



MODELAGEM DO TRANSPORTE DE CALOR NO RESERVATÓRIO VOSSOROCA

Bruna Arcie Polli¹ & Tobias Bleninger²*

Resumo – Reservatórios são utilizados para vários propósitos como abastecimento de água, irrigação, navegação e geração de energia elétrica. Geralmente, a geração de energia é associada à criação de reservatórios, que podem impactar as características físicas, químicas e biológicas do corpo d'água e, nos últimos anos, também tem sido associada a impactos ambientais e climáticos a respeito de emissões de gases de efeito estufa. Todos processos relacionados a estes impactos, especialmente a qualidade da água estão fortemente relacionados à temperatura, especialmente sua distribuição vertical, devido à estratificação que pode controlar o transporte de calor e de substâncias dissolvidas. Tendo em vista que a temperatura é um importante fator para a gestão do reservatório, um modelo unidimensional de transporte de calor foi desenvolvido para identificar o comportamento sazonal do reservatório e períodos críticos (relacionados à estratificação e mistura). O modelo desenvolvido contém formulações adicionais para reservatórios a fio d'água entre outros processos. Neste trabalho é apresentada a modelagem de transporte de calor de um reservatório monomítico no Sul do Brasil e alguns índices físicos são calculados para identificar períodos críticos que podem afetar a qualidade da água e podem ser utilizados como uma ferramenta para a gestão de reservatórios.

Palavras-Chave – Reservatório, estratificação térmica, modelagem de transporte de calor.

HEAT TRANSPORT MODELING IN VOSSOROCA LAKE

Abstract – Freshwater reservoirs are used for many purposes as water supply, irrigation, navigation and power generation. Nowadays hydropower is associated with the creation of reservoirs that may impact the physical, chemical and biological characteristics of the water body and in the last few years have also been associated with environmental and climate change impacts, e.g. greenhouse gas emissions. Those processes and i.e. water quality is strongly related to water temperature, specially its vertical distribution, creating density stratifications which can control heat and dissolved substance transport. As temperature is a key factor for reservoir management, an one-dimensional heat transport model has been developed to identify the seasonal thermal behavior and critical periods (related to stratification or mixing). The developed model includes formulations for run of a river reservoirs as well as additional processes. In this work, we show the heat transport modeling applied to a monomitic reservoir in South Brazil and some physical indices are calculated to identify critical periods in the reservoir that can affect water quality and can be used as a tool for the reservoir management.

Keywords – Reservoir, thermal stratification, heat transport modeling.

¹* Afiliação: Doutoranda, Universidade Federal do Paraná (UFPR), e-mail: brunapolli@gmail.com.

² Afiliação: Professor do Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná (UFPR), e-mail: bleninger@ufpr.br

* Autor Correspondente.



INTRODUÇÃO

Reservatórios são utilizados para vários propósitos, como abastecimento de água, irrigação, navegação e geração de energia elétrica [UNESCO/IHA (2009)]. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2013, a geração de energia em hidrelétricas corresponde a 70,1% da demanda interna [MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2013)]. A geração de energia por meio de hidrelétricas é geralmente associada a criação de reservatórios, que podem afetar as características físicas, químicas e biológicas do corpo d'água [Friedl *et al.* (2002)] e nos últimos anos tem sido associados às emissões de gases de efeito estufa. A qualidade da água está fortemente relacionada a temperatura da água, especialmente a distribuição vertical, que pode causar a estratificação térmica [Henderson-Sellers (1984)], que controla o transporte de calor e substâncias dissolvidas [Esteves (1988)].

