

## Circulação da Água Hipolimnética no Reservatório Divisa do Sistema Salto (RS)

Melissa Franzen

Serviço Geológico do Brasil – CPRM

mfranzen@re.cprm.gov.br

Luiz Fernando de A. Cybis, Gustavo Henrique Merten

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS

lfcybis@ufrgs.br; 00091236@ufrgs.br

Recebido: 27/11/09 - revisado: 03/10/11 - aceito: 13/10/11

---

### RESUMO

Os reservatórios em cascata, Divisa, Blang e Salto, integram o Sistema Salto de Hidrelétricas, localizado no município de São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul (Brasil). A ocorrência de uma floração de algas tóxicas no verão de 1999, originada no Blang, atingiu captações de água de seis municípios à jusante e demandou medidas especiais para o tratamento da água. Este fato motivou a investigação das possíveis fontes de nutrientes, especialmente o fósforo, identificado como nutriente limitante. Situados numa região de nascentes e clima subtropical úmido, esses reservatórios apresentaram características oligotróficas à mesotróficas no período compreendido entre 2001 e 2003. A investigação das possíveis causas para a fertilização das águas, levou em consideração fontes externas (principalmente difusas) e a fonte interna representada pelo sedimento de fundo, orgânico e rico em nutrientes. Elevadas concentrações de fósforo dissolvido no hipolímnio e a presença de fósforo disponível em excesso no sedimento de fundo, indicaram que esta poderia ser uma fonte significativa de nutrientes para a fertilização das águas. Como a referida floração ocorreu num período em que, normalmente, se desenvolve estratificação em corpos de água relativamente profundos, este trabalho teve como objetivos caracterizar a estratificação físico-química da coluna de água e investigar a possibilidade de circulação da água hipolimnética na condição estratificada. Para tal, foram obtidos perfis verticais de parâmetros que indicam a ocorrência de estratificação da coluna de água (temperatura, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica e potencial redox), teores de fósforo total dissolvido e turbidez, da superfície ao hipolímnio, além de clorofila-a na zona fótica. A possibilidade de circulação da água hipolimnética foi investigada através de batimetria e números adimensionais que refletem a estabilidade do corpo de água estratificado. Resultados indicam que, sob estratificação, a circulação da água hipolimnética dificilmente ocorreria, pois somente eventos climáticos extremos provocariam ventos capazes de inverter a massa líquida. A circulação de águas metalimnéticas, contudo, seria uma possibilidade mais provável, já que ventos moderados poderiam induzir afloramento da termoclina. No entanto, a transferência de fósforo do hipolímnio para a coluna de água poderia ser desencadeada pela abertura de comportas de fundo do reservatório à montante, tendo em vista que o procedimento utilizado para regularização das vazões aumenta o risco de proliferação de algas nos reservatórios situados à jusante, especialmente se isto ocorrer em período de estiagem.

Palavras-chave: limnologia física, reservatórios em cascata, fósforo, floração de algas.

---

### INTRODUÇÃO

Do ponto de vista físico, a susceptibilidade do ecossistema aquático depende de como as substâncias são transportadas e distribuídas dentro do reservatório. Reservatórios represados em leito de rio são considerados como uma transição entre rios e lagos, pois apresentam características hidráulicas de ambos ambientes, lótico e lântico. Nas proximidades do barramento, se tornam mais parecidos

com os lagos e sujeitos à mesma ação dos ventos, correntes de densidade e estratificação (Esteves, 1998).

Nos períodos de estratificação, um gradiente de densidades separa em camadas uma água superficial mais quente e leve, sobreposta a outra mais fria e densa, o que confere estabilidade à massa líquida. Trocas verticais entre o hipolímnio e o epilímnio, são grandemente reduzidas e os principais movimentos são quase que inteiramente horizontais,

ao longo dos contornos de transição de densidade da água (Wüest & Lorke, 2003).

O transporte vertical é facilitado próximo ao sedimento de fundo, em função das correntes de densidade e ondas superficiais, que possibilitam ressuspensão do sedimento e aumento da taxa de difusão de nutrientes dissolvidos para o hipolímnio. A transferência de nutrientes do hipolímnio para as camadas superiores da coluna da água é dificultada, em função da barreira física imposta pela diferença de densidades (Wüest & Lorke, *op cit.*).

