

O Processo de Mistura em Reservatórios do Semi-Árido e sua Implicação na Qualidade da Água

Francisco de Assis de Souza Filho, Eduardo Sávio Passos Rodrigues Martins

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, Brazil

assisfilho@funceme.com.br; esm@secrel.com.br

Mônica Porto

Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil

mporto@usp.br

Recebido: 11/04/06 – revisado: 28/06/06 – aceito: 21/08/06

RESUMO

O monitoramento da água é realizado em amostragens temporais e espaciais tanto no que se refere a aspectos quantitativos como qualitativos. Para ser eficiente, a amostragem deve considerar processos físicos, químicos e biológicos que afetam os parâmetros de interesse. O monitoramento da qualidade de água para reservatórios do Ceará, localizados no semi-árido do Brasil, é atualmente realizado mensalmente com base em medidas de perfis verticais para alguns parâmetros físicos e químicos, e em um ponto amostral (próximo a superfície d'água) para todos os outros parâmetros. O objetivo deste artigo é descrever o processo de mistura em lagos em baixas latitudes e estabelecer critério para o monitoramento de qualidade de águas nestas regiões. É demonstrado que a estratificação e a mistura ocorrem em um ciclo diurno governado por variáveis climáticas, tais como radiação solar e vento. Assim, a variabilidade mensal não é somente devido à variabilidade sazonal, mas também a diferenças no horário da medida realizada. Como um resultado, a estratégia de monitoramento deve levar em consideração a variabilidade diurna de tais parâmetros e dos processos de mistura e estratificação, definindo, por exemplo, uma hora padrão para a medida, o que pode ser muito caro e operacionalmente impossível.

Palavras-chave: Qualidade da água; reservatórios; semi-árido.

INTRODUÇÃO

O gerenciamento dos recursos hídricos tem como um de seus instrumentos o monitoramento da água em seus aspectos quantitativos e qualitativos. O monitoramento, freqüentemente por razões técnicas ou de custo, é realizado com a amostragem no tempo e no espaço de parâmetro que se deseja conhecer. Esta amostragem para ser eficiente deverá levar em consideração os processos físicos, químicos e biológicos relevantes que influenciam o parâmetro a ser analisado.

O monitoramento da qualidade da água atualmente realizado em reservatórios do semi-árido tem freqüentemente uma base de medição mensal, com o levantamento de parâmetros físico-químicos realizados em um perfil vertical e uma análise com maior quantidade de parâmetros realizada com amostra de água próxima à superfície nas proximidades da barragem de terra.

O presente trabalho tem como objetivo descrever o processo de mistura em lagos de baixas latitudes e estabelecer condicionantes para uma política de monitoramento da qualidade da água em regiões similares.

A hipótese que se busca demonstrar neste trabalho é o comportamento polimítico dos reservatórios do semi-árido com estratificação e desestratificação no período diurno. Esta estratificação/desestratificação está associada ao efeito da radiação solar e dos ventos. A estratificação devido a saís não se apresentou no período seco, objeto da presente análise.

As implicações desta hipótese para o monitoramento são diversas. As diferenças de medição entre os meses podem estar associadas não somente a uma esperada mudança sazonal na qualidade das águas nos lagos, mas também à hora de medição. A situação de pior qualidade da água no reservatório pode não ser identificada a partir das medições mensais, ou a medição pode apresentar qualidade da água muito ruim, fato que pode ser

associado a um episódio de curto prazo. Neste sentido esta hipótese de mistura dos lagos indica que se deve construir um procedimento para o monitoramento de qualidade da água mais compatível com a evolução temporal do processo de mistura e da qualidade da água daí resultante.

ESTUDOS ANTERIORES

Os padrões de estratificação da coluna d'água são muito variáveis, mesmo em ecossistemas localizados em uma mesma região, porque além de fatores climatológicos, fatores inerentes ao próprio ecossistema (por ex. morfometria) têm papel importante.

Esteves (1998) diz que em lagos de regiões tropicais, os fenômenos de estratificação da massa d'água ocorrem de maneira diferenciada daqueles de regiões temperadas. Nestes lagos tropicais, o mais comum é a ocorrência de estratificação e desestratificação diária ou estratificação durante a primavera, verão e outono com desestratificação no inverno. A variação sazonal de temperatura é pouco acentuada em relação à variação diária e os lagos têm profundidade reduzida. Estas características produzem um processo de estratificação e desestratificação diária, ou seja, a estratificação se desenvolve no período do dia, culminando com o máximo de estabilidade térmica por volta das 16-17 horas e desestratificação noturna, devido a perda de calor para a atmosfera. A diferença de temperatura entre epilímio e hipolímio é pequena. O açude Bodocongó (Paraíba) com apenas 3°C de diferença de temperatura entre as camadas, mostrou estratificação tão estável quanto aquela observada no lago Anderson (EUA), com 16°C de diferença (Esteves, 1998). Os lagos costeiros em regiões tropicais apresentam-se normalmente desestratificados e alguns lagos profundos podem apresentar estratificação permanentemente.

Hondzo e Stefan (1996) estudaram a dependência entre a qualidade da água e os habitats de peixes, e entre a morfometria dos lagos e os fatores meteorológicos. Concluíram neste estudo que: (i) a temperatura máxima da superfície da água é definida primeiramente pelas condições meteorológicas, e secundariamente pela geometria do lago, não tendo as condições tróficas do lago influência significativa; (ii) a temperatura máxima próxima ao fundo do lago tem na geometria do lago fator determinante juntamente com as condições meteorológicas; (iii) observou-se pelo uso da

razão geométrica ($As^{0.25}/H_{max}$; As é a área da superfície do lago e H_{max} é a profundidade máxima do lago) que para valores desta razão superiores a oito, os lagos permaneciam permanentemente desestratificados; (iv) o oxigênio dissolvido na superfície está relacionado ao valor de saturação do OD, à morfologia do lago e ao estado trófico; (v) o oxigênio dissolvido no fundo do lago está relacionado à morfologia do lago e ao estado trófico. As relações entre as características morfométricas e a temperatura da água, OD e outros constituintes da qualidade da água são desenvolvidas em estudos como Lathrop e Lille (1980), Gorham e Boyce (1989), Nurnberg (1988) e Demers e Kalff (1993).