Modelos unidimensionais de transporte de calor são largamente utilizados para simular perfis de temperatura, considerando-se que os gradientes de temperatura na vertical são dominantes em reservatórios. Muitas aplicações tem sido realizadas, como em Perroud *et al.* (2009), Antonopoulos e Gianniou (2002) e Han *et al.* (2000), no entanto, vários modelos não incluem variações de nível ou de turbulência na vertical em alta resolução espacial e temporal, além de testes de conservação energética, que foram analisados e propostos no desenvolvimento do modelo [Polli (2014)]. A estratificação térmica em reservatórios ocorre pelo efeito da temperatura sobre a massa específica da água. Reservatórios geralmente apresentam três camadas quando estratificados: o epilímnio, camada superior, bem misturada e quente [Horne e Goldman (1994)]; o hipolímnio, mais fria e densa que o epilímnio [Esteves (1988)]; e a camada de transição é o metalímnio, onde é localizada a termoclina [Esteves (1988)] que age como uma barreira para o transporte entre as camadas. A estrutura térmica de reservatórios é o resultado da transferência de calor na superfície e forças de gravidade (pela diferença de massa específica). O vento age na superfície e produz turbulência [Esteves (1988)] e, de acordo com Wetzel (1983) as entradas podem alterar a estrutura térmica e aumentar a turbulência. Alguns índices físicos relacionam a estratificação térmica com forças de empuxo e forças desestabilizadoras (como vento e vazões de entrada) para identificar períodos de mistura, por exemplo. Fernandez *et al.* (2010) analisaram três reservatórios na Argentina baseados em dados referentes ao reservatório, vento e estrutura térmica da coluna d'água. De acordo com Fernandez *et al.* (2010), índices físicos são úteis, como uma primeira abordagem, para definir o comportamento do reservatório (períodos de mistura e estratificação, por exemplo) e relacioná-los com a qualidade da água.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo unidimensional de transporte de calor com formulações amplificadas e estendidas para variações de parâmetros e aumento de resolução espacial e temporal. No modelo, o coeficiente de difusão turbulenta foi calculado com base na turbulência gerada pelo vento e um termo adicional relacionado às vazões de entrada no corpo d'água, de acordo com Fischer *et al.* (1979). O resultados dos perfis de temperatura foram comparados com dados medidos no reservatório e os números de Wedderburn e do Lago foram calculados para estimar os períodos (números de dias) de mistura e estratificação da coluna d'água, que podem servir de parâmetro para problemas relacionados à qualidade da água.

MODELO MATEMÁTICO

A equação unidimensional do transporte de calor é [Bedford e Babajimopoulos (1977)]:

$$A \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(AE \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_w c_p} \frac{\partial Aq(z)}{\partial z} + \frac{Q_{inAT_{in}} - Q_{outAT}}{V} \quad (1)$$



na qual A é a área (m^2) em função da profundidade z (m) a partir do fundo, T é a temperatura da água ($^{\circ}C$), t é o tempo (s), E é o coeficiente de difusão turbulenta do calor (m^2s^{-1}) em função da profundidade e do escoamento médio, bem como das condições de contorno (atrito de vento), ρ_w é a massa específica da água (kgm^{-3}), c_p é o calor específico da água ($J kg^{-1} K^{-1}$), $q(z)$ é uma fonte de calor (Wm^{-2}) representada pela radiação solar, Q_{in} é a vazão de entrada (m^3s^{-1}) que pode variar no tempo, T_{in} é a temperatura da vazão de entrada ($^{\circ}C$), Q_{out} é a vazão de saída (m^3s^{-1}) e V é o volume (m^3) do reservatório. O termo fonte de calor é definido conforme [Dake e Harleman (1969)]:

$$q(z) = (1 - \beta)q_{sn}\exp(-\eta z) \quad (2)$$

na qual β é a proporção da radiação líquida de ondas curtas absorvida na superfície, η é o coeficiente de absorção (ou extinção) (m^{-1}) e que é dependente da transparência da água e q_{sn} é a radiação solar líquida na superfície da água [Dake e Harleman (1969)]. O coeficiente de difusão turbulenta é estimado conforme [Sundaram e Rehm (1971)]:

$$E = E_0 f \quad (3)$$

em que E_0 é o coeficiente de difusão neutro (m^2s^{-1}) e f é uma função com um parâmetro de estabilidade adequado caracterizando a estratificação, o número de Richardson [Henderson-Sellers (1985)] conforme

$$f = (1 + 37Ri^2)^{-1} \quad (4)$$

na qual Ri é o número de Richardson. O coeficiente de difusão turbulenta neutro [Henderson-Sellers (1985)]:

$$E_0 = \frac{\kappa u_s^* z}{P_0} \exp(-k^* z) \quad (5)$$

em que κ é a constante de von Karman ($\kappa \approx 0,4$), u_s^* é a velocidade de atrito na superfície (ms^{-1}), P_0 é número de Prandtl neutro e k^* é uma função para diferentes latitudes ($k^* = 6,6\sqrt{\sin \varnothing} U^{-1,84}$), na qual \varnothing é a latitude e U é a velocidade do vento médio (ms^{-1}). Um termo adicional de difusão turbulenta foi considerado devido à turbulência gerada pela vazão de entrada no reservatório. Este termo foi estimado com base na difusão turbulenta vertical média do afluente conforme [Fischer *et al.* (1979)]

$$\bar{\varepsilon}_v = 0.067 d u^* \quad (6)$$

em que d é a profundidade média do rio afluente e uma porcentagem do coeficiente foi aplicado ao reservatório. A condição de contorno no fundo ($z=0$) do reservatório considera que não há fluxo de energia entre a água e o sedimento [Gianniou e Antonopoulos (2007)]. Na superfície ($z=H$), há um fluxo de energia entre a água e a atmosfera [Babajimopoulos e Papadopoulos (1986)] calculado por uma temperatura de equilíbrio [Edinger *et al.* (1968)]. As condições de contorno são representadas por [Edinger *et al.* (1968)]:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (7)$$

$$\rho_w c_p E \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=H} = -q_n = -K(T_e - T_s) \quad (8)$$

em que q_n é o fluxo de calor entre a água e a atmosfera (Wm^{-2}), T_e é a temperatura de equilíbrio ($^{\circ}C$), T_s é a temperatura da superfície da água ($^{\circ}C$) e K é o coeficiente de transferência de calor ($Wm^{-2}^{\circ}C^{-1}$).



Os índices físicos utilizados para estimar períodos de mistura e estratificação no reservatório foram os números de Wedderburn e do Lago. O Número de Wedderburn relaciona a força de empuxo com a força desestabilizadora do vento e pode ser calculado conforme [Imberger *et al.* (1989)]

$$W = \frac{g'}{L} \left(\frac{z_e}{u^*} \right)^2 \quad (9)$$

na qual z_e é a espessura do epilímnio, u^* é a velocidade de atrito, L é a pista de vento e g' é a gravidade reduzida: $g' = (\Delta\rho/\rho_0)g$, na qual ρ_0 é a massa específica da água no fundo do reservatório. No caso de $W \ll 1$, o aprofundamento da camada de mistura é dominado pela produção interna de turbulência. Neste caso, pode ocorrer ressurgência na região de início dos ventos e fortes gradientes na região oposta [Imberger *et al.* (1989)]. Se $W \gg 1$, a inclinação das isotermas devido à ação do vento é pequena e variações horizontais são negligenciáveis [Imberger *et al.* (1989)]. Há forte estratificação e a camada de mistura aprofunda lentamente [Read *et al.* (2011)]. O Número do Lago é um índice que descreve os processos relevantes para a mistura em lagos induzido pela ação do vento, de acordo com [Read *et al.* (2011)]

$$L_N = \frac{S_t(z_e + z_h)}{2\rho_h u^{*2} A_s^{1/2} z_v} \quad (10)$$

em que z_h é a espessura do hipolímnio, S_t é a estabilidade de Schmidt que relaciona a resistência à mistura mecânica devido à energia potencial da coluna d'água estratificada, ρ_e é a massa específica do hipolímnio, A_s é a área da superfície do lago e $z_v = \int_{z=0}^{z_D} z A_z dz / \int_0^{z_D} A_z dz$ [Read *et al.* (2011)]. Se $L_N > 1$, a estratificação é forte e minimiza qualquer distúrbio produzido pelo vento na superfície e $L_N < 1$ indica estratificação fraca, com potencial para mistura [Imberger *et al.* (1989)].

MODELO

As equações foram discretizadas utilizando o método de volumes finitos no esquema totalmente implícito. O modelo numérico foi programado em Fortran 95 com rotinas de pré- e pós-processamento programados em Fortran 95 e MatLab, respectivamente. O esquema numérico foi escolhido após uma análise de conservação de energia em três esquemas: diferenças finitas explícito e implícito e volumes finitos. Além disso, vários testes simplificados foram realizados para estudar a importância de cada processo no modelo [Polli (2014)].