As condições meteorológicas podem determinar a ocorrência de estratificação ou mistura, em um determinado intervalo de tempo. A magnitude da incidência do vento e a energia térmica que confere energia potencial à superfície da coluna de água são importantes parâmetros no estudo da circulação, indicando se a tendência da coluna de água é estratificar ou misturar (Imberger, 2001).

Em regiões de clima subtropical, as baixas temperaturas do inverno resultam num regime de circulação caracterizado por mistura. Durante a primavera e o verão, a água superficial é aquecida, podendo desenvolver estratificação em reservatórios relativamente profundos (Wüest & Lorke, *op cit.*). No entanto, a estabilidade do corpo de água estratificado pode ser modificada por variações no fluxo de calor na superfície da água ou pela ação do vento, por isso, as condições meteorológicas podem ser determinantes nos processos de transporte dentro do reservatório.

Apesar da tendência de chuvas bem distribuídas ao longo do ano em regiões de clima subtropical, fenômenos como o El Niño Oscilação Sul (ENOS) podem alterar o padrão de variabilidade da temperatura do ar e, principalmente, da precipitação pluvial. O ENOS é um fenômeno de grande escala, caracterizado por anomalias no padrão de temperatura da superfície do Oceano Pacífico Tropical, que ocorrem de forma simultânea com anomalias no padrão de pressão atmosférica. Na região sul do Brasil, a fase quente do ENOS (El Niño) provoca chuva acima da média durante a primavera e início do verão, e a sua fase fria (La Niña) provoca estiagens nesse mesmo período (Grimm *et al.*, 1996a, b).

Diferentemente dos lagos, os reservatórios são também influenciados pelo regime de operação das barragens, principalmente no que se refere à abertura de comportas de fundo. O procedimento pode ser frequente, já que se destina à regularização de vazões, ou esporádico, onde é razoável supor que o estoque de nutrientes aumente com o passar do tempo. A necessidade de regularização de vazões,

nos períodos de déficit hídrico, normalmente acontece no verão das regiões de clima subtropical, período em que os reservatórios também se encontram mais propensos ao supercrescimento de algas e de plantas aquáticas (Wetzel, 1983; Straskraba & Tundisi, 2000).

Os efeitos do regime hidrodinâmico dos ecossistemas aquáticos lênticos e a possibilidade de circulação da água hipolimnética podem ser investigados através de números adimensionais, que caracterizam a estabilidade dinâmica do corpo de água estratificado e possibilitam a previsão de possíveis cenários (Imberger, 2001).

Este trabalho teve como objetivo investigar a possibilidade de circulação da água hipolimnética num reservatório estratificado, tendo como base a batimetria e perfis de estratificação físico-química da coluna de água.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de Estudo

Os reservatórios Divisa, Blang e Salto foram construídos em cascata, na década de 50, para geração de energia elétrica. Localizados na bacia hidrográfica do rio Caí, município de São Francisco de Paula (RS), o Sistema Salto passou a ter importância estratégica também para regularização de vazões, desde que grande parte da vazão efluente passou a ser transposta para a bacia do rio dos Sinos (Franzen *et al.*, 2004). Da Barragem do Salto, a água que sai pela descarga de fundo segue o curso do rio Santa Cruz, até ser lançada no rio Caí. E através de um conduto, parte da vazão efluente do Salto é transposta para o vale do rio Santa Maria, no município de Canela (RS), e aproveitada nas usinas de Bugres e Canastra, sendo posteriormente lançada no rio Paranhãna, um dos principais afluentes do rio dos Sinos (Conte *et al.*, 2000).

A bacia hidrográfica dos reservatórios do Sistema Salto, antes da transposição, compreende uma área de 52,5 km<sup>2</sup>, situada em torno dos 800 metros de altitude, numa região de clima subtropical úmido. Os usos do solo na bacia hidrográfica são representados por campo (74,5%), mata nativa (12,9%), florestamento (8,9%) e, em menor proporção, agricultura (1,3%), ocupação urbana (0,5%) e água (1,9 %) (Franzen *et al.*, 2004a).

A Figura 1 apresenta a situação do Sistema Salto nas bacias hidrográficas dos rios Caí e Sinos, o contorno da bacia hidrográfica antes da transposição e a localização dos pontos de amostragem.

