

CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA DE RESERVATÓRIOS COM BASE NOS NÚMEROS DE FROUDE E LAGO

Rocianne Bortolazzo Pinto^{1*}; *Tobias Bleninger*²; *Akemi Kan*³

Resumo – Devido, principalmente, a sua grande variabilidade espacial e temporal e à diversidade de fatores envolvidos, a descrição e a caracterização da hidrodinâmica em reservatórios apresenta certa complexidade. Neste contexto, diversos parâmetros e indicadores podem ser utilizados para a classificação de diferentes regimes hidrodinâmicos. Este trabalho tem o objetivo de avaliar a aplicação de parâmetros físicos que se utilizam de dados hidrológicos, meteorológicos e batimétricos para classificar a hidrodinâmica em reservatórios. O estudo é realizado para os dados do reservatório Capivari-Cachoeira, no leste do estado do Paraná. Os resultados apresentados possibilitaram uma caracterização geral da hidrodinâmica do reservatório em termos da estabilidade da coluna d'água. O estudo concluiu que o cálculo dos parâmetros físicos poderia ser útil para a caracterização do estado do reservatório sem a necessidade de realização de medições adicionais, sendo assim uma boa ferramenta para gestão de reservatórios. A classificação de estados/períodos distintos na dinâmica e na qualidade de reservatórios permite um melhoramento de planejamento de campanhas e da interpretação de resultados.

Palavras-Chave – Hidrodinâmica, Reservatório, Parâmetro.

HYDRODYNAMIC CHARACTERIZATION OF RESERVOIRS BASED IN FROUDE AND LAKE NUMBERS

Abstract – The description and characterization of hydrodynamics in reservoirs presents some complexity, mainly due to its large spatial and temporal variability and diversity of factors involved. In this context, various parameters and indicators may be used for the classification of different hydrodynamic regimes. This study aims to evaluate the application of physical parameters that use hydrological, meteorological and bathymetric data to classify the hydrodynamics in reservoirs. The study is performed for the data of the reservoir Capivari-Cachoeira, located in the eastern Paraná state. The results presented allowed a general characterization of the hydrodynamics of the reservoir in terms of the stability of the water column. The study concluded that the calculation of physical parameters could be useful for the characterization of the reservoir without the need to perform additional measurements, making it a good tool for reservoir management. The classification of different states in the dynamics and water quality of reservoirs allows an improvement of campaign planning and interpretation of results.

Keywords – Hydrodynamic, Reservoir, Parameter.

¹ Afiliação: LACTEC/CEHPAR – CP 19.067, CEP 81531-980, Curitiba – PR. Fone: (41) 3361-6282. E-mail: rocianna.bortolazzo@lactec.org.br

² Afiliação: PPGERHA/UFPR – CP 19.011, CEP 81531-990, Curitiba – PR. Fone: (41) 3361-3212. E-mail: tobias.bleninger@gmail.com

³ Afiliação: LACTEC/CEHPAR – CP 19.067, CEP 81531-980, Curitiba – PR. Fone: (41) 3361-6282. E-mail: akemi.kan@lactec.org.br

* Autor Correspondente: Rocianne Bortolazzo Pinto.

INTRODUÇÃO

O regime hidrodinâmico de um reservatório é o resultado da maneira como ele responde à sua morfometria e às condições meteorológicas e hidrológicas a que está sujeito. Na maioria dos casos, a mistura em reservatórios é altamente variável tanto no tempo quanto no espaço. Nesses sistemas, um retrato da circulação interna pode ser observado através de dados de temperatura e correntes, no qual a mistura horizontal pode muitas vezes ser gerada por correntes de densidade horizontais, que são por sua vez resultado da mistura vertical heterogênea.

Assim, o padrão de circulação em ambientes lacustres, por estar fortemente relacionado às condições meteorológicas, pode variar em questão de minutos ou horas. Apesar das dimensões horizontais dos lagos serem usualmente maiores que as verticais, a mistura horizontal ocorre geralmente mais rapidamente que a mistura vertical. Na verdade, a estratificação vertical não apenas reduz a velocidade das misturas verticais como aumenta a mistura horizontal por canalizar a energia mecânica ao longo de superfícies horizontais.