ÁREA DE ESTUDO

O reservatório do Vossoroca foi formado em 1949 pelo represamento do Rio São João, localizado em Tijucas do Sul – PR (cerca de 80 km de Curitiba). Conta com uma área alagada de 3,3 km², volume de 35,7 10⁶ m³, profundidade máxima de 17 m, profundidade média de 8 m e tempo de detenção de aproximadamente 117 dias [Mannich *et al.* (2011)]. O reservatório tem como função regularizar a vazão para a usina hidrelétrica de Chaminé, cuja capacidade é de 18 MW [COPEL (1999)]. A usina de Chaminé está situada na margem esquerda do Rio São João na divisa dos municípios de São José dos Pinhais e Tijucas do Sul, em uma área de preservação permanente da Serra do Mar [COPEL (1999)]. O clima é classificado como subtropical úmido, cujas principais médias anuais são: nos meses quentes inferiores a 22°C e nos meses frios, inferior a 18°C. A temperatura da coluna d'água (Figura 1) foi medida pela instalação de uma plataforma flutuante no reservatório, com sete sensores para medição de temperatura, nas profundidades 1, 3, 5, 7, 9 e 11 m, medidas em relação à superfície e à 1 m do fundo [Mannich (2013)]. A resolução temporal foi 15 min. O reservatório apresenta características de lagos monomíticos, com circulação durante os meses de inverno. A distribuição de oxigênio dissolvido acompanha o perfil de temperatura, com períodos de anoxia durante o período estratificado (IAP, 2008). A estação meteorológica foi

instalada nas margens do reservatório Vossoroca, com resolução temporal de 2 min [Mannich (2013)].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta as medições realizadas na estação meteorológica no período de 02/06/2012 à 27/02/2013 e utilizadas como dados de entrada do modelo. Outros dados de entrada são as vazões e informações do reservatório. Para a aplicação do modelo unidimensional de transporte de calor, o reservatório Vossoroca foi discretizado conforme a Tabela 1.

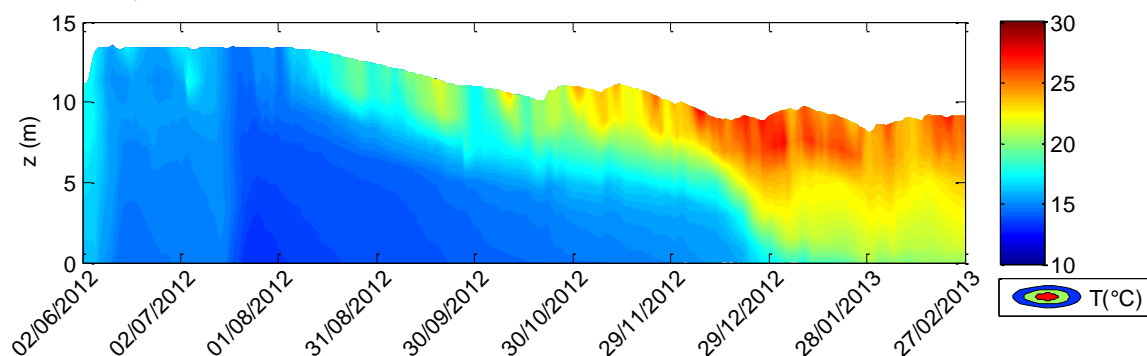


Figura 1 - Medições de temperatura na plataforma flutuante no reservatório Vossoroca

