

AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS DO RESERVATÓRIO ACARAPE DO MEIO INTEGRADO COM O MONITORAMENTO METEOROLÓGICO E HIDROLÓGICO

*Mosefran B. M. Firmino¹; Walt Disney Paulino², Dirceu S. Reis Júnior¹ & Eduardo Sávio P. R.
Martins³*

RESUMO --- A avaliação da evolução temporal do monitoramento da qualidade das águas pode ser influenciada pela hora de coleta dos dados. Este trabalho tem como principal objetivo a avaliação do monitoramento da qualidade das águas integrado com o monitoramento meteorológico e hidrológico para análise dos processos de mistura e estratificação em reservatórios. A coleta dos dados de qualidade das águas foi feita em sete pontos de amostragem. Foi realizado o monitoramento do nível do reservatório e variáveis de meteorológicas. Segundo os resultados obtidos o reservatório Acarape do Meio pode ser considerado um lago raso, possui águas oxigenadas (principalmente na região litorânea e na superfície) e o pH tende da neutralidade a condições básicas. Este lago sofre o processo de circulação noturno da coluna d'água durante o período seco e apresenta estratificação térmica e química da coluna d'água durante o período chuvoso. Sendo assim, acredita-se que essa metodologia possa fornecer um suporte confiável para um gerenciamento sustentável de sistemas hídricos localizados em regiões semi-áridas.

ABSTRACT --- Temporal evolution estimation of water quality monitoring can be influenced by time of data collection. The main objective of this work is the evaluation of water quality management integrated with meteorological and hydrological management for the analysis of mixing and stratification processes. The data collection of water quality was carried out at seven sampling points. Management of the reservoir level and meteorological variables were performed. According to the results, the Acarape do Meio reservoir in Brazil may be assumed as a shallow lake, it contains oxygenated waters (mainly in coastal areas and in the surface) and the pH tends to be from neutral to basic. This lake suffers from nocturnal circulation of the water column during dry periods and presents thermal and chemical stratification of the water column during the wet season. Thus, this methodology may provide a reliable support for the sustainable management of water systems located in the Brazilian Semi-Arid.

Palavras-chaves: monitoramento integrado, qualidade das águas, semi-árido.

¹³ Pesquisador e Presidente da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Av. Rui Barbosa, 1246, 60.115-221 Fortaleza – CE, Fone: (85) 3101-1091, e-mail: mosfran@gmail.com; dirceu.reis@gmail.com; esm9@secrel.com.br

² Gerente de Operação da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, Rua Adualdo Batista, 1550, 60.824.140, Fortaleza/CE, Fone: (85) 3218-7680, e-mail: wdisneyp@gmail.com

1- INTRODUÇÃO

O principal objetivo do monitoramento de qualidade das águas é a avaliação do estado atual e a evolução temporal dos corpos d'águas. A maioria das políticas de monitoramento não considera o processo de dinâmica diurna dos lagos. É necessária a incorporação de dados meteorológicos no planejamento do sistema de monitoramento de qualidade das águas, Souza Filho *et al.* (2006). Este fato é um limitador do processo de modelagem da qualidade das águas e uma correta avaliação das consequências da ocupação e uso do solo.

O perfil vertical de temperatura em lagos e reservatórios varia ao longo do ano. Esta variação de temperatura afeta a densidade da água e, em decorrência, a capacidade de mistura e estratificação do corpo d'água, von Sperling (2005). Na maioria dos lagos e reservatórios possuem coletas semanais, mensais ou semestrais, por razões técnicas ou de custo, para avaliação da qualidade da água. Estas amostras podem ter valores iguais ou diferentes dependendo da hora de coleta dos dados. Assim a evolução temporal dos corpos d'águas fica comprometida.

Este trabalho busca identificar o comportamento de qualidade das águas em reservatórios do semi-árido nordestino e suas relações com fatores meteorológicos e hidrológicos. Esses fatores são correlacionados com o processo de mistura e estratificação. Os reservatórios, nesta região, possuem vazão afluyente em período bem determinado, onde é caracterizado pelas concentrações das variáveis de qualidade das águas.

Nesta conjectura este trabalho demonstrar o comportamento dinâmico no período seco e chuvoso. No período seco tem comportamento de estratificação durante o dia e processo de mistura a noite, já no período chuvoso o reservatório esta estratificado durante todo o dia. Logo em condição de sangria do reservatório as águas afluentes da bacia aumentam o tempo de residência. A consequência deste fato é o agravamento do estado trófico do reservatório.