Dessa forma, as características hidrodinâmicas do reservatório influenciam na distribuição espacial e temporal de substâncias dissolvidas ou suspensas no sistema. Como conseqüência, exercem influência indireta na distribuição das principais substâncias fontes de produção de gases e responsáveis pelo processo de eutrofização da coluna d'água, como a matéria orgânica e nutrientes, e de parâmetros controladores como a temperatura e o oxigênio dissolvido.

Devido, principalmente, a sua grande variabilidade espacial e temporal e à diversidade de fatores envolvidos, a descrição e a caracterização da hidrodinâmica em reservatórios é de caráter complexo. Neste contexto, para a classificação de diferentes regimes hidrodinâmicos podem ser utilizados diversos parâmetros e indicadores. Este trabalho tem o objetivo de avaliar a aplicação de parâmetros físicos que se utilizam de dados hidrológicos, meteorológicos e batimétricos para classificar a hidrodinâmica em reservatórios.

Parâmetros físicos para caracterização de lagos e reservatórios

Há na literatura um conjunto de índices e parâmetros adimensionais que relacionam as variáveis mais significativas referentes à processos hidrodinâmicos dos corpos d'água proporcionando a caracterização física e do regime hidrodinâmico dos mesmos. Dentre eles, tem-se o parâmetro geométrico, M_G , que pode prever a tendência do corpo d'água a se misturar com maior facilidade (GORHAM e BOYCE, 1989 apud FERNANDEZ *et al*, 2010). Este parâmetro é indicado pela equação:

$$M_G = \log(A^{0,25} H^{-1}) \quad (1)$$

onde A é a superfície do reservatório e H a profundidade normal do mesmo. Para valores menores que 0,46 o corpo d'água apresenta maior tendência a processos de mistura vertical e a estratificação é suficientemente fraca para impedi-los.

Um índice que determina o balanço entre o momento estabilizante e desestabilizante do vento em um corpo arbitrariamente estratificado é o Número de Lago (L_N) (IMBERGER, 1989):

$$L_N = \frac{S_i(H-h)}{u_*^2 A^{3/2}(H-h_v)} \quad (2)$$

Onde S_t é a estabilidade de Smith (FISCHER *et al.*, 1979); h é a profundidade da termoclina estacional; h_v é a altura do centro de volume do corpo d'água; e u_* é a velocidade de corte do vento.

Valores de L_N iguais a 1 indicam que o vento é suficiente para forçar a termoclina estacional a ser desviada da superfície na direção da extremidade do reservatório. Para $L_N \gg 1$, a estratificação é forte e domina as forças turbulentas introduzidas pelo vento na superfície, espera-se assim um menor deslocamento ('seiching') da termoclina estacional e pouca mistura turbulenta no hipolímnio. Valores menores que 1 representam uma estratificação débil, em que a termoclina estacional experimenta deslocamentos fortes e o hipolímnio encontra-se submetido a mistura turbulenta por causa dos 'cortes' internos (IMBERGER, 1989).

Outra maneira de caracterizar a estratificação é através de um parâmetro denominado duração da estratificação estacional LSS (Length of Seasonal Stratification) que se define como a quantidade total de dias onde uma diferença de temperatura entre a superfície e o fundo do reservatório é de pelo menos um grau Centígrado. Este parâmetro pode também ser encontrado através da equação (HELMBRECHT, 2002 *apud* FERNANDEZ *et al.*, 2010):

$$LSS = 90 + 30 \ln(L_N) \quad (3)$$

Complementariamente, o número de Froude avaliado nos tributários e na saída do reservatório permite analisar de maneira sensível se a água que entra no reservatório permanecerá na superfície ou se submergirá para formar a corrente de fundo, em outras palavras, se a vazão de entrada no reservatório afetará a estrutura estratificada da coluna d'água. O número de Froude pode ser calculado pela seguinte equação (FISCHER *et al.*, 1979):

$$Fr_t = \frac{Q_i}{g_i^{1/2} H^{3/2} B} \quad (4)$$

Onde Q_i é a vazão nos tributários, B é a largura média do reservatório; e g'_i é a gravidade reduzida baseada nas diferenças de densidade entre a água do tributário e a do reservatório, conforme a equação:

$$g' = \frac{g \Delta \rho}{\rho_0} \quad (5)$$

Onde g é o valor da gravidade, $\Delta \rho$ é a diferença entre as densidades da água no tributário e no reservatório; e ρ_0 é a densidade da água no reseratório.