A hipótese de Thienemann, Esteves (1998:149), estabelece a relação entre o volume do epilímio e hipolímio como fator determinante do estado trófico. Esteves (1998) diz que esta hipótese, válida para reservatórios de clima temperado, não o é para lagos tropicais. Este fato foi observado inicialmente por Ruttner (1931) apud Esteves (1998) que justificou este fato com base no acréscimo das velocidades das reações com o aumento da temperatura; a temperatura do hipolímio em lagos tropicais é pelo menos 20°C mais elevada do que a do hipolímio de lagos temperados e, conseqüentemente, a decomposição da matéria orgânica morta no hipolímio de um lago tropical é de quatro a nove vezes mais rápida do que a no hipolímio de um lago temperado. Este fato implica, portanto, em um consumo de oxigênio de 4 a 9 vezes maior no hipolímio de um lago tropical. A elevada temperatura dos lagos tropicais proporciona condições favoráveis para que ocorram elevadas taxas de decomposição. Este fato indica que os perfis de OD não refletem a magnitude da produção primária. Assim, em lagos tropicais o perfil vertical é determinado, principalmente, pela alta temperatura e pelas características morfométricas do lago. Morfometria esta que favorece ou dificulta a ação do vento. Os déficits do OD são influenciados pela duração do período de estratificação térmica e pela concentração de matéria orgânica (dissolvida e particulada) da água.

Barbosa (1981) diz que as variações no período de 24 horas assumem papel fundamental na caracterização dos corpos d'água por influenciarem em processos biológicos e bioquímicos. O padrão de variação sazonal, típico para ecossistemas aquáticos temperados, assume menor importância em regiões tropicais, em detrimento das variações diárias. Esteves (1998) apresenta o padrão de variação diária na Lagoa do Infernã (SP) em que a concentração de OD é máxima no hipolímio no

período de 11hs às 15hs, ocorrendo redução na OD no hipolímnio e epilímnio na madrugada e início da manhã (8hs). As variações bruscas no OD nos lagos tropicais fazem com que os peixes passem a se localizar principalmente no epilímnio. Souza Filho et al (1999) realizaram estudo preliminar analisando esse fator em reservatórios do Estado do Ceará.

DADOS BÁSICOS

Utilizou-se como base de dados o monitoramento de parâmetros de qualidade da água do reservatório Frios durante um ano. Este reservatório localiza-se na Bacia do Rio Curu, Ceará, com uma bacia de contribuição de 277 km², um volume máximo de 33 hm³, e profundidade máxima da ordem de 20 m. Neste período foram realizadas medições na estação seca em quatro pontos do reservatório, mostrados na Figura 1 (FR1, FR2, FR3 e FR4). Foram realizadas no período seco de Julho a Dezembro quatro campanhas de medição. Observa-se que nos rios intermitentes do semi-árido a vazão é zero no período seco.

A amostragem foi realizada em dois sistemas, um com periodicidade mensal denominado de Campanhas Mensais (CM) e um outro sistema de amostragem que obteve dados com periodicidade horária durante três dias consecutivos de medição, denominado de Campanha de Três Dias (CTD).

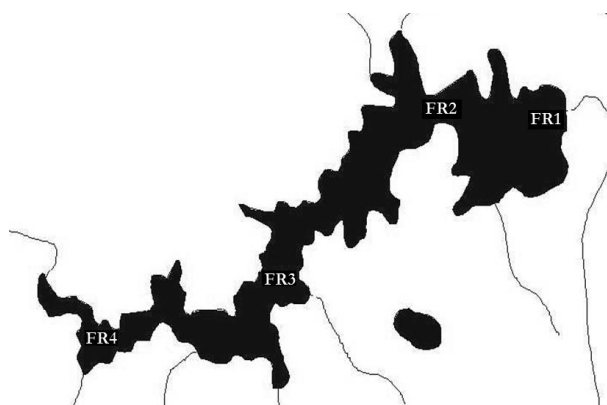


Figura 1 – Localização dos pontos de coleta de dados de qualidade da água.

As CM de medição foram realizadas com um levantamento de perfis de parâmetros físico-químicos da qualidade da água em quatro pontos

já apresentados na Figura 1. As campanhas de medição foram realizadas em 31/07/2001, 15/08/2001, 28/09/2001 e 15/10/2001. A Campanha de Três Dias consecutivos (CTD) foi realizada nos dias 12 a 15/10/2001 e as medições concentraram-se no ponto próximo ao reservatório.

Nestas campanhas foram medidos diversos parâmetros físico-químicos, sendo somente objeto de análise a seguir os dados dos perfis de temperatura, oxigênio dissolvido, salinidade e pH.

ANÁLISE

A Figura 2 apresenta o resultado das concentrações de oxigênio dissolvido (OD) das campanhas mensais (CM) no ponto FR1. As medidas de 28/09/01 e de 12/10/01 apresentaram a mesma concentração na superfície 5,0 mg/l. As demais medidas de concentração de OD apresentam comportamento diferenciado, sendo as de julho menores que 3,0 mg/l, e as de agosto entre 6,5 e 7,0 mg/l, próximo à superfície. Estes valores estão próximos à concentração de saturação do OD, a qual para as temperaturas observadas no lago está entre 7,5 e 8,0 mg/l. Observa-se concentração abaixo de 3 mg/l em todos os perfis para profundidades inferiores a 9,0 m. Este fato pode estar associado à demanda bentônica de oxigênio.