2- MEIO AQUÁTICO E CARACTERIZAÇÃO PARA MONITORAMENTO DE LAGOS

O meio aquático apresenta uma série de características que afetam o metabolismo do ecossistema aquático entre estas características pode-se citar:

1. Gradiente vertical e, em alguns casos, horizontal, evidenciam pela distribuição desigual da luz, nutrientes, temperatura e gases (OD, CO₂), as quais têm consequência sobre a distribuição de organismos;
2. Alta capacidade de solubilização de compostos orgânicos e inorgânicos pelos organismos, em especial os autotróficos absorver nutrientes sua superfície do corpo;

3. Teor de sais típicos de ambientes de água doce. Isto faz com que a maioria dos organismos que habitam esse ambiente seja hipertônico em relação ao meio, adaptações necessárias para manter o equilíbrio entre os líquidos interno e o meio;
4. Alta densidade e viscosidade da água têm implicações sobre a locomoção dos organismos no meio aquático uma vez que a água é tipicamente mais densa que o ar, os organismos apresentam profundas adaptações fisiológicas para reduzir o efeito da resistência do meio à locomoção.

Um lago pode ser dividido espacialmente em quatro porções, a saber: região litorânea, região limnética ou pelágica, região profunda e interface água-ar, Esteves (1988). Esta classificação, assim como outras, tem caráter apenas didático, uma vez que estes compartimentos não estão isolados dentro do ecossistema, mas em constante interação com troca de massa e energia, sobrepondo-se muitas vezes.

- Região Litorânea – região que está em contato direto com o ecossistema terrestre adjacente, influenciada por este, é considerado uma região de transição ecótono, entre o ecossistema terrestre e o lago. Por isso mesmo, é um compartilhada com vários núcleos ecológicos e cadeias alimentares, tanto de herbívoros (fonte de energia e biomassa vegetal viva) como de detrito (fonte de biomassa), a última é considerada a principal responsável pelo fluxo de energia neste compartimento. Todos os níveis tróficos de um ecossistema estão presentes nessa região: produtores primários, consumidores e decompositores.
- Região Pelágica – esta região é encontrada em quase todos os ecossistemas aquáticos, correspondendo à zona mais interior do lago, onde as algas (o fitoplâncton) e nos animais invertebrados (o zooplâncton), seus principais representantes. Esta região é caracterizada pela presença de plâncton e nécton. A condição de existência do plâncton é a capacidade de flutuar na água, e para tanto sua densidade deveria ser menor que a da água. O nécton, por sua vez, pode nadar mais rapidamente que o movimento regular das águas e que, portanto, pode regular sua distribuição, se move de um ecossistema para outro enquanto cresce.
- Região Profunda – é uma região caracterizada pela não penetração da luz, o que resulta na ausência dos organismos fotoautótrofos e na dependência da produção de matéria orgânica na região litorânea e limnética. Sua camada é bentônica, e sua diversidade e densidade profunda dependem em primeiro lugar da quantidade de alimento disponível e da concentração de oxigênio na água.
- Região de Interface Ar-Água – é habilitada pela convivência de nêuston, formado por organismos microscópicos como bactérias, fungos e algas, e o plêuston, formado por

plantas superiores (macrófitas aquáticas) e pequenos animais como os coleópteros e hemípteros, entre outros.

Outra classificação dos corpos d'água é de acordo com o perfil vertical de temperatura. Devido a este fato, a densidade da água superficial torna-se inferior à densidade da camada do fundo, fazendo com que haja camadas distintas no corpo d'água, Von Sperling (2005):

- *epilímnio*: camada superior, mais quente, menos densa, com maior circulação;
- *termoclina*: camada de transição;
- *hipolímnio*: camada inferior, mais fria, mais densa com maior estagnação.

Nos lagos e reservatórios, em geral, recebem suas maiores cargas de poluição proveniente de poluição difusa. Na presença de precipitação sobre a bacia incremental do reservatório a carga específica do uso e ocupação do solo é transportada para o rio afluente destes. Esta carga de poluição para as diferentes variáveis de qualidade possuem comportamento anômalo em relação ao escoamento superficial, já que o seu pico de concentração precede o pico do escoamento superficial, Novotny (2003). Logo um monitoramento sem levar esta curva pode produzir análise não consistente, pois a relação concentração e vazão não estariam corretamente estabelecidas. Assim a modelagem de qualidade das águas e avaliação dos corpos d'água é comprometida.

