS, V. Z. (2007). Evaporation and energy budget in Lake Vegoritis, Greece. *Journal of Hydrology* 345, pp. 212–223.
- HANSON, P. C., POLLARD, A. I., BADE, D. L., PREDICK, K., CARPENTER, S. R., FOLEY, J. A. (2004). A model of carbon evasion and sedimentation in temperate lakes. *Global Change Biology* 10, pp. 1285–1298.
- HORNE, J. A.; GOLDMAN, R. C. (1994). *Limnology*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, pp. 47–49.
- KELLY, C. A., RUDD, J. W. M., ST. LOUIS, V. L., MOORE, T. (1994). Turning Attention to Reservoir Surfaces, a Neglected Area in Greenhouse Studies. *Eos* 75, pp. 332–333.
- KOTSOPOULOS, S., BABAJIMOPOULOS, C. (1997). Analytical Estimation of Modified Penman Equation Parameters. *Journal of Irrigations and Drainage Engineering* 123, pp. 253–256.
- RUDD, J. W. M., HARRIS, R., KELLY, C. A., HECKY, R. E. (1993). Are hydroelectric Reservoirs Significant Sources of Greenhouse Gases?. *Ambio* 22, pp. 246–248.
- SBRISSIA, R. C., FERNANDES, C. V. S., BRAGA, M. C. B., SANTOS DOS, A. F. (2011). Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios a Partir da Dinâmica da Matéria Orgânica na Coluna da Água: Estudo de Caso PCH Salto Natal, Campo Mourão — Paraná. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 16, pp. 59–69.

ST LOUIS, V., KELLY, C. A., DUCHEMIN, E., RUDD, J. W. M., ROSENBERG, D. M. (2000). Reservoir surface as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate. *BioScience* 50, pp. 766–775.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. (1996). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibrium and Rates in Natural Waters*. New York: John Wiley & Sons, pp. 212–214.

WANNINKHOF, R. (1992) Relationship Between Wind Speed and Gas Exchange Over the Ocean. *Journal of Geophysical Research* 97, pp. 7373–7382.

WEISSENBERGER, S., LUCOTTE, M., HOUEL, S., SOUMIS, N., DUCHEMIN, E., CANUEL, R. (2010). Modeling the carbon dynamics of the La Grande hydroelectric complex in northern Quebec. *Ecological Modelling* 221, pp. 610–620.

ZAHN, E. (2012). Desenvolvimento de Modelo Matemático 0D para Estimativa de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios, 20º EVINCI UFPR.