MATERIAIS E METODOS

A usina hidrelétrica Governador Parigot de Souza (Capivari-Cachoeira) resulta da transposição das águas do rio Capivari, de um planalto a 850m em relação ao nível do mar, até uma bacia costeira para produzir 250 MW de potência em uma casa de máquinas subterrânea, com desnível total de aproximadamente 770m (BRAZILIAN COMMITTEE ON LARGE DAMS, 1982). A planta está localizada a 60 km da cidade de Curitiba, na parte mais ao leste do estado do Paraná, mais precisamente na Serra do Mar.

A barragem, assim como a tomada d'água estão localizadas no primeiro planalto, onde o clima é sub-tropical e a precipitação média anual é de 1200mm. As turbinas estão localizadas na

‘parte oceânica’ da declividade da Serra do Mar, região bastante úmida, com precipitação média de 2300 mm/ano. O rio Capivari drena uma bacia de 1118km² e o reservatório alaga uma área de aproximadamente 12km², em uma região pouco populosa de solo pobre, quase isenta de qualquer tipo de desenvolvimento.

Para realizar a aplicação dos parâmetros previamente descritos é necessário considerar a distribuição térmica da coluna d’água e a ação do vento. Para o reservatório Capivari, haviam disponíveis dados de perfil de temperatura da coluna d’água e de oxigênio dissolvido para campanhas realizadas pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, sob contratação da COPEL (LACTEC, 2013), a cada 3 meses, tendo como data inicial 02/04/2003. Os dados das campanhas são obtidos para cinco pontos, dos quais três são utilizados nesse estudo: ponto E1, localizado no rio Capivari; ponto E2, localizado no reservatório próximo à barragem; e ponto E5, localizado no rio dos Patos (Figura 1).