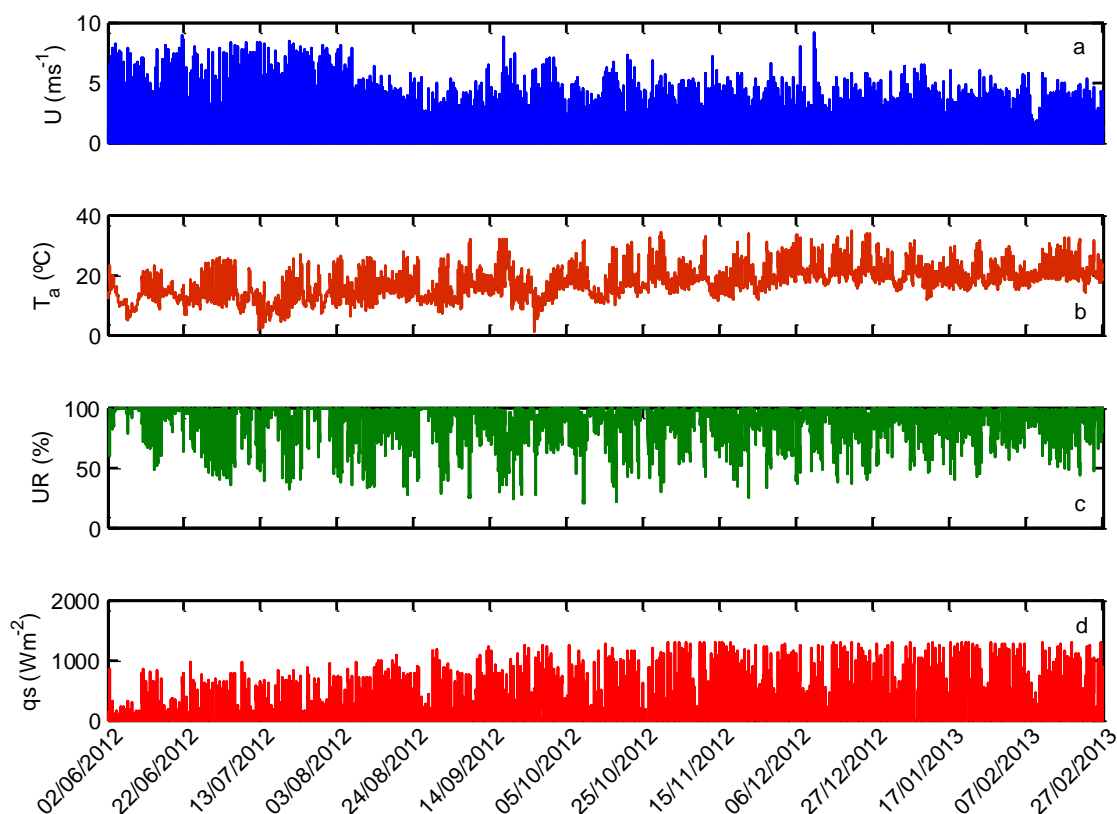


Figura 2 - Dados meteorológicos no reservatório Vossoroca. a) Velocidade do vento, b) temperatura do ar, c) umidade relativa e d) radiação solar.

Tabela 1 - Discretização do reservatório Vossoroca

Profundidade máxima (m)	17	Período de simulação (dias)	271
Δz (m)	0,2	Δt (s)	120
Número máximo de células no espaço	87	Número de passos no tempo	195.120

Os resultados da simulação de temperatura da coluna d'água do reservatório Vossoroca são apresentados na Figura 3 (veja também a Figura 1). Inicialmente, o reservatório está bem misturado e, a partir do final do mês de agosto as camadas mais próximas à superfície sofrem aquecimento, os gradientes de temperatura aumentam e o nível do reservatório está caindo. Em Dezembro, toda a coluna d'água é aquecida e altas temperaturas são verificadas. As temperaturas na superfície variam de 12,7°C à 26,8°C (do inverno ao verão) e, no fundo, de 12°C à 24,5°C. Nos perfis medidos no reservatório (Figura 1), as temperaturas variaram de 14,58°C à 27,62°C na superfície e, de 13,20°C à 21,08°C no fundo do reservatório.

Na Figura 4, perfis de temperatura medidos e simulados pelo modelo são apresentados para alguns dias da simulação. Os resultados da modelagem concordam com os perfis medidos no reservatório. O coeficiente de extinção utilizado no modelo foi $\eta=1,0 \text{ m}^{-1}$, que corresponde a uma profundidade de Secchi de 1,84 m. A Tabela 2 apresenta os resultados do erro médio (EM), desvio padrão (σ) e erro médio quadrático (EMQ) estimado a partir dos resultados da simulação e observações. O erro médio foi de 0,26°C. Perroud *et al.* (2009) comparou quatro modelos unidimensionais de transporte de calor e o erro médio de dois destes modelos (que apresentaram os melhores resultados) variou entre $0,12^\circ\text{C} \pm 1,02^\circ\text{C}$ e $0,5^\circ\text{C} \pm 1,2^\circ\text{C}$, na camada superficial, nos modelos SIMSTRAT e DYRESM, respectivamente.