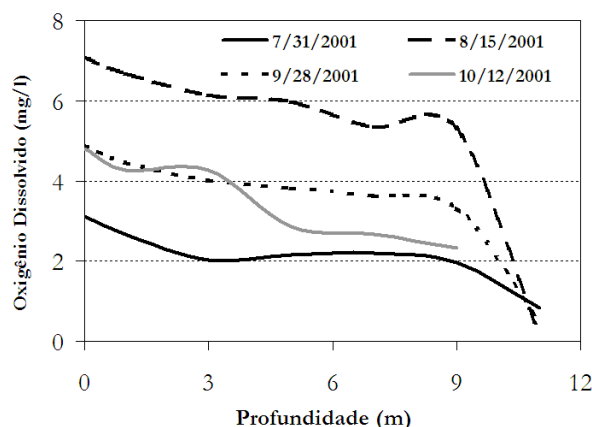
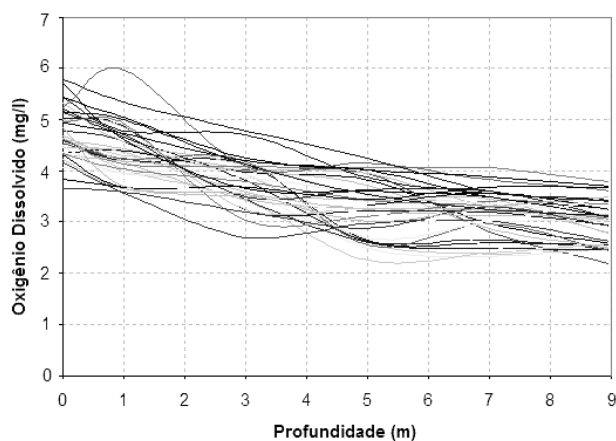


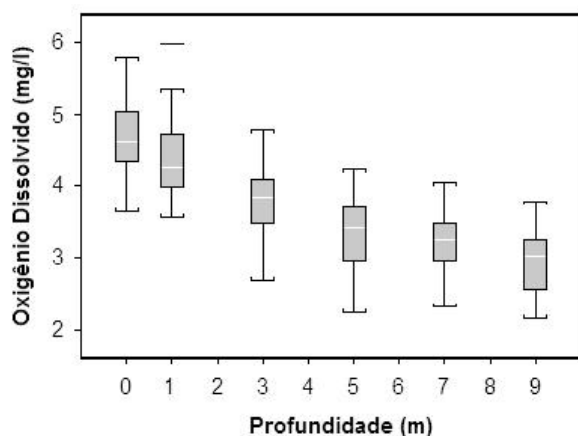
Figura 2 – Oxigênio Dissolvido em diferentes meses.

As Figuras 3a e 3b apresentam os resultados de OD para a campanha de três dias (CTD). Observam-se concentrações de OD próximo à superfície entre 3,5 e 6,0 mg/l. Esta é uma amplitude de variação próxima à observada nas CM (3,0 a 7,0

mg/l). As medidas de condutividade elétrica na CTD não apresentaram variação vertical, indicando que o reservatório está bem misturado verticalmente quanto a sais, isto é, não há estratificação salina com total ausência de quimioclina, como pode ser observado na Figura 4.



(a) Medições de Oxigênio Dissolvido durante a campanha de três dias



(b) Gráfico Box Plot das Medidas na Campanha dos Três Dias

Figura 3 – Plotagens do Oxigênio Dissolvido para diferentes profundidades na Campanha de Três Dias.

A análise das Figuras 2 e 3a sugere que a diferença dos valores mensais pode não estar vinculada a variações de um potencial ciclo mensal da qualidade da água, fato comumente observado em lagos de região temperada. A variação das medidas mensais estaria associada ao ciclo diário da qualidade da água. Devido às horas de medições serem diferentes teríamos resultados diferentes. Em outras palavras, a qualidade da água do lago pode ser

a mesma nas quatro medições, sendo a diferença associada a diferentes horas de medição. A água pode ter propriedades extremamente satisfatórias (ou ruins) em função da hora ou dia em que é realizada a medida.

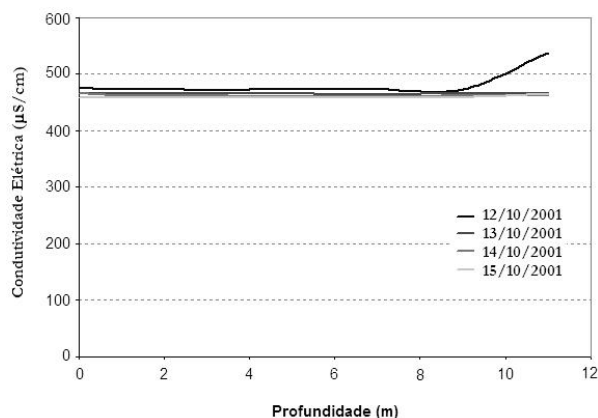


Figura 4 – Perfis da Condutividade elétrica no ponto próximo ao barramento durante os três dias de campanha.

A confirmação desta hipótese passa por quatro pontos de análise:

- a necessidade de identificação de um ciclo diário da qualidade da água;
- a identificação dos fatores climáticos e ou ambientais que modulam este ciclo;
- a verificação se estes fatores têm o mesmo comportamento nos meses sob foco (agosto a dezembro);
- a análise da possibilidade da diferença de medidas na campanha mensal ser explicada pelos fatores climáticos que modulam o potencial ciclo diário.

As Figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, a variação horária das concentrações de OD e da temperatura em diferentes profundidades no reservatório Frios.

Na Figura 5 observa-se que a concentração de OD próxima à superfície é máxima no período de 11 às 14 horas, período após o qual esta concentração torna-se mínima próximo ao fundo do reservatório.