3- ESTUDO DE CASO

O açude Acarape do Meio é formado pelo barramento do Rio Pacoti, estando este reservatório localizado em região de serra, no semi-árido nordestino do estado do Ceará. Sua capacidade de acumulação é de 31,5 hm³. A barragem esta localizada no município de Redenção, estado do Ceará, a aproximadamente 75 km de Fortaleza. O reservatório apresenta uma configuração longilínea e uma rede de drenagem predominantemente dendrítica. O rio Pacoti drena uma área de 1.257 km², sendo 210 km² pertencente à bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio, se desenvolvendo no sentido sudeste/nordeste. O açude faz parte do sistema de abastecimento da região Metropolitana de Fortaleza, sendo o responsável, durante grande parte do ano, pelo abastecimento de água bruta do Distrito Industrial de Maracanaú e das cidades de Pacatuba, Guaiúba, Maranguape, Redenção, Acarape, Barreira e do distrito de Antônio Diogo, além da perenização do vale entre os municípios de Redenção e Acarape. A Figura 1 apresenta a bacia hidrográfica do reservatório, e os pontos de monitoramento de qualidade de água.

Devido a sua importância para o Estado do Ceará, a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos - COGERH iniciou um trabalho de monitoramento de qualidade das águas da bacia contribuinte ao reservatório, e do reservatório propriamente dito, com o intuito de promover ações na bacia que promovessem a melhora na qualidade de água bruta retirada deste reservatório. O

monitoramento no açude Acarape do Meio é realizado desde 2001 pela COGERH, atualmente as amostras são coletadas na escala semanal em um ponto fixo (próximo a superfície d'água) para todos os parâmetros. Apesar deste grande esforço faz-se necessário a compreensão da evolução temporal através da influência do ciclo diário. Para avaliar este problema, iniciou-se em setembro de 2008 um projeto piloto de monitoramento intensivo neste reservatório, compreendendo medições em sete pontos localizados da bacia hidrográfica, com uma frequência horária no perfil vertical a cada trinta centímetros.

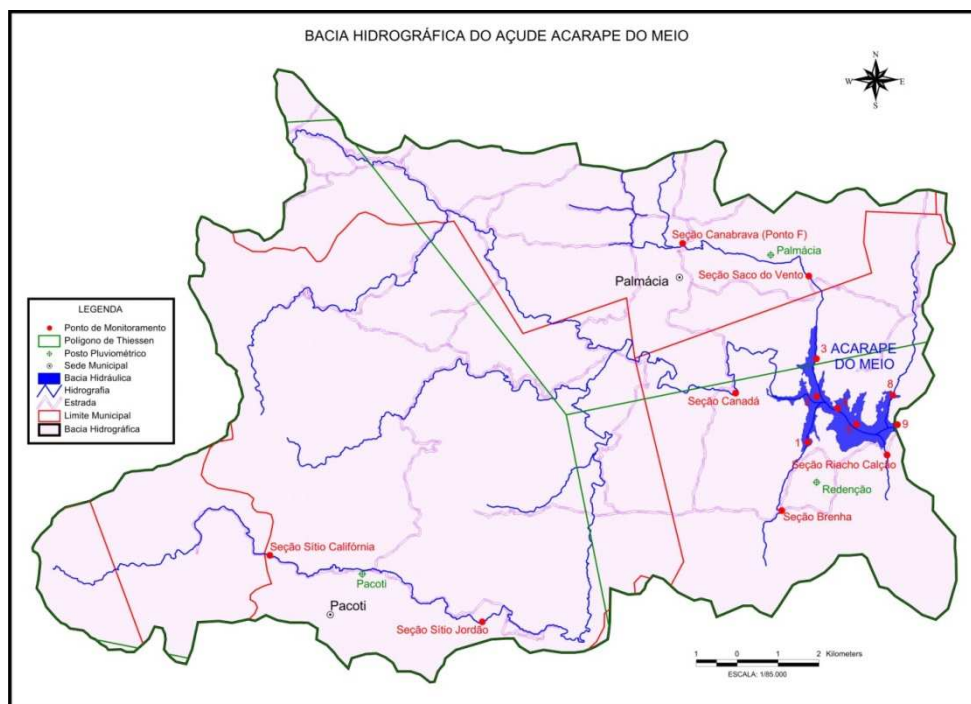


Figura 1 - Bacia incremental do açude Acarape do Meio e pontos de monitoramento de qualidade de água em vermelho (Fonte: COGERH)