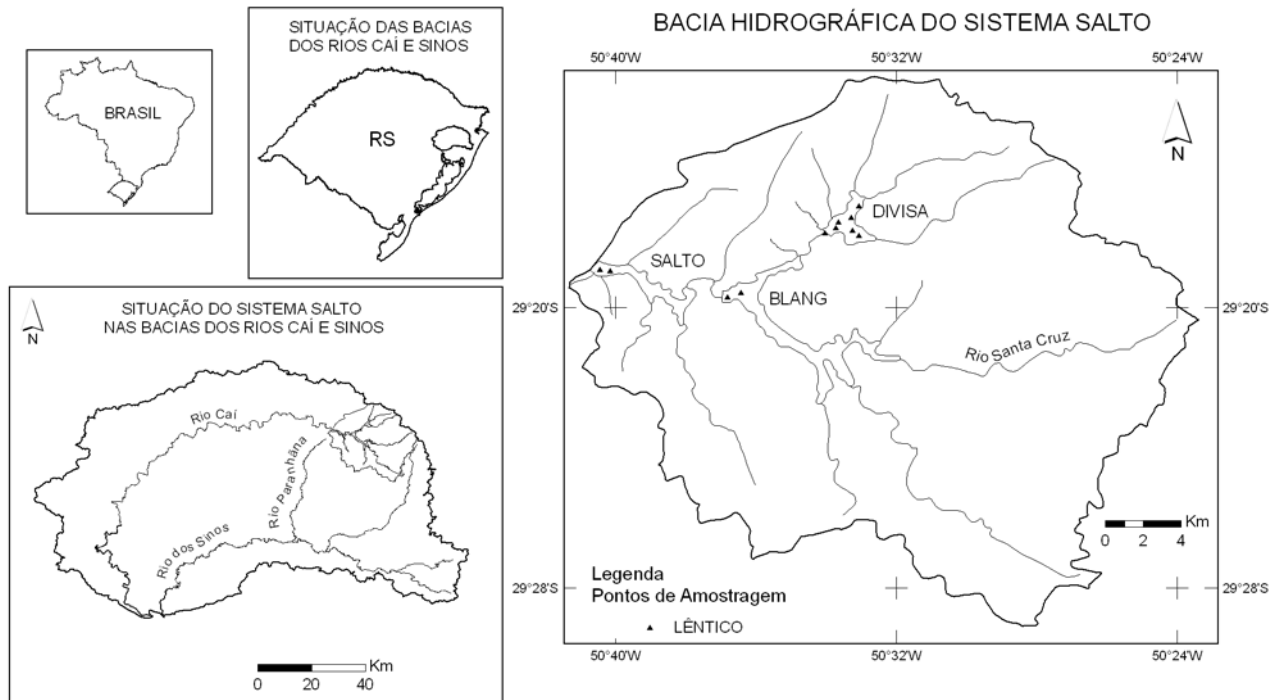


Figura 1 - Localização do Sistema Salto e pontos de amostragem.

A ocorrência de uma floração de *Cylindropemopsis raciborskii* no verão/outono de 1999 nas bacias hidrográficas dos rios Cai e Sinô, originada no reservatório Blang, motivou a Companhia Riograndense de Saneamento - CORSAN - a adotar medidas complementares ao tratamento de água convencional para garantir a qualidade da água tratada e evitar efeitos adversos à saúde pública (Conte *et al.*, 2000). Ainda segundo esses autores, a floração estaria associada, provavelmente, ao baixo índice pluviométrico ocorrido nos anos de 1998 e 1999, que teria ocasionado depleção do nível de água da barragem e aumento da concentração de nutrientes, e a elevação da temperatura seria responsável pelo desenvolvimento da floração.

A referida estiagem foi atribuída ao fenômeno La Niña, que devido ao resfriamento anômalo das águas superficiais do Oceano Pacífico, provocou estiagem na região sul do Brasil na primavera e início do verão do seu ano de início (1998), bem como no final do outono e inverno do ano seguinte (1999) (Fontana & Berlatto, 1997).

No período compreendido entre 2001 e 2003, os reservatórios do Sistema Salto apresentaram características oligotróficas a mesotróficas, com baixo crescimento fitoplanctônico e limitação da pro-

duzibilidade primária por fósforo (Carvalho *et al.*, 2003).

#### Amostragem e qualidade da água

A amostragem foi realizada em janeiro de 2003 e consistiu de perfis verticais com medidas de 0,5 × 0,5 m de parâmetros físico-químicos da coluna de água (temperatura, oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica (CE), sólidos dissolvidos, pH e potencial redox (Eh)), através de sonda multiparâmetros Hydrolab (modelo Quanta), e coleta de água em garrafa *Van Dorn* para análises de fósforo total (PT), turbidez e clorofila-a, de 1 × 1 m, sendo que a clorofila-a foi analisada apenas na zona fótica. As amostras foram refrigeradas desde o momento da coleta até a realização das análises, seguindo as recomendações propostas em Standard (1999).