A Figura 6 mostra que as temperaturas são máximas próximas à superfície no período de 11 às 14 horas, período onde apresenta-se a maior

variação de temperatura entre a superfície e o fundo. Esta variação de temperatura associada à redução do OD, sugere a ocorrência de estratificação térmica na coluna d'água. O gradiente de temperatura apresenta um máximo entre as profundidades de 2 e 3 metros, indicando ser esta a potencial profundidade da termoclina. Observa-se nesta figura ciclos de temperatura próximos à superfície. Estes ciclos têm período aproximadamente de 24 horas, com temperaturas máximas próximas às 14h, 37h e 60 horas. No período noturno a temperatura da superfície é menor, e a variação desta no perfil é pequena.

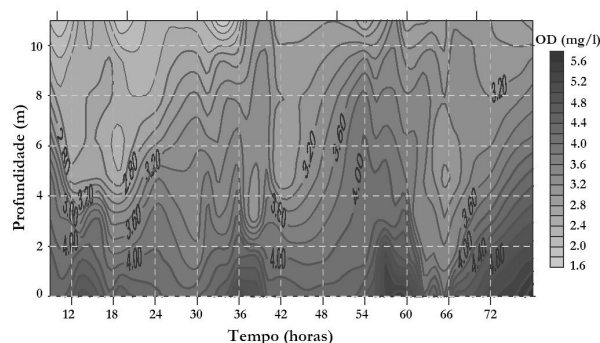


Figura 5 – Perfis de Oxigênio Dissolvido (mg/l) ao longo da campanha de três dias.

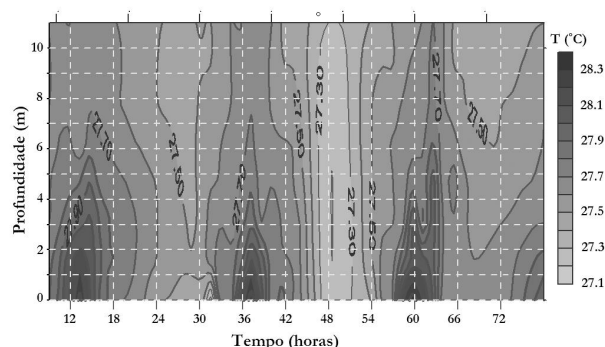


Figura 6 – Perfis de Temperatura ao longo da campanha de três dias.

O período de maior gradiente de temperatura, de 11 às 14 horas, é o mesmo período em que o OD é máximo próximo à superfície, e está associado ao período de maior diferença entre a OD da superfície e do fundo. Este fato se inicia neste período e se desenvolve no período de tempo subsequente até aproximadamente às 15/16 horas.

Observa-se no perfil de Oxigênio Dissolvido, Figura 5, o mesmo ciclo para os primeiro e segundo dias (primeiras 54 horas), estando no terceiro dia o ciclo antecipado de duas horas. Observa-se que no período noturno há uma reoxigenação das águas profundas e a ausência de gradientes de temperatura, isto é, uma desestratificação do reservatório.

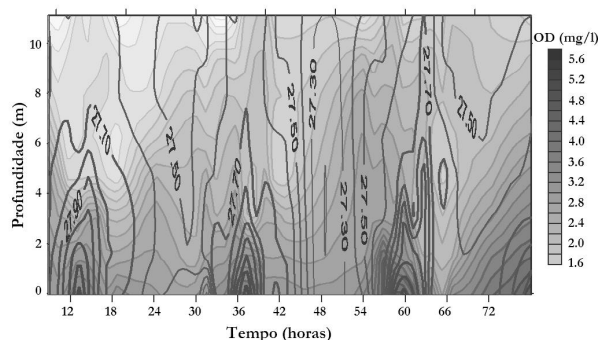


Figura 7 – Superposição dos perfis de Temperatura (isotermas) e de Oxigênio Dissolvido (escala de cinza) ao longo da campanha de três dias.

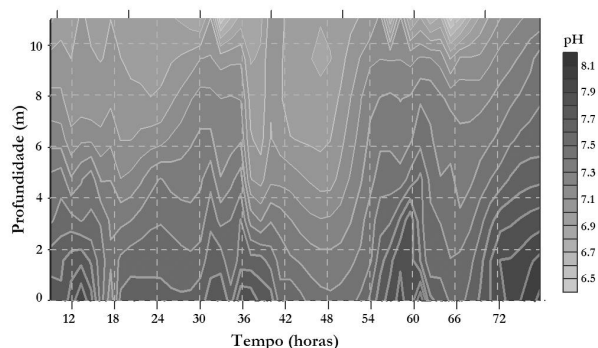


Figura 8 – Perfis de pH ao longo da campanha de três dias.

O acoplamento do OD e da temperatura descritos anteriormente pode ser observado na Figura 7. Isto é estratificação e desoxigenação do hipolímnio no período diurno de 11 às 14 horas; desestratificação (15 às 17 horas) e reoxigenação das águas profundas à noite e início da manhã quando se reinicia o ciclo. Outras variáveis da qualidade da água apresentam ciclo similar, por exemplo, o pH apresentado na Figura 8. A amplitude da variação do ciclo, porém, não foi à mesma nos três dias de medição.

A análise das variáveis meteorológicas da estação climática automática de Umirim sugere uma explicação para o processo e a diferenciação na intensidade do mesmo. A Figura 9 apresenta a variação diária da radiação solar, temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho. Observa-se variações entre os máximos diários de até 30% no valor da radiação e de até 11°C na temperatura máxima e mínima diárias nos três dias de medição.