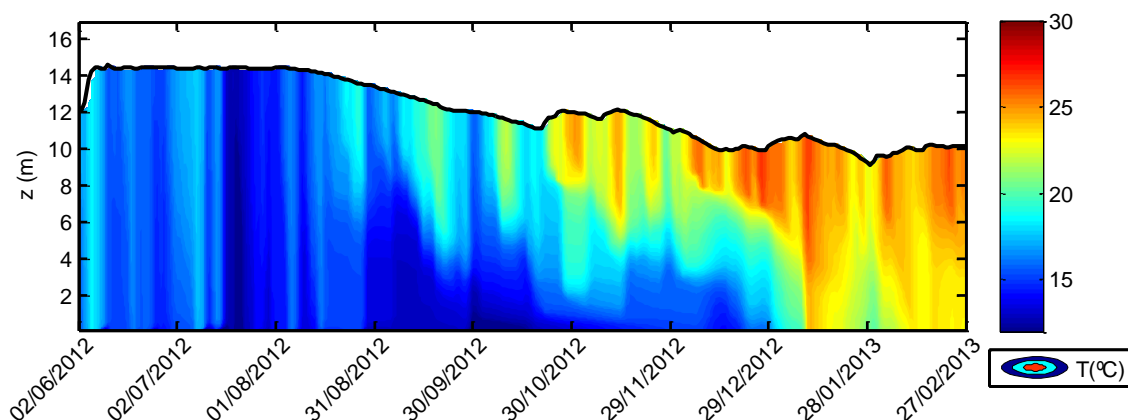


Figura 3 - Resultados da simulação do modelo unidimensional de transporte de calor no reservatório Vossoroca