3.1 Campanhas de Monitoramento de Qualidade

Com o objetivo de entender melhor a dinâmica dos processos físicos, químicos e biológicos no interior do reservatório, e subsidiar a modelagem destes processos, e definir uma estratégia adequada de monitoramento para este e outros reservatórios do estado, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e a COGERH realizaram 3 campanhas intensivas no período seco de 2008 e 3 campanhas intensivas no período úmido de 2009, tentando caracterizar as variações de diversas variáveis ao longo do dia e ao longo do perfil vertical do reservatório.

As campanhas foram feitas em sete pontos de amostragem (sendo quatro na região litorânea e três na região profunda). Cada campanha consistiu de 72 horas de medição horária ao longo do perfil vertical do reservatório, com medidas efetuadas a cada 30 cm (vertical). Os pontos de medição na bacia hidráulica são apresentados na Figura 1.

As campanhas durante o período seco foram realizadas nos meses de setembro, outubro e novembro de 2008, enquanto que as do período úmido aconteceram nos meses de março, abril e maio de 2009.

As Figuras 2, 3 e 4 apresentam as variações espaciais médias de temperatura, oxigênio dissolvido e pH, respectivamente, durante cada uma das seis campanhas. Pode-se verificar a diminuição das variáveis no sentido do barramento do açude e da maior profundidade, tanto no período chuvoso e seco. Observa-se na Figura 4 que ao longo de todas as campanhas prevaleceu a característica de pH básico, assim indica que a condição de nutrientes para avaliação do estado de eutrofização tem que ser dada atenção especial a concentração de nitrogênio amoniacal, amônia, como fator limitante para os fitoplâncton. Valores elevados de pH podem ser associado à proliferação de algas, von Sperling (2005).

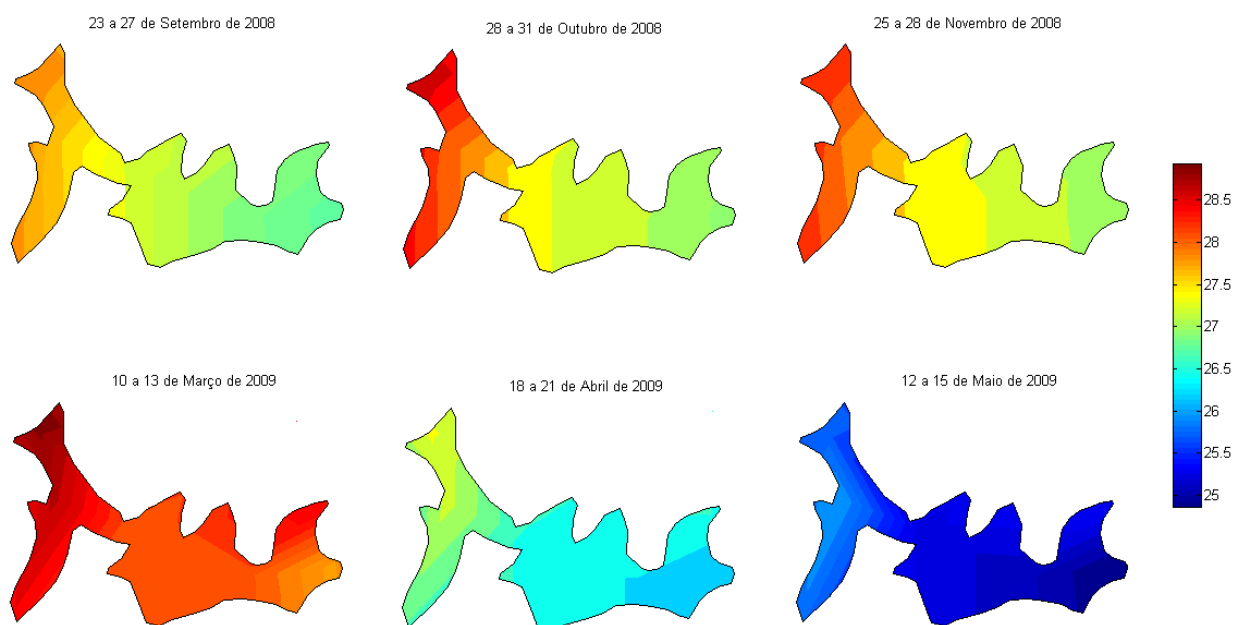


Figura 2 - Variação espacial da temperatura média (°C)