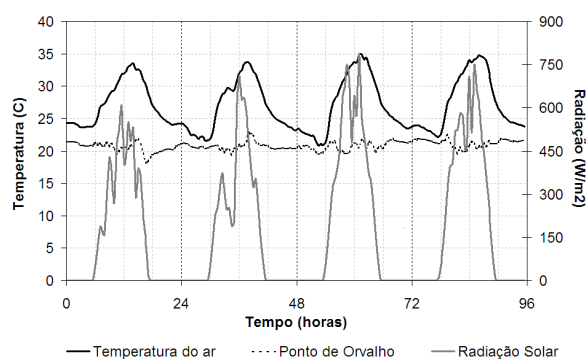


Figura 9 – Variáveis meteorológicas temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho e radiação solar.

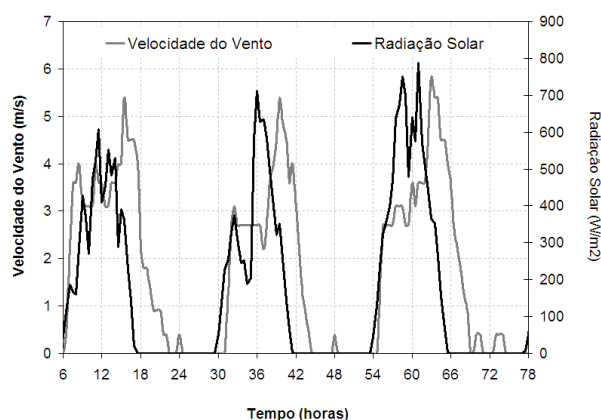


Figura 10 – Vento e Radiação Solar.

A Figura 10 apresenta a evolução da radiação e da velocidade do vento. Observa-se um ciclo diário do vento. As maiores intensidades de vento localizam-se à tarde, normalmente após as 15 horas. A combinação da radiação solar e vento explica o ciclo diário de estratificação e desestratificação do lago. A radiação solar aquece as camadas superiores de água do lago no período de sua máxima intensidade em torno do meio dia. O vento com sua rajada mais intensa entre três e cinco horas da tarde desestratifica o reservatório. A ausên-

cia de reaeração das águas mais profundas do lago entre o início da estratificação (11 horas) e seu final (17 horas) gera uma redução no OD das águas mais profundas. A quebra da estratificação possibilita a reaeração do lago. Como a intensidade dos ventos diminui, reduzindo a mistura turbulenta no lago, este processo torna-se mais lento. Rajadas de vento na noite e madrugada podem acelerar este processo.

A avaliação da estratificação dos reservatórios foi realizada a partir de dois parâmetros básicos: (i) o cálculo do número de Richardson, que caracteriza o processo de estratificação; e, (ii) o cálculo da velocidade de aprofundamento da região misturada quando há variação brusca de densidade devido, por exemplo, à queda da temperatura. A metodologia utilizada foi aquela proposta por Bloss e Harleman (1979).

O efeito da salinidade e temperatura sobre a densidade, de forma isolada, foi levado em consideração com vistas a analisar as alterações proporcionadas devido a cada uma delas.

A metodologia de cálculo da velocidade de penetração, assim proposta por Bloss e Harleman (1979), é feita através dos seguintes passos:

1. Dados Básicos: conhecer os valores da temperatura, condutividade da região bem misturada e da região logo abaixo do forte gradiente de profundidade, isto é, da termoclina ou quimioclina (h).
2. Velocidade do vento: utilizando dados das estações climatológicas, procurou-se representar o vento através da velocidade média do mês seguinte ao da medição.
3. Cálculo dos sólidos totais a partir da condutividade: este cálculo é feito a partir de curvas de regressão regionais ou para o reservatório em análise.
4. Cálculo da densidade na camada superior (ρ_o) e inferior: a partir dos dados observados de temperatura e salinidade, calcula-se a densidade da água.
5. Cálculo da velocidade de atrito do vento (U^*)

$$U_*^2 = C_{10} \frac{\rho_{AR}}{\rho_o} W_z^2$$

onde o coeficiente de arrasto C_{10} é igual a $1,3 \cdot 10^{-3}$; $\rho_{AR}=1,2 \text{ kg/m}^3$; ρ_o é a densidade da água e W_z é a velocidade do vento em m/s.

6. Cálculo da variação de densidade ($\Delta\rho$): diferença entre as densidades da água observadas.
7. Cálculo do número de Richardson (Ri)

$$R_i = \frac{gh\Delta\rho}{\rho_0 U_*^2}$$

onde Ri é o número de Richardson, g é a aceleração da gravidade, h é a profundidade da termoclina, $\Delta\rho$ é a variação da densidade, ρ_0 é a densidade de referência (camada superior) e U_* é a velocidade de atrito do vento.

8. Cálculo da velocidade de penetração (U_e)

$$U_e = \frac{7,1 - 0,024\sqrt{2R_i}}{3,55 + 0,25R_i^2} U_*$$

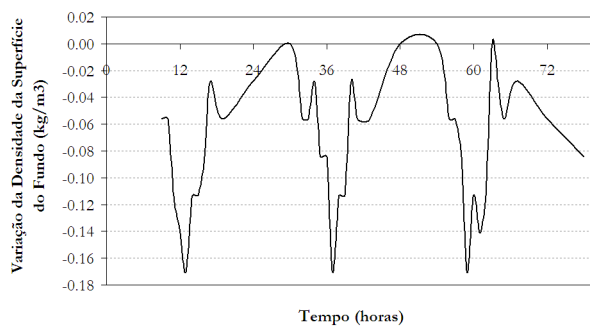


Figura 11 – Variação da Densidade da Superfície do Fundo ao longo da campanha de três dias.