#### Análises Químicas

As análises de fósforo total em águas foram realizadas após digestão com persulfato de potássio em meio ácido e determinação por ácido ascórbico, através de leituras de absorbância em espectrofotômetro UV Varian (modelo Cary 1E). A turbidez foi determinada pelo método nefelométrico, através de

turbidímetro Micronal (modelo B250). A clorofila-a foi determinada após extração do pigmento em acetona 90%, de acordo com Standard (1999).

### Circulação da água hipolimnética

O reservatório Divisa foi escolhido para investigar a possibilidade de circulação da água hipolimnética, em função de: i) ser o primeiro da série em cascata (o que exclui outras fontes que não as nascentes, bem como a descarga de fundo à montante); e ii) dispor de batimetria, necessária ao cálculo dos números adimensionais que refletem a estabilidade do corpo de água.

#### Nº de Burger (Si)

Demonstra a influência da rotação da Terra sobre a dinâmica dos movimentos da água, prevendo a importância das correntes horizontais de larga-escala e dos giros induzidos pelo vento (Antenucci & Imberger, 2001). Para valores de  $Si < 1$ , a rotação afeta a hidrodinâmica, enquanto que para  $Si > 1$ , a rotação não afeta a hidrodinâmica.

$$Si = \frac{c_i}{L \cdot f}$$

Onde: Si - Número de Burger;  $c_i$  - velocidade da fase da onda; L - largura do lago; e f - frequência inercial na latitude do lago (constante).

$$c_i = \sqrt{\frac{g' h_1 h_2}{H}}$$

Onde:  $g'$  - gravidade reduzida;  $h_1$ ,  $h_2$  - profundidade da camada superior e inferior; e H - profundidade total.

$$g' = \left( \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right) g$$

Onde:  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  - densidade média da água nas camadas superior e inferior; g - aceleração da gravidade.

#### Nº de Wedderburn (W)

Introduzido por Thompson & Imberger (1980), representa a força restauradora do centro volumétrico do lago, em relação ao distúrbio induzido pelo vento. Se  $W > 1$ , não ocorre afloramento da termoclina e, se o vento é tal que  $W < 1$ , então a termoclina superficial pode aflorar na direção con-

trária a do vento e a água metalimnética pode ser trazida para a superfície (Imberger, 2001).

$$W = \frac{g \cdot \delta' \cdot h^2}{u_*^2 \cdot L}$$

Onde:  $g \cdot \delta'$  - densidade diferencial através da termoclina; h - profundidade da termoclina;  $u_*$  - velocidade friccional induzida pelo vento.

$$u_* = \left( \frac{\rho_{ar}}{\rho} \cdot C_D \cdot u^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Onde:  $\rho_{ar}$ ,  $\rho$  - densidade média do ar e da água;  $C_D$  - coeficiente de resistência (constante); u - velocidade do vento.

#### Nº de Lago (LN)

Incorpora a variável batimetria irregular, conduzindo a uma previsão robusta a respeito do afloramento da água hipolimnética (Imberger & Patterson, 1990). Um valor de  $LN > 1$ , indica que há estabilidade da coluna de água, caso contrário, vento e ondas podem causar a inversão da coluna de água.

$$LN = \frac{S_t \cdot (H - h_T)}{A_s^{3/2} \cdot (H - h_v) \cdot u_*^2}$$

Onde:  $L_N$  - Número de Lago;  $S_t$  - parâmetro de estabilidade;  $h_T$  - altura do fundo do lago até a termoclina;  $h_v$  - altura do centro volumétrico do lago;  $A_s$  - área superficial.

$$S_t = \frac{1}{\rho} \int_0^H g(h_v - z) \rho(z) A(z) dz$$

Onde: z - altura da camada;  $\rho(z)$  - densidade da água na camada;  $A(z)$  - área da camada; dz - variação de altura da camada.

$$h_v = \frac{\int_0^H z A(z) dz}{\int_0^H A(z) dz}$$

**RESULTADOS**

**Estratificação da coluna de água**

A estratificação térmica do reservatório Divisa divide a coluna de água em três camadas, uma superior com elevado gradiente de temperatura, uma intermediária onde a temperatura se mantém aproximadamente constante e a inferior, mais fria e densa, onde prevalecem condições anóxicas, conforme demonstram os perfis de OD e Eh, este último, se tornando negativo em função da depleção do OD (Figuras 2, 3 e 4).