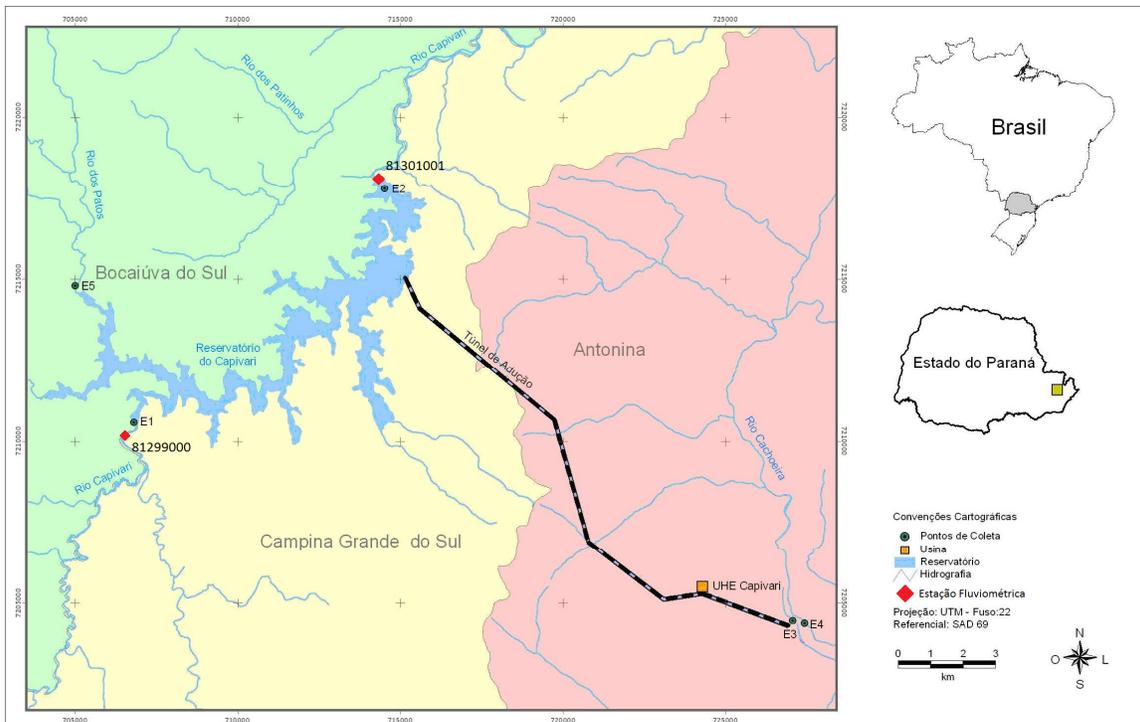


Figura 1 - Localização dos pontos de medição no reservatório Capivari

Assim a altura da termoclina estacional, h , foi obtida a partir da análise do perfil de temperatura de cada medição. Já a estabilidade de Smith, S_t , foi calculada integrando-se a equação ao longo da coluna d’água (IMBERGER, 1989).

$$S_t = \int_0^H (h - h_v) A(h) \rho(h) dh \quad (6)$$

Na equação, os valores de $\rho(h)$ foram obtidos para cada valor de temperatura na coluna d’água (FISCHER *et al*, 1979).

Para obtenção dos valores de $A(h)$, os dados de nível disponíveis para o reservatório pertencentes à estação 81301001 - Reservatório Capivari, localizada próxima à barragem (Figura 1), em escala diária, para o período entre setembro de 1999 e janeiro de 2013, foram aplicados à curva

Cota x Área do reservatório. O mesmo procedimento foi realizado para a obtenção da área superficial do reservatório correspondente à cada data de medição do perfil de temperatura.

Para o cálculo do centro de volume do corpo d'água, h_v , a geometria do reservatório foi simplificada a uma seção triangular e a altura do centro de volume do reservatório foi calculada para cada valor de nível correspondente.

Em relação aos dados de velocidade do vento, uma estação meteorológica foi instalado em um flutuante no reservatório (Figura 1) gerando dados a cada 30 minutos desde sua instalação em 13/12/2012. A fim de obter valores para datas anteriores, foi realizada uma correlação com dados da estação Pinhais, operada pelo SIMEPAR, iniciada em 10/07/1998. Tendo em vista o baixo coeficiente de correlação obtido para os dados do período em comum das duas estações, foram adotados os valores médios mensais correspondentes a cada mês.

Para os dados de vazão afluente ao reservatório foram adotadas as séries obtidas a partir dos dados da estação hidrossedimentológica 81299000 (Barragem Capivari - Montante - 396). As vazões do Rio dos Patos, no ponto E5, foram estimadas a partir dos dados da estação 81299000 considerando as respectivas áreas de drenagem.

A gravidade reduzida baseada nas diferenças de densidade entre a água do tributário e a do reservatório, g' , foi calculada com base nos valores de densidade estimados a partir da temperatura média da água nos pontos E1, E2 e E5 (Figura 1).

Por último, a largura média do reservatório, B , foi estimada em 350m através da ferramenta ArcMAP para o nível 830m. Para os demais níveis, o valor de B foi calculado considerando o mesmo proporcional à variação da área superficial na curva CotaxÁrea.

Os valores máximos, médios e mínimos dos parâmetros calculados são apresentados pela Tabela 1. A Figura 2 apresenta as vazões em E1 e E5, velocidade de corte e o Parâmetro de Smith, S_t , calculados para o reservatório Capivari.

Tabela 1 - Parâmetros adotados para o cálculo do Número de Froude e Lago

	Vazão (m³/s)		Gravidade Reduzida		u* (m/s)	B (m)	As (km²)	H (m)	Hv (m)	Ht(m)	St (10 ⁶)
	E1	E5	E1	E5							
Máximo	59,79	13,30	0,02	0,02	2,65	1113,93	154,32	45,98	10,22	18,00	1,41
Média	16,53	3,68	0,01	0,01	2,07	822,31	115,80	40,78	9,27	3,67	1,15
Mínimo	3,98	0,89	0,00	0,00	1,53	424,19	58,76	33,58	7,46	0,00	0,52