A Figura 11 apresenta o gradiente de densidade entre as camadas superiores e inferiores do reservatório. Os gradientes de densidade são significativos apesar da variação de temperatura estar entre 0,5 e 1,0°C. Este fato deve-se a faixa de ocorrência da temperatura da água estar entre 27 a 29°C. Nesta faixa de temperatura a variação de um grau Celsius produz uma variação de densidade mais de cinco vezes maior que a variação de um grau à temperatura de 5°C. A Figura 12 mostra o gráfico do número de Richardson que quantifica a estratificação no reservatório e a velocidade de penetração da termoclina que avalia a força de desestratificação a que o reservatório está submetido. Os cálculos destas variáveis foram realizados conforme Bloss e Harleman (1979).

Observa-se na Figura 11, a variação da densidade da superfície do fundo, um nítido ciclo diurno com valores máximos em módulo em torno do meio dia (12h, 36h e 60h). Este ciclo da densidade está associado ao ciclo do número de Richardson apresentado na Figura 12.

Os ciclos do número de Richardson caracterizam os ciclos de estratificação e desestratificação do lago. Isto é, número de Richardson mais elevado indica que o reservatório está estratificado e números de Richardson baixos que o reservatório encontra-se misturado.

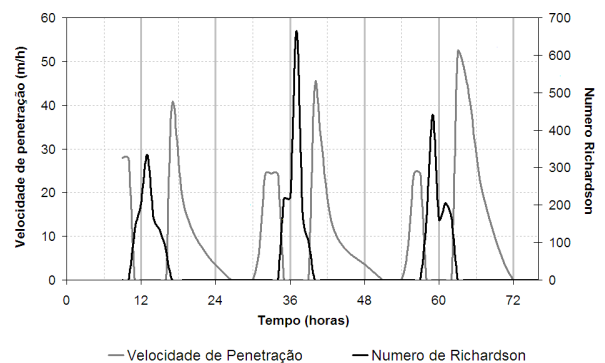


Figura 12 – Número de Richardson e velocidade de penetração.

Os ciclos diurnos de estratificação estão ligados ao balanço de energia do reservatório. Neste período do ano (estação seca) não há volume afluente aos reservatórios e as liberações são constantes durante um dia. A transferência de calor por condução, aliada a temperaturas mais altas no período diurno e mais baixas à noite, estaria associada a um processo diurno/noturno não compatível com a estratificação e a mistura no período diurno, como observado neste lago. Assim, as fontes de energia que apresentam características de variação similares à observada na temperatura e OD do lago são primeiramente a radiação solar e a velocidade do vento. As Figuras 13 e 14 apresentam as condições de radiação solar e vento, respectivamente, para os dias das campanhas mensais (CM). Na Figura 13 observa-se um nítido ciclo diurno da radiação solar com valor máximo por volta de meio dia. A Figura 14, que apresenta a evolução temporal do vento mostra que, em todos os dias, os ventos de maior intensidade ocorreram no período de 15 às 17 horas. A observação destes dois gráficos sugere a estratificação da camada superior do lago, sendo o mesmo aquecido pela radiação solar, no período da manhã até o início da tarde. A quebra desta

tarde. A quebra desta estratificação ocorre com a rajada de vento no período de 15 às 18 horas.

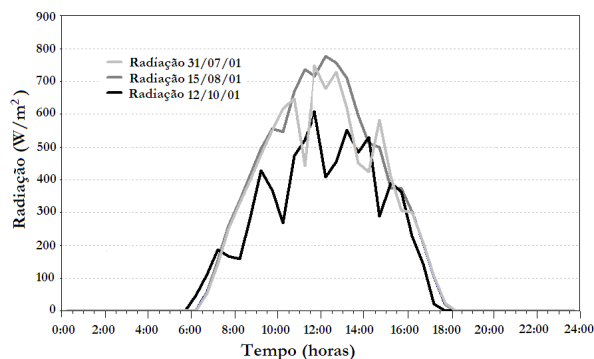


Figura 13 – Variação da Radiação Solar ao longo do dia durante as campanhas mensais.

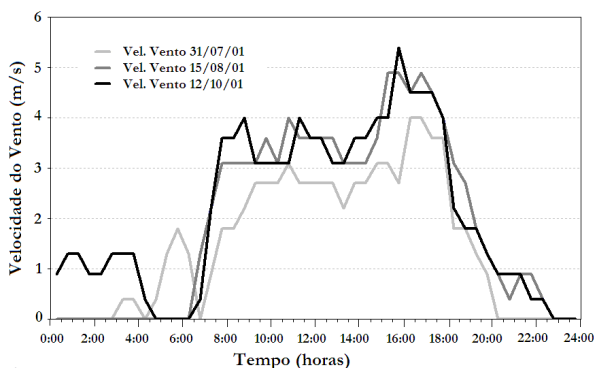
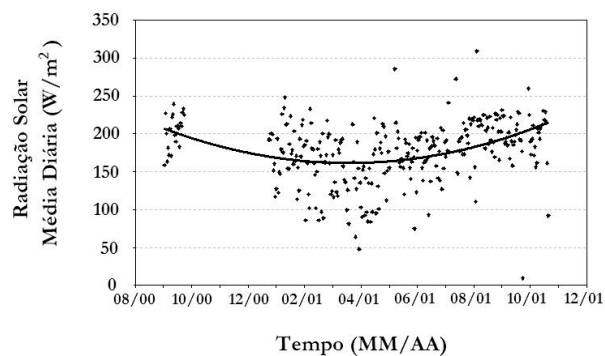


Figura 14 – Variação da Velocidade do Vento ao longo do dia durante as campanhas mensais.