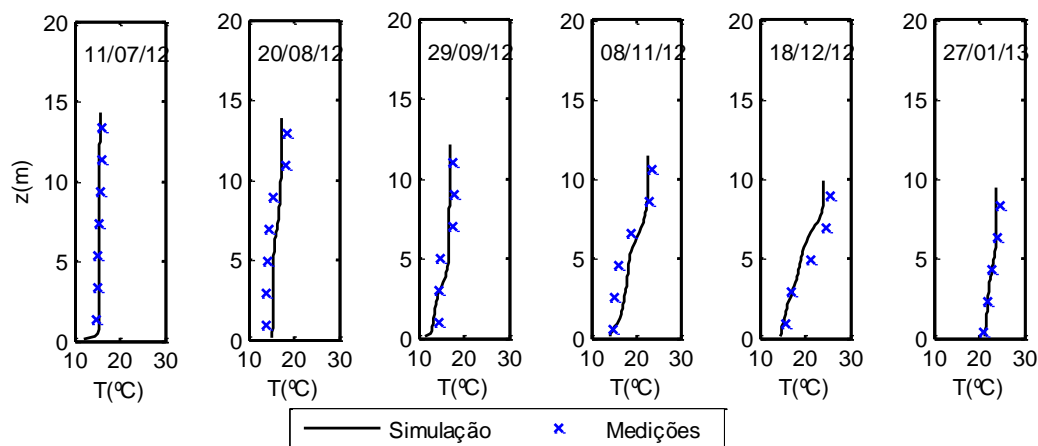


Figura 4 - Perfis de temperatura medidos e simulados no reservatório Vossoroca

Tabela 2- Erro médio, desvio padrão e erro médio quadrático da simulação

EM (°C)	σ (°C)	EMQ (°C)
0,26	1,42	1,45

Na Figura 5 são apresentados os números do Lago e de Wedderburn. No início do período estudado, os gradientes de temperatura são pequenos e as velocidades do vento são altas (veja a Figura 2), portanto, é esperado que os índices físicos sejam menores que 1, indicando aprofundamento da termoclina. Depois deste período inicial (em Agosto), os gradientes de temperatura começam a aumentar devido ao aquecimento das camadas superficiais do reservatório. Neste caso, os números de Wedderburn e do Lago, indicam forte estratificação e pouca mistura devido à ação do vento. Durante o período estudado, o número de Wedderburn é maior que 1 em 167 dias e, no caso do número do Lago, em 252 dias (Tabela 3). Na Tabela 3 são apresentados alguns gradientes de temperatura (definidos como a diferença de temperatura entre a superfície e o fundo) e, em 128 dias é esperado um gradiente maior do que 3°C na coluna d'água, indicando que, em grande parte da simulação, a coluna d'água está estratificada e há pouca mistura pelo vento.

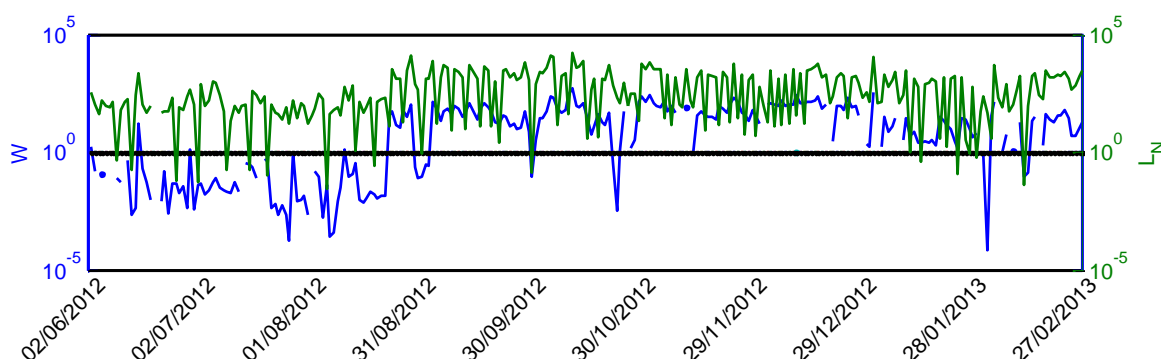


Figura 5 - Números de Wedderburn e do Lago no reservatório Vossoroca

Tabela 3 - Número de dias que $\Delta T > 1, 2$ e 3°C , $W > 1$ e $L_N > 1$ para o reservatório Vossoroca

$\Delta T > 1^\circ\text{C}$ (dias)	195	$\Delta T > 2^\circ\text{C}$ (dias)	158	$\Delta T > 3^\circ\text{C}$ (dias)	128	$W > 1$ (dias)	167	$L_N > 1$ (dias)	252
--	-----	--	-----	--	-----	-------------------	-----	---------------------	-----

CONCLUSÕES

Os resultados do modelo unidimensional de transporte de calor conseguiram reproduzir os perfis de temperatura medidos no reservatório e, o cálculo de índices físicos que relacionam empuxo e forças desestabilizadoras são uma ferramenta importante para definir os períodos de mistura e estratificação no reservatório, importantes para o gerenciamento.

REFERÊNCIAS

- ANTONOPOULOS, V. Z.; GIANNIOU, S. K. (2003). Simulation of Water Temperature and Dissolved Oxygen Distribution in Lake Vegoritis, Greece. *Ecological Modeling* 160, pp. 39-53.
- BABAJIMOPOULOS, C.; PAPADOPOULOS, F. (1986). Mathematical Prediction of Thermal Stratification of Lake Ostrovo (Vegoritis), Greece. *Water Resources Research* v.22(11), pp. 1590-1596.
- BEDFORD, K. W.; BABAJIMOPOULOS, C. (1977). Vertical Diffusivities in areally averaged models. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* v.103 (EE1), pp.113-125.
- COPEL. (1999). *Usina Hidrelétrica Chaminé*. Relatório Ambiental. 23 p.
- DAKE, J. M. K.; HALERMAN, D. R. F. (1969). Thermal Stratification in Lakes: Analytical and Laboratory Studies. *Water Resources Research* v.5(2), pp. 484-495.
- EDINGER, J. E.; DUTTWEILER, D. W.; GEYER, J. C. (1968). The Response of Water Temperatures to Meteorological Conditions. *Water Resources Research* v.4 (5), pp. 1137-1143.
- ESTEVES, F. A. (1989). *Fundamentos de Limnologia*. Interciência. 2a ed. Rio de Janeiro, 602 p.