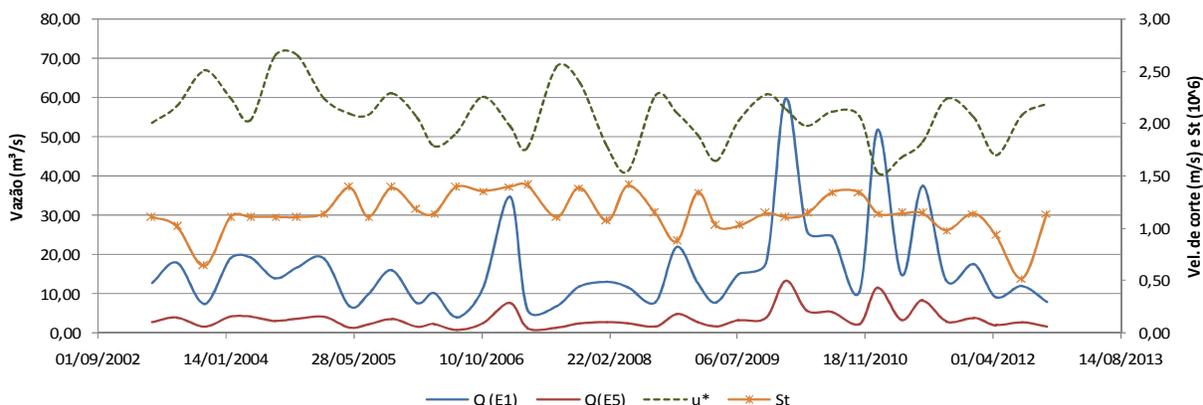


Figura 2 - Vazões em E1 e E5, velocidade de corte e Parâmetro de Smith calculados para o reservatório Capivari

RESULTADOS

Os valores de M_G calculados para reservatório Capivari-Cachoeira foram menores que 0,46 em todas as datas, indicando que o corpo d'água tem fraca tendência de estratificar. Esse resultado, entretanto, entra em conflito com aqueles indicados pelos Números de Lago e Froude apresentados em seguida.

Os valores de L_n calculados para todas as datas foram $\gg 1$, indicando que o reservatório tem grande tendência de manter-se estratificado. Comparando a curva gerada pelos valores de L_n calculados e de OD medidos nas mesmas datas, verifica-se que o comportamento da primeira é contrário ao esperado. Quando L_n aumenta, indica maior estratificação da coluna d'água, e, portanto, a concentração média de OD deveria diminuir. Entretanto, pode-se observar que a curva de L_n acompanhou alterações bruscas na concentração de OD.

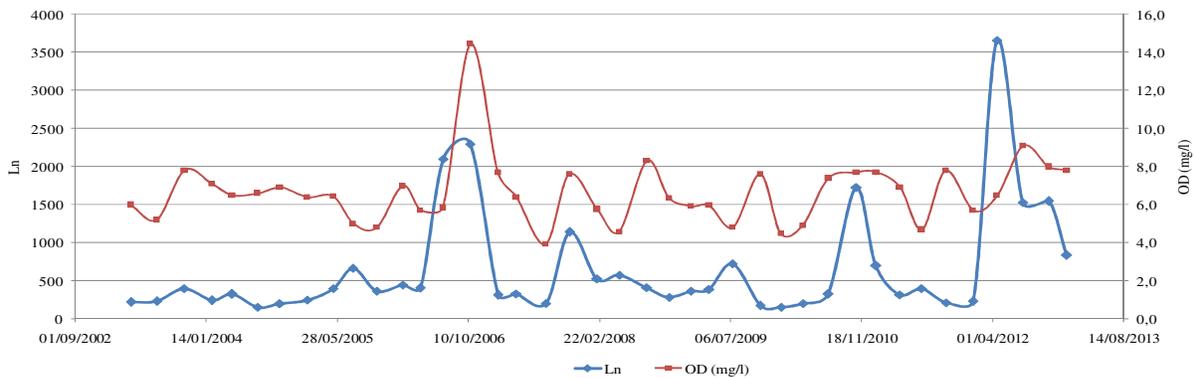


Figura 3 - Valores de L_n calculados e OD(mg/l) medidos para a o ponto E2 no reservatório

Analisando-se mês a mês, pode-se observar que os valores de L_n assumiram comportamento esperado para as medições do mês de Junho, conforme apresentado na Figura 4, o que não foi possível verificar para os demais meses do ano.