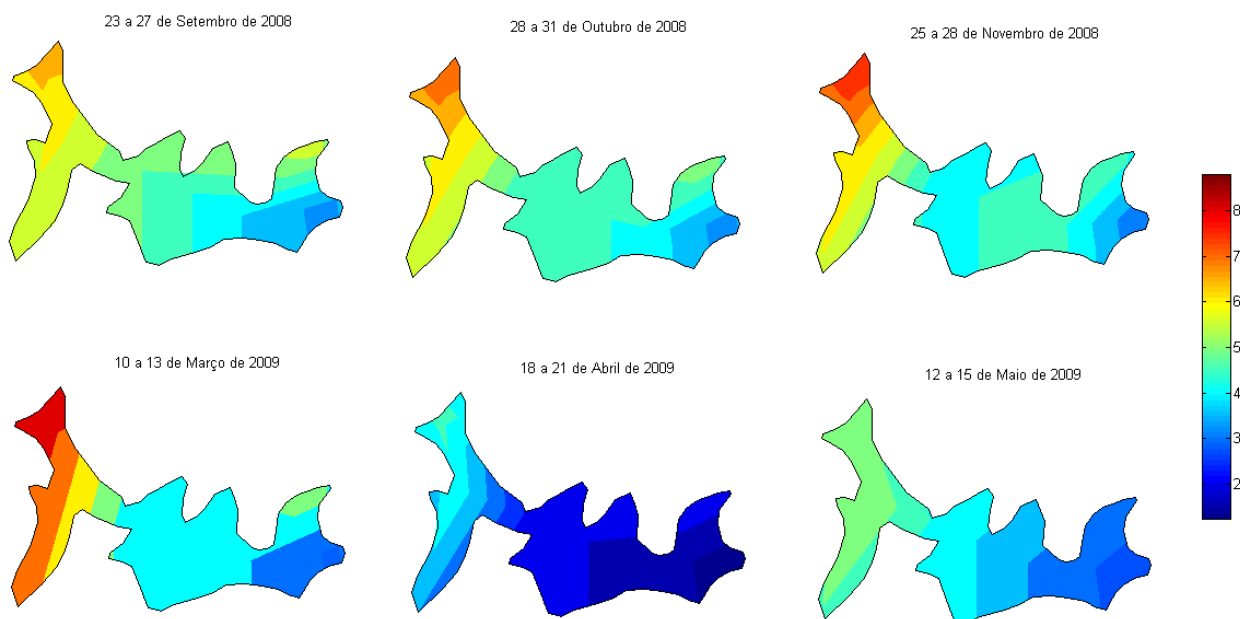


Figura 3 - Variação espacial do oxigênio dissolvido médio (mg/l)