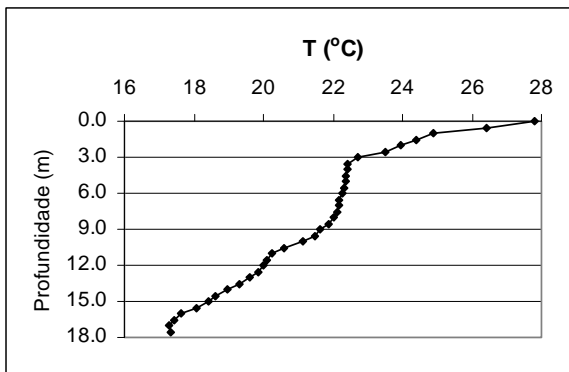


Figura 2 - Perfil de temperatura (T) da água na coluna de água do reservatório Divisa.

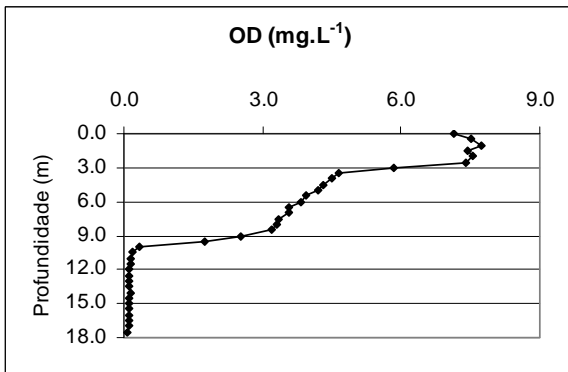


Figura 3 - Perfil de oxigênio dissolvido (OD) na coluna de água do reservatório Divisa.

Crescem com a profundidade, a condutividade elétrica, a turbidez e os teores de PT dissolvido (Figuras 5, 6 e 7). O pH se mostra mais elevado na superfície em função da produtividade fotossintética e no fundo em função da presença de MO, que

confere resistência ao rebaixamento do pH (Figura 8).

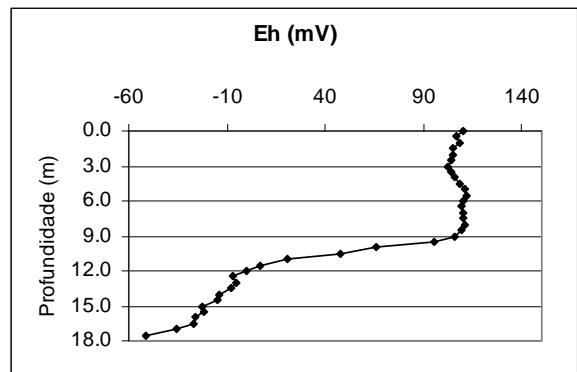


Figura 4 - Perfil de potencial redox (Eh) na coluna de água do reservatório Divisa.

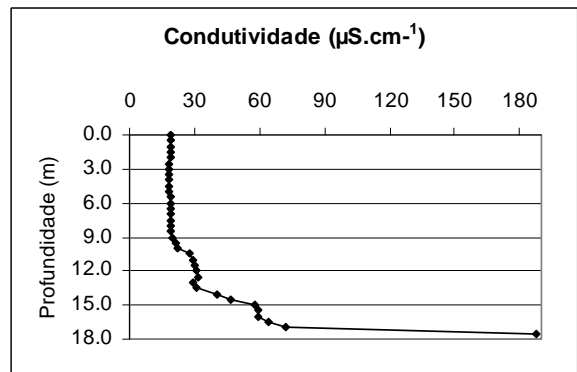


Figura 5 - Perfil de condutividade elétrica na coluna de água do reservatório Divisa.

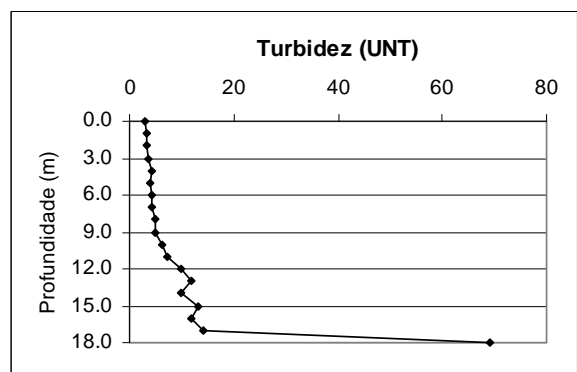


Figura 6 - Perfil de turbidez na coluna de água do reservatório Divisa.