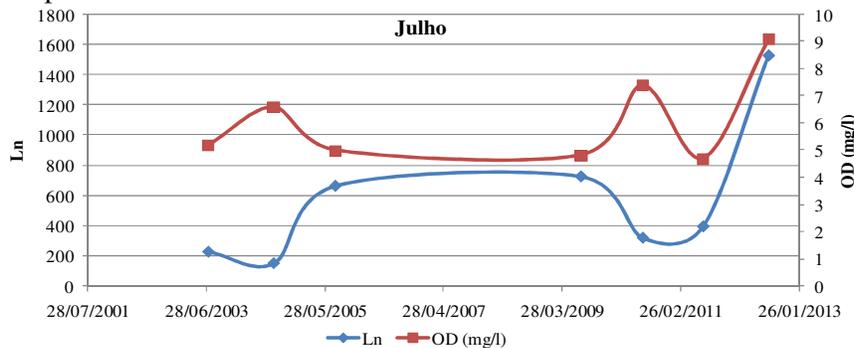


Figura 4 - Valores de L_n calculados e OD medidos para todos os meses de julho, no ponto E2

A Figura 5 e a Figura 6 apresentam a valores de L_n calculados, de OD medidos e a velocidade do vento estimada para os meses de Janeiro e Outubro. Pode-se verificar que a velocidade do vento manteve-se praticamente constante nesses meses em todos os anos e exerce pouca influência na concentração de OD no reservatório.

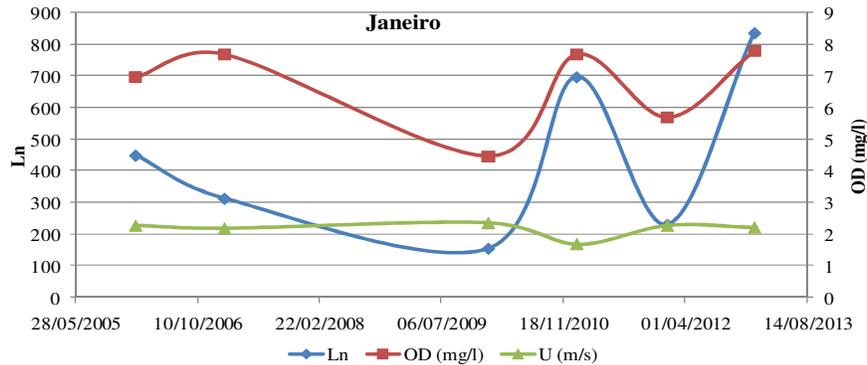


Figura 5 - L_n calculados, OD medido e U estimada para o mês de janeiro

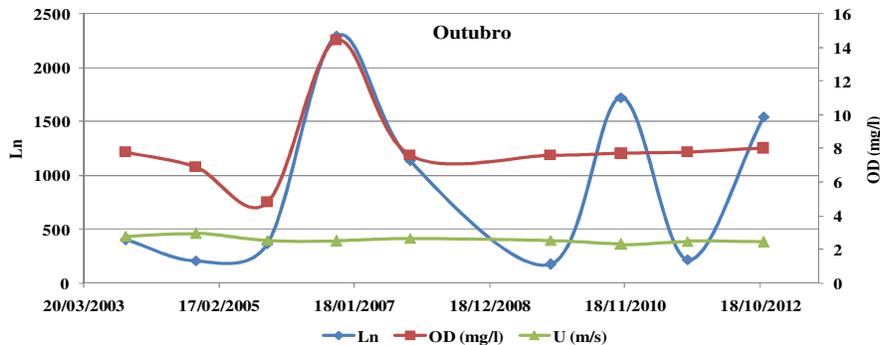


Figura 6 - L_n calculados, OD medido e U estimada para o mês de outubro

Os números de Froude calculados para os pontos E1 e E5 foram menores que a unidade em todas as campanhas, caracterizando que o fluxo de entrada dos afluentes analisados é predominantemente pelo fundo. Esse resultado pode ser confirmado pelos valores de temperatura média apresentados na Figura 7, onde a temperatura da água no reservatório é mais alta que nos afluentes a maior parte do tempo.