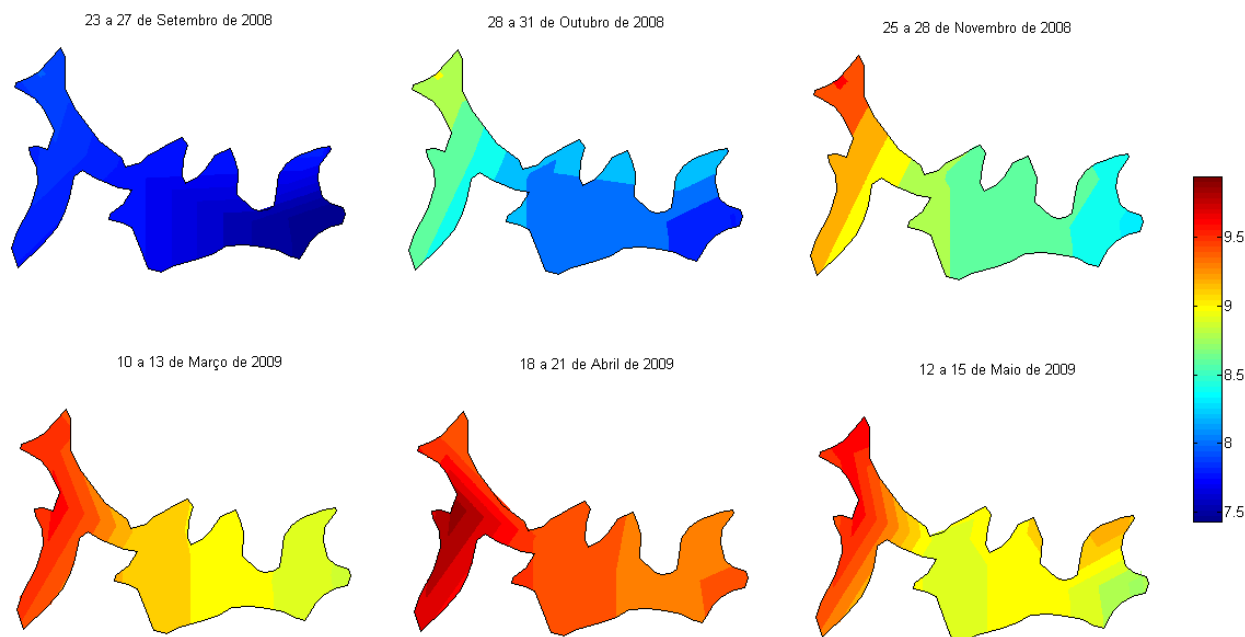


Figura 4 - Variação espacial do pH médio

A Figura 5 apresenta a variabilidade dos valores de temperatura medidos ao longo de todas as campanhas. Os dados foram separados por período (seco ou chuvoso) e por posição ao longo do perfil vertical. Fica claro que o perfil vertical de temperatura é muito mais homogêneo durante o período seco, quando o reservatório está com o nível mais baixo e praticamente não recebe quantidades significativas de águas de seus contribuintes. Isto pode ser inferido pela diferença entre as medianas de temperatura entre a superfície e o fundo. Além disso, observa-se uma variabilidade muito maior de temperatura no período úmido, tanto na superfície quanto no fundo.

No período seco, principalmente nos meses de outubro e novembro, foram identificados *outliers* (pontos estranhos ou extremos) na superfície do lago. Não está muito claro se este fato caracteriza algum processo diferente no reservatório, ou se são variações normais de temperatura na superfície. Essas condições extremas serão investigadas na continuação dessas campanhas no período seco de 2009. Ao longo destas campanhas foram observadas pequenas queimadas a montante e a jusante do lago, que provocavam a formação de nuvens de fumaça estacionárias sobre o lago, o que poderia causar a elevação da temperatura da superfície das águas do reservatório.

Não se nota a presença de óleo ou graxas na superfície do lago durante todas as campanhas. No período seco, principalmente nos meses de outubro e novembro, a região é marcada por pequenas queimadas, “controladas” por pequenos agricultores, para preparar o plantio de milho, feijão e banana na margem do reservatório. A Figura 6 ilustra este processo. Observa-se ainda a presença de animais nas margens do lago (Figura 7). A fumaça provocada pelas queimadas a montante do reservatório na campanha do mês de outubro era transportada pelo vento para a superfície do lago. O mesmo processo foi observado na campanha do mês de novembro, mas neste caso o transporte era proveniente dos focos de queimadas localizados a jusante do reservatório.