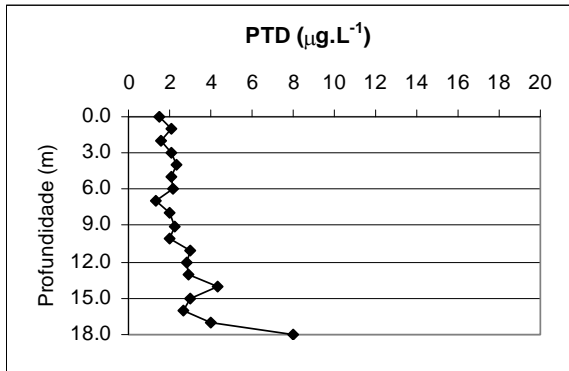


Figura 7 - Perfil de fósforo total dissolvido (PTD) na coluna de água do reservatório Divisa.

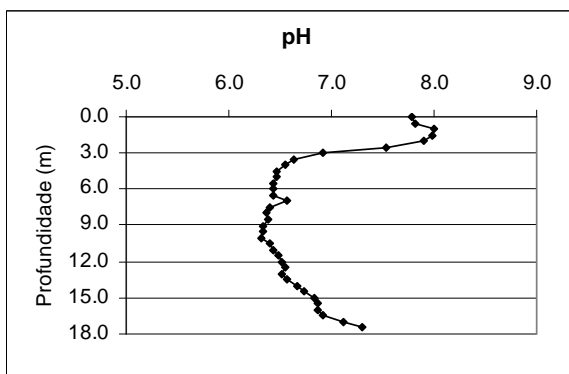


Figura 8 - Perfil de pH na coluna de água do reservatório Divisa.

O Eh da coluna de água diminui com a profundidade, prevalecendo condições redutoras dos 10 aos 18 metros, ou seja, em toda a parte inferior da coluna de água. A clorofila-a foi analisada somente na zona fótica (onde atuam os efeitos da insolação), na ocasião com 3 metros de profundidade, apresentava valores crescentes do pigmento.

Os reservatórios do Sistema Salto demonstraram concentrações de fósforo total em águas superficiais inferiores a 10 µg.L<sup>-1</sup>, no período de 2001 a 2003, condições essas praticamente limitantes com relação ao fósforo (Carvalho *et al.*, 2003).

### Estimativas de circulação

A possibilidade de transporte de fósforo do hipolimnio para as camadas superiores da coluna de água foi investigada a partir de números adimensionais que classificam o regime hidrodinâmico, através de dados como batimetria, área superficial, morfo-

logia de fundo, volume do lago e perfis verticais de características físico-químicas da coluna de água.

Na ocasião, os reservatórios se encontravam estratificados física e quimicamente, conforme demonstrado nas Figuras 2, 3 e 4. Devido à pouca profundidade e para efeito de simplificação, se considera estratificação em duas camadas, uma superior até a termoclina e outra inferior abaixo desta.

### Influência da rotação da Terra

A estimativa do Número de Burger (Si) no Divisa demonstrou que a rotação da Terra não afeta a dinâmica dos movimentos da água dentro do reservatório (Si= 1,15). As oscilações internas são características de *seiches* gravitacionais, ou oscilações rítmicas de curto período, análogas à oscilação livre da água numa bacia, que podem ser induzidas por uma grande variedade de causas, entre as quais o vento, tendo como força restauradora a ação da gravidade.

### Afloramento da água hipolimnética

A incidência do vento sobre a superfície da água, em um corpo de água estratificado, faz com que a mesma se mova, num primeiro momento, na mesma direção. Esse movimento da água superficial sendo arrastada sobre os limites do corpo de água causa afundamento do nível de água a favor do vento, e afloramento do contorno na direção contrária (Imberger, 2001).

De acordo com a Tabela 1, para velocidades de vento entre 20 - 40 km.h<sup>-1</sup>, o Número de Wedderburn (W >1) indica que o afloramento da termoclina (*upwelling*) não é provável. Neste caso, a estratificação de temperatura e densidade resultam em estabilidade da coluna de água, situação em que os movimentos induzidos pelo vento dificilmente se refletem para o interior do corpo de água estratificado. Entretanto, acima de 60 km.h<sup>-1</sup> o afloramento da termoclina poderia ocorrer, trazendo a água metalimnética para a superfície.