- FERNANDEZ, R.L.; IRIART, M.R.; BUSTAMANTE, A. (2010). Uso de indicadores físicos en la caracterización hidrodinámica de embalses de la región central argentina. In *Anais XXIV Congresso Latinoamericano de Hidráulica*, Punta Del Este, Uruguai. Nov. 2010, pp.
- FISCHER, H. B. (1981). *Transport Models for Inland and Coastal Waters*. Academic Press. 542 p.
- FRIEDL, G.; WUEST, A. (2002). Disrupting biogeochemical cycles – Consequences of damming. *Aquatic Science* v.64, pp.55-65.
- GIANNIOU, S. K.; ANTONOPOULOS, V. Z. (2007). Evaporation and energy budget in Lake Vegoritis, Greece. *Journal of Hydrology*, n.345, pp. 212-223.
- HAN, B.P.; ARMENGOL J.; GARCIA, J.C.; COMERMA M.; ROURA, M.; DOLZ, J.; STRASKRABA M. (2000). The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach. *Ecological Modeling*, 125, pp. 109-122.
- HENDERSON-SELLERS, B. (1985). New Formulation of eddy diffusion thermocline models. *Applied Mathematical Modeling* v.9, pp.441-446.
- HENDERSON-SELLERS, B. (1984). Development and Application of U.S.E.D: A Hydroclimate Lake Stratification Model. *Ecological Modelling* v.21, pp.233-246.
- HORNE, A. J.; GOLDMAN, C. R. (1994). *Limnology*. Mc Graw Hill. 2a ed. United States of America. 576 p.
- IAP, Instituto Ambiental do Paraná. (2008). *Qualidade das águas: reservatórios do estado do Paraná 2005 a 2008*. 119 p.
- IMBERGER, J.; PATTERSON, J.C. (1989). Physical Limnology. *Advanced in Applied Mechanics* v. 27 pp. 303-475.
- MANNICH, M. (2013). *Estimativa de emissões de gases de efeito estufa em reservatórios e lagos – Contribuições para o monitoramento e modelagem 1D – vertical*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná. 277 p.
- MANNICH, M.; GONÇALVES, V. D.; BERNARDO, J. W. Y.; BLENINGER, T.; FROEHNER, S.; FERNANDES, C. V. S. (2011). Avaliação de parâmetros limnológicos do reservatório do Vossoroca e de qualidade da água de seus afluentes. In *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Maceió, Nov. 2011.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. (2013). *Balanço Energético Nacional 2013 (ano base 2012)*. Relatório Final. 283 p.
- PERROUD, M.; GOYETTE, S.; MARTYNOV, A.; BENISTON, M.; ANNEVILLEC, O. (2009). Simulation of multiannual thermal profiles in deep Lake Geneva: A comparison of one-dimensional lake models. *Limnology and Oceanography* v.54(5), pp. 1574-1594.
- POLLI, B. A. (2014). *Modelagem 1D do fluxo vertical de calor em corpos de água horizontalmente homogêneos*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. 105 p.
- READ, J. S.; HAMILTON, D. P.; JONES, I. D.; MURAOKA, K.; WINSLOW, L. A.; KROISS, R.; WU, C. H.; GAISER, E. (2011). Derivation of lake mixing and stratification indices from high-resolution lake buoy data. *Environmental Modeling & Software* v; 26, pp.1325-1336, 2011.
- SUNDARAM, T. R.; REHM, R. G. (1971). Formation and Maintenance of Thermoclines in Temperate Lakes. *American Institute of Aeronautics and Astronautics* v.9(7), pp. 1322-1329.
- UNESCO/IHA. (2009). *The UNESCO/IHA measurement specification guidance for evaluating the GHG status of man-made freshwater reservoirs*. 55 p.
- WETZEL, R.G. (1983). *Limnology*. Saunders College Publishing. 2a ed. United States of America. 767 p.