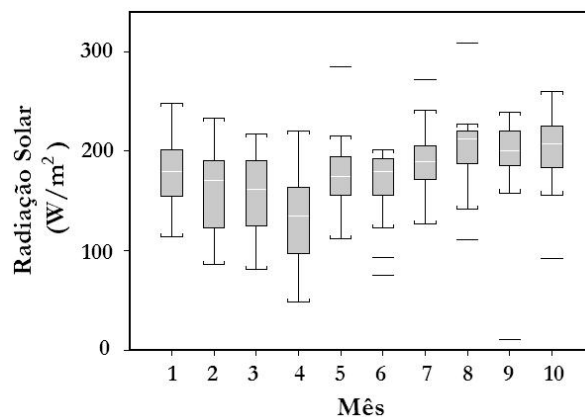
Desta forma o ciclo diário de qualidade (oxigênio dissolvido e temperatura) está associado às variáveis climáticas que definem o processo de mistura do lago: radiação solar e velocidade do vento. A variação diurna e sazonal destas variáveis é quem determina os ciclos de mistura do lago e, por conseguinte, modula a qualidade da água do mesmo.

As variações anuais da radiação solar e da velocidade do vento são apresentadas nas Figuras 15 e 16, respectivamente. Nestas Figuras são apresentados os quantis (25%, mediana, 75%) da radiação solar e velocidade do vento para diferentes meses. Observa-se que a ocorrência de velocidade dos ventos no BOX (25%, 75%) localiza-se para os meses de agosto, setembro, outubro e novembro entre as velocidades de 1,5 a 2,0m/s. Fato similar

ocorre com a radiação solar que não apresenta discrepância de valores para os referidos meses. Observa-se nestas figuras uma grande dispersão dos dados indicando uma alta variabilidade das condições de radiação e velocidade do vento entre os dias. Este é um fato relevante. Ao ciclo diurno superpõe-se a variabilidade das condições entre os dias de um mesmo mês.



(a)

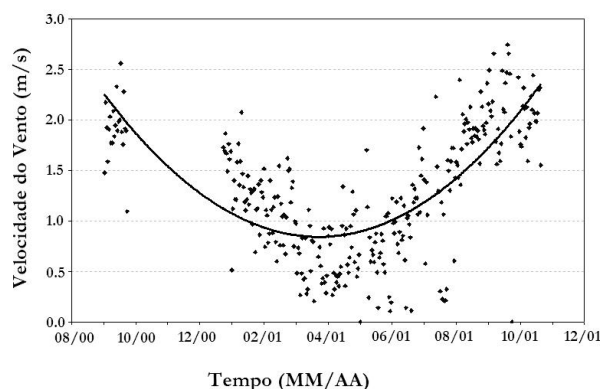


(b)

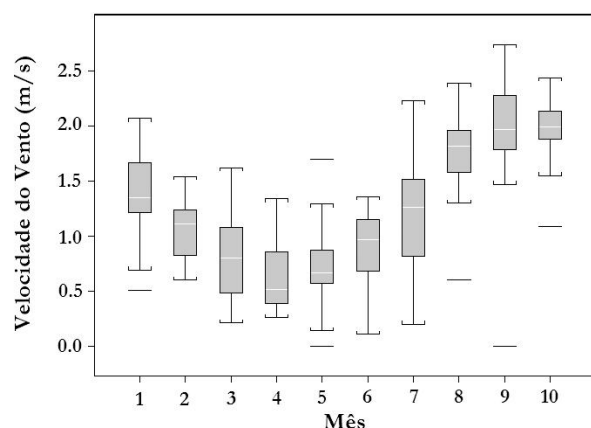
Figura 15 – Variação da radiação solar no período de setembro de 2000 a outubro de 2001.

A análise acima realizada pode ser feita com a utilização da balança mostrada na Figura 17, a qual apresenta a relação de OD no fundo do reservatório e na superfície e as principais variáveis que o influenciam. O lado direito da balança apresenta as variáveis climáticas (velocidade do vento e radiação solar) e que estas variáveis têm efeito inverso (veja que a radiação está elevada a um expoente negativo). O lado esquerdo descreve propriedades do lago, uma morfométrica (profundidade) e a outra ligada à qualidade e a associação das

mesmas. Quando há um aumento na profundidade há uma tendência de aumento da diferença entre as concentrações de OD da superfície e do fundo para as mesmas características climáticas. A balança procura mostrar como as variáveis associadas ao lago e as climáticas se relacionam.



(a)



(b)

Figura 16 – Variação da velocidade do vento no período de setembro de 2000 a outubro de 2001.

Como exemplo de aplicação da análise da balança, pode-se dizer que, para um dado lago, se a intensidade da radiação solar aumentar, a OD-fundo tende a diminuir, ou se a velocidade do vento aumentar há uma tendência de aproximação da OD-fundo da OD-superfície. A profundidade do lago na Figura 17 refere-se àquela onde a medição é realizada, e não a uma profundidade média do lago.

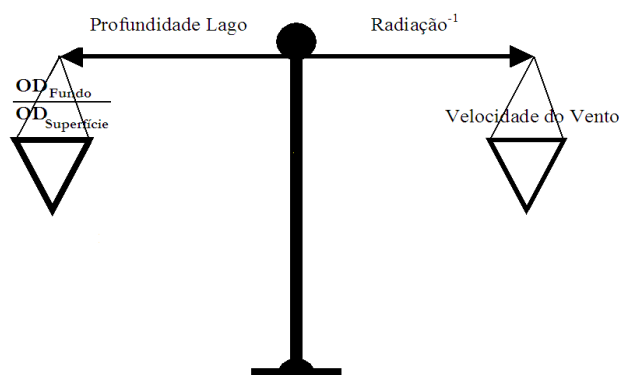


Figura 17 – Relação da OD no fundo do reservatório e na superfície e principais variáveis que o influenciam.

DESAFIOS AO SISTEMA DE MONITORAMENTO

O monitoramento tem como um de seus objetivos a possibilidade de comparar a evolução temporal da qualidade de um corpo d'água. Para que se possa realizar esta comparação deve-se considerar o ciclo diário de variação dos reservatórios e seu processo de estratificação e mistura diurnos. A variação das condições climáticas entre dias também é um fato relevante que deve ser considerado.