Tabela 1 - Números de Wedderburn (W) e de Lago (LN) calculados para previsão de cenários.

Parâmetro	u (km.h <sup>-1</sup> )			
	20	40	60	250
W	7,15	1,79	0,79	0,05
LN	155,12	38,78	17,24	0,99

Onde: u – velocidade do vento.

A água metalimnética se situa abaixo da termoclina em posição superior à água hipolimnética e pode ser muito rica em nutrientes, sendo muito comum o desenvolvimento do chamado ‘prato nítrico’ no metalímnio, devido à nitrificação ou desnitrificação das populações bacterianas metabolicamente ativas (Jorgensen & Vollenweider, 2000).

O Número de Lago (LN) demonstra que, para as velocidades de vento usuais, a estratificação é forte e se sobrepõe à força do vento. Somente velocidades extremas (acima de 250 km.h<sup>-1</sup>) (Tabela 1), sob vento suficientemente constante, poderiam causar inversão da massa líquida trazendo a água residente no hipolímnio à superfície na direção contrária a do vento (Imberger, 1998).

O transporte de sedimentos e nutrientes associados, do hipolímnio para as camadas superiores da coluna de água, seria improvável devido à estabilidade do corpo hídrico estratificado, a menos que sob velocidades de vento excepcionais. No entanto, o número de Lago é comumente aplicado em lagos grandes, onde a rotação da Terra exerce influência sobre as massas de água. Sua aplicação em corpos de água pequenos, como é o caso do reservatório Divisa, pode não ser apropriada, mas sugere que sob velocidades de vento atípicas, como no caso de ciclones extratropicais, a inversão da massa líquida poderia ocorrer.

Vale mencionar que a região foi noticiada por danos sofridos com a passagem do ciclone extratropical Catarina em 27/03/2004, que apresentou ventos de até 180 km.h<sup>-1</sup>, tendo sido também classificado como um furacão de categoria 2, já em fase final de desenvolvimento (INPE, 2006).

Em condições ambientais normais, a inversão da massa líquida estratificada seria improvável, apenas o afloramento da termoclina trazendo a água metalimnética, que pode ser mais rica em nutrientes do que a água superficial, poderia ocorrer em situações de vento moderado a forte (acima de 60 km.h<sup>-1</sup>).

Na floração ocorrida no verão de 1999, as condições ambientais de estiagem podem ter ocasionado elevação da concentração de nutrientes existentes no meio, porém, a fertilização das águas também poderia ter sido desencadeada pela abertura da comporta de fundo do reservatório Divisa, imediatamente à montante, cuja vazão de fundo, rica em nutrientes, poderia causar impacto ainda maior aportando diretamente a superfície do reservatório Blang sob efeito da estiagem.

## CONCLUSÕES

A ocorrência de estratificação físico-química da coluna de água em três camadas foi demonstrada através de perfis verticais de temperatura e parâmetros como OD, pH, CE e Eh. As concentrações de PT aumentaram com a profundidade, assim como a CE, a turbidez e a clorofila-a, que é maior no metalímnio do que no epilímnio.

A possibilidade de circulação da água metalimnética foi confirmada, porém, a inversão da massa líquida dificilmente ocorreria. Apenas em situações em que o vento fosse excepcionalmente forte e duradouro, como no caso da passagem de ciclones extratropicais severos, a fertilização da coluna de água poderia ser induzida pelo transporte de substâncias do hipolímnio.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo financiamento do Projeto.

## REFERÊNCIAS

- ANTENUCCI, J. & IMBERGER, J. 2001. On internal waves near the high-frequency limit in an enclosed basin. *J. Geophys. Res.* 106:22465-22474.
- CARVALHO, E.N.; CYBIS, L.F.; YUNES, J.S.; MERTEN, G.H.; FRANZEN, M. 2003. O fósforo como um elemento limitante do crescimento fitoplanctônico nos reservatórios do Sistema Salto de Hidrelétricas (RS). *In: Anais... IX Congresso Brasileiro de Limnologia*, Juiz de Fora, MG.
- CONTE, S.M.; RABELO, I.M.M.; GIORDANI, A.T.; DEWES, W. 2000. Ocorrência de *Cylindrospermopsis raciborskii* nas bacias hidrográficas dos rios dos Sinos e Cai, Rio Grande do Sul, Brasil. *In: Anais... XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Porto Alegre.
- ESTEVES, F.A. 1998. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência. 602 p.
- FONTANA, D.C. & BERLATO, M.A. 1997. Influência do El Niño Oscilação Sul sobre a precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de*