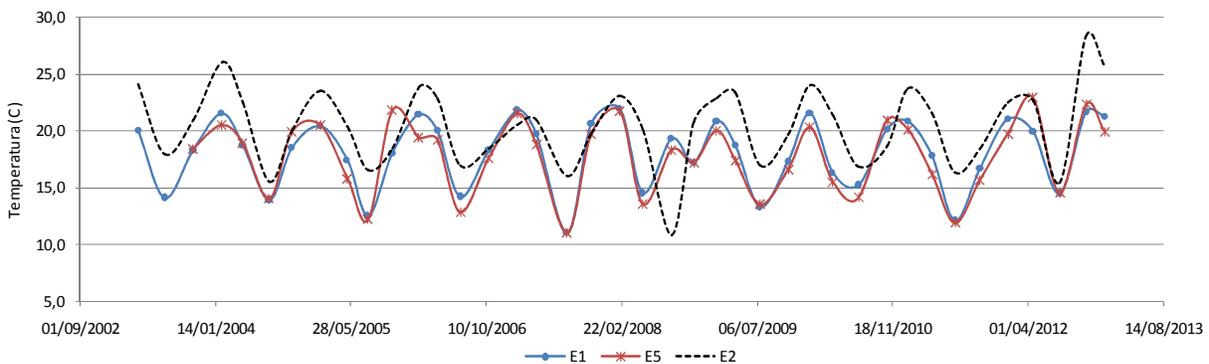


Figura 7 - Temperatura média da água no rio Capivari (E1), rio dos Patos (E5) e no reservatório (E2)

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados possibilitaram uma caracterização geral da hidrodinâmica do reservatório Capivari-Cachoeira em termos da estabilidade da coluna d'água. O reservatório tem grande tendência de estratificação na maior parte do ano e a velocidade do vento exerce pouca influência na mistura da coluna d'água. Concluiu-se que, quando disponíveis dados meteorológicos,

hidrológicos e batimétricos é possível realizar a caracterização da hidrodinâmica de lagos e reservatórios através do cálculo de parâmetros característicos como o Número de Lago e Froude. Além disso, essa caracterização permite facilmente a classificação de regimes de circulação existentes nesses sistemas, e dessa forma, uma avaliação geral de questões limnológicas, especificamente em relação a períodos de estratificação e a transporte de poluentes/nutrientes associados.

A comparação dos parâmetros físicos calculados com o parâmetro de qualidade de água OD mostrou que há uma correlação forte de eventos significativos, embora com inversões ainda não entendidas. Esse resultado indica que o cálculo dos parâmetros físicos poderia ser útil para a caracterização do estado do reservatório sem a necessidade de realização de medições adicionais, sendo assim uma boa ferramenta para gestão de reservatórios.

A classificação de estados/períodos distintos na dinâmica e na qualidade de reservatórios permite um melhoramento de planejamento de campanhas e da interpretação de resultados. O aprimoramento e a complementação da análise dos processos dominantes nestes regimes distintos, podem ser realizados através da utilização de modelos.

REFERÊNCIAS

- BIELECKA; M.; KAZMIERSKI, J.A 3D (2003) Mathematical model of Vistula lagoon hydrodynamics – general assumptions and results of preliminary calculations. *Diffuse Pollution Conference Dublin*.
- BRAZILIAN COMMITTEE ON LARGE DAMS (1982). *Main Brazilian Dams: Design, Construction and Performance*.
- FERNANDEZ, R. L.; IRIART, M. R.; BUSTAMANTE, A. (2010) Uso de Indicadores Físicos em la Caracterización Hidrodinámica de Embalses de La Región Central Argentina. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica Punta Del Este, Uruguay.
- FISCHER, B. H.; LIST, E. J.; KOH, R. C. Y.; IMBERGER, J.; BROOKS, N. H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press, Inc. London.
- IMBERGER, J. (1989). Vertical heat flux in the hypolimnion of a lake. Tenth Australasian Fluid Mechanics Conference – University of Melbourne.
- IMBODEN, D. M., WÜEST, A. (1995). Mixing mechanisms in lakes. In: LERMAN, A., IMBODEN, D. M., GAT, J. R. (Eds.) *Physics and Chemistry of Lakes*, pp. 83-138. Berlin: Springer-Verlag.