Como realizar esta comparação se os horários podem ser diferentes e as condições climáticas dos dias mais ou menos severas? Torna-se desejável neste cenário a possibilidade de definição de um horário padrão de medição: horário sinóptico de medição. A operacionalização deste horário fisicamente tem um custo muito elevado, pois reduziria a produtividade das equipes de monitoramento. Uma forma alternativa à medida física em um horário padrão seria a possibilidade de realizar a medida em qualquer horário e corrigir os valores medidos para o horário padrão de referência. Esta alternativa torna-se interessante, pois poder-se-ia realizar a correção em função das características climáticas, isto é, o horário padrão estaria associado a um dia padrão (definido pelas condições climáticas). Esta abordagem possibilitaria a comparação da evolução temporal da qualidade da água em um corpo d'água. Esta mesma lógica pode possibilitar a construção sintética de cenários prováveis: o pior cenário, o melhor cenário, e a avalia-

ção a construção de índices de qualidade baseado em uma única medição mensal.

Como estas correções poderiam ser realizadas? As correções podem ser realizadas com a utilização de modelos estatísticos. Uma vez estejam disponíveis séries de dados do parâmetro físico-químico de interesse (para um dado ponto de medição) e as variáveis meteorológicas que explicam sua variabilidade diurna, é possível identificar um modelo estatístico que os relacione. O objetivo aqui seria tentar explicar a variabilidade diurna do parâmetro físico-químico de interesse através de um modelo estatístico que relacione o parâmetro de interesse diretamente ao horário de medição. Assim, com este modelo identificado é possível fazer estimativas de valores para o parâmetro físico de interesse, no local de medição e horário padrão de medição previamente escolhido, a partir de uma medição realizada em horário diferente do horário padrão.

A construção de cenários pode ser realizada com modelos unidimensionais de qualidade da água em reservatórios simplificados. A construção destes modelos, porém, demanda a construção de séries temporais de medição maiores.

CONCLUSÕES

A ocorrência de um ciclo diurno nos reservatórios do semi-árido e seu impacto no monitoramento qualitativo foi apresentado neste trabalho. Faz-se necessário a incorporação deste fato no planejamento do sistema de monitoramento da região.

A evolução da modelagem da qualidade da água torna-se ferramenta imprescindível na utilização dos dados obtidos no monitoramento com vistas à construção de relatórios que indiquem as reais condições de uso e suporte para a vida dos corpos d'água.

As informações meteorológicas tornam-se decisivas na análise da qualidade da água destes reservatórios.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a FINEP pelo suporte financeiro no âmbito do projeto "Estratégia de Monitoramento de Bacias Hidrográ-

ficas: Instrumentação e Concepção de um Sistema de Gerenciamento de Informações Hidrológicas da Sub-Bacia do Rio Frios – CE". Os autores também agradecem à equipe de monitoramento da FUNCEME, em especial o técnico Jair Barroso Lúcio, pela sua dedicação e interesse demonstrado ao longo das campanhas de monitoramento.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, F.A.R, Variações diurnas (24 horas) de parâmetros limnológicos básicos e da produtividade primária do fitoplâncton da lagoa Carioca-Parque Florestal do Rio Doce-MG-Brasil. São Carlos, DCB/UFSCar, 206p. (Tese).1981.
- Bloss, G, and Harleman, R.F.. Effect of wind-mixing on the thermocline formation in lakes and reservoirs. Techn Rep. 249, Ralph M. Parson Laboratory, MIT, Cambridge, MA, pp. 68, 1979.
- Demers, E. and Kalff, J., A simple model for predicting the date of spring stratification in temperate and subtropical lakes, *Limnology and Oceanography*, 38(5), 1077-1081, 1993.
- Esteves, F. A, "Fundamentos de Limnologia", Ed. Interciência LTDA. 20 Edição. 1998.
- Gorham, E. and Boyce, F. M., Influence of lake surface area and depth upon thermal stratification and the depth of the summer thermocline, *J. Great Lakes Res.*, 15, 233-245, 1989.
- Hondzo, M. and H.G. Stefan., 1996. Long-term lake water quality predictors. *Water Res.*, 30(12):2835-2852.
- Lathrop, R. C. and Lille, R. A., Thermal stratification of Wisconsin lakes, *J. Wisconsin Acad. Of Sci.*, 68, 90-96, 1980.
- Nurnberg, G. K., A simple model for predicting the date of fall turnover in thermally stratified lakes, *Limnology and Oceanography*, 33(5), 1190-1195, 1988.
- Souza Filho, F.A, Paulino, W.D, Souza, A.B, Porto, M. Breve Diagnóstico da Qualidade da Água em Reservatórios no Estado do Ceará. *XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte, 1999.

The Mixing Process In The Brazilian Semi-Arid Reservoirs And Implications For Water Quality

ABSTRACT

Water monitoring is carried out with sampling in time and space for quantitative and qualitative aspects. In order to be efficient, sampling should take into

account physical, chemical and biological processes that affect the parameters of interest. Currently water quality monitoring is performed monthly in Ceará State reservoirs in the Brazilian Semi-Arid, with vertical profile measurements for a few physical and chemical parameters, and with one point sampling (near the water surface) for all other parameters. The purpose of this paper is to describe the mixing process in lakes at low latitudes and establish criteria for water quality monitoring in such regions. It is demonstrated that stratification and mixture occur in a diurnal cycle governed by climatic variables, such as solar radiation and wind. This suggests that monthly variability is not only due to seasonal variability but also to different times of day at which measurement is performed. As a result, the monitoring strategy should take into account the diurnal variability of such parameters and the daily stratification and mixing processes, by, for instance, defining a standard time for measurement, which can be very expensive and operationally impossible.

Key-words: water quality; reservoirs; semi-arid.