- Agrometeorologia, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 127-132.
- FRANZEN, M.; CYBIS, L.F.; MERTEN, G.H.; CARVALHO, E. 2004. Possíveis causas de disponibilização de fósforo nos reservatórios do Sistema Salto (RS). *In: Anais...*, I Simpósio Ecologia de Reservatórios, Avare. (SP).
- GRIMM, A.M. et al. 1996. Anomalias de precipitação no Sul do Brasil em eventos La Niña. *In: Anais...*, IX CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, Campos do Jordão. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, v. 2., p. 1113-1117.
- IMBERGER & PATTERSON, 1990. Physical limnology. *Adv. Appl. Mech.* 27:303-475.
- IMBERGER, J. 1998. Physical Process in lakes and oceans. *Coastal Estuarine Stud.* 54, Washington, DC: Am. Geophys. Union.
- IMBERGER, J. 2001. **Characterizing the dynamical regimes of a lake.** Perth: The University of Western Australia.
- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - Núcleo de Pesquisa e Aplicação de Geotecnologias em Desastres Naturais e Eventos Extremos (2006). Desastres: Furacão Catarina. <http://www.inpe.br/crs/geodesastres/desastre2.php> (Página visitada em 16/08/2009).
- JORGENSEN, S.E.; VOLLENWEIDER, R.A.(Ed.). 2000. **Princípios para o gerenciamento de lagos.** São Carlos: ILEC. 202 p.
- STANDARD methods for examination of water and wastewater. 1999. 20<sup>th</sup> ed. Washington: American Public Health Association.
- STRASKRABA, M.; TUNDISI, J.G. (Ed.). 2000. **Gerenciamento da qualidade da água de represas.** São Carlos: ILEC/IIIE. 258 p. (Diretrizes para o Gerenciamento de Lagos, v. 9)
- THOMPSON, R.O.R.Y.; IMBERGER, J. 1980. Response of a numerical model of a stratified lake to wind stress. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRATIFIED FLOWS*, 2., 1980, Trondheim. **Proceedings.** Trondheim: Tapir. p. 562-570.
- WETZEL, R.G. 1983. **Limnology.** 2nd ed. Philadelphia: Saunders College. 760 p.
- WÜEST, A. & LORKE, A. 2003. Small scale hydrodynamics in lakes. *Annu. Ver. Fluid Mech.*, 35:373-412.

## ***Movement of Hypolimnetic Water in the Divisa Reservoir of the Salto System in Rio Grande do Sul, Brazil***

### **ABSTRACT**

*The Divisa, Blang and Salto chain of reservoirs form the Salto System of hydroelectric plants, located in Sao Francisco de Paula, Rio Grande do Sul, Brazil. In the summer of 1999, a toxic algae bloom originated at Blang reservoir, contaminating the water supply reservoirs of six municipalities downstream and required special water treatment methods. This event led to the investigation of the possible sources of nutrients, particularly phosphorus, identified as the limiting nutrient. These reservoirs are located in a headwaters region with a humid subtropical climate, rural land use pattern and low demographic density. In the period between 2001 and 2003, monitoring demonstrated good water quality, with oligotrophic and mesotrophic characteristics. The investigation of the possible causes of water fertilization considered external sources (mainly non-point sources) and the internal source represented by the organic, nutrient-rich bottom sediment. The present work seeks to characterize the physical-chemical stratification of the water column and investigate the possibility of hypolimnetic water circulation under stratified conditions. In order to carry out the study, vertical profiles of parameters that indicate the physical-chemical stratification were obtained, such as temperature, dissolved oxygen and redox potential, in addition to total dissolved phosphorus and turbidity from the surface to the hypolimnion and chlorophyll-a in the photic zone. The circulation of hypolimnetic water was examined through bathymetry and dimensionless numbers that reflect the stability of the stratified body of water. Results indicate that hypolimnetic water circulation is not likely to occur under stratification, because only extreme climate events could generate winds strong enough to invert the liquid mass. The circulation of metalimnetic waters is a more likely possibility, as moderate winds could ascend the thermocline. However, the transfer of dissolved phosphorus from the hypolimnion to the reservoirs downstream could occur when the reservoir bottom gates are open to regulate discharges, which is a frequent occurrence during drought periods.*

**Key-words:** *physical limnology, cascade reservoirs, phosphorus, algae bloom.*