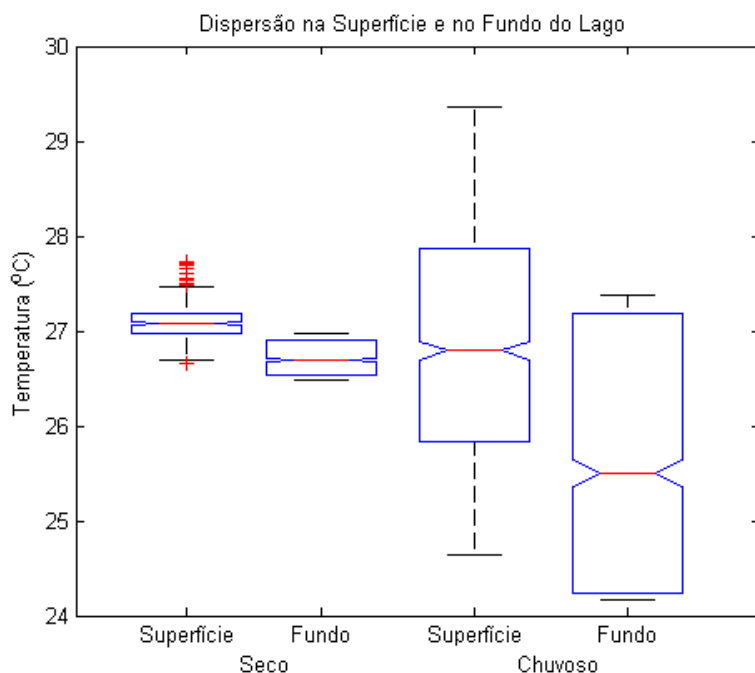


Figura 5 – Gráfico boxplot da dispersão da temperatura da água no lago.



Figure 6 - Plantio e queimada na margem do lago



Figure 7 - Animais na margem do lago

No período de chuvoso observar-se na superfície do reservatório lixo flutuante, animais mortos e a presença de floração de macrofitas aquáticas e algas, principalmente na região afluente do rio Pacoti e riacho Canabrava (Figura 7 e 8). Esses corpos d'água atravessam as sedes dos municípios de Pacoti e Palmácia.



Figure 7 - Floração de algas na superfície do reservatório



Figure 8 - Macrofitas e lixo na superfície do reservatório

3.2 Monitoramento do hidro-meteorológico

A análise hidrológica quantitativa do lago consistiu no monitoramento da vazão afluente ao reservatório, uma variável indispensável na avaliação da carga afluente ao mesmo. O estado do Ceará historicamente tem 80% da sua precipitação nos meses de fevereiro a maio, denominado por quadra chuvosa ou período chuvoso.

A Figura 9 mostra a precipitação diária no lago de agosto de 2008 a maio de 2009. Observa-se que o período de maiores precipitações foram nos meses de Abril e Maio. A Figura 10, por sua vez, exibe a variação do volume e da profundidade média do lago. Nota-se que o volume estava abaixo de 50% no início do período chuvoso, chegando ao seu volume máximo no mês de abril.

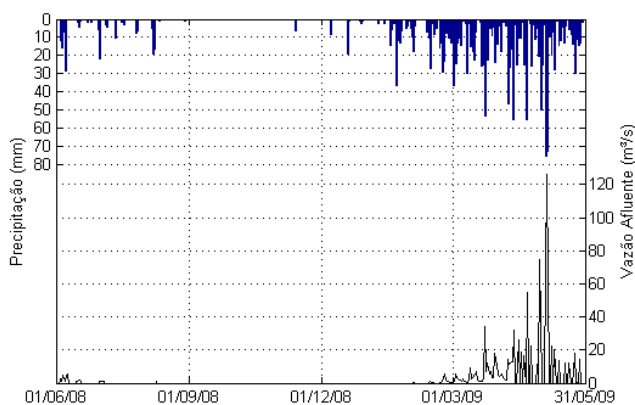


Figura 9 – Precipitação e vazão afluente na bacia incremental do reservatório Acarape do Meio

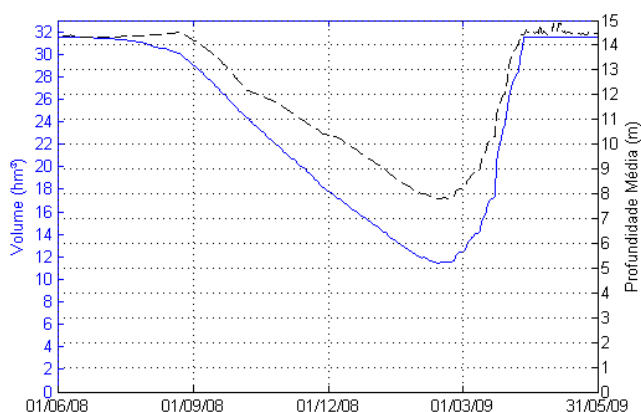


Figura 10 - Variação do volume e profundidade média no reservatório Acarape do Meio

A Figura 11 apresenta a temperatura do ar ao longo das 72 horas durante as seis campanhas realizadas no reservatório. Pode-se observar que as maiores temperaturas ocorreram durante os meses de setembro a novembro, com uma variação ao longo do dia de até 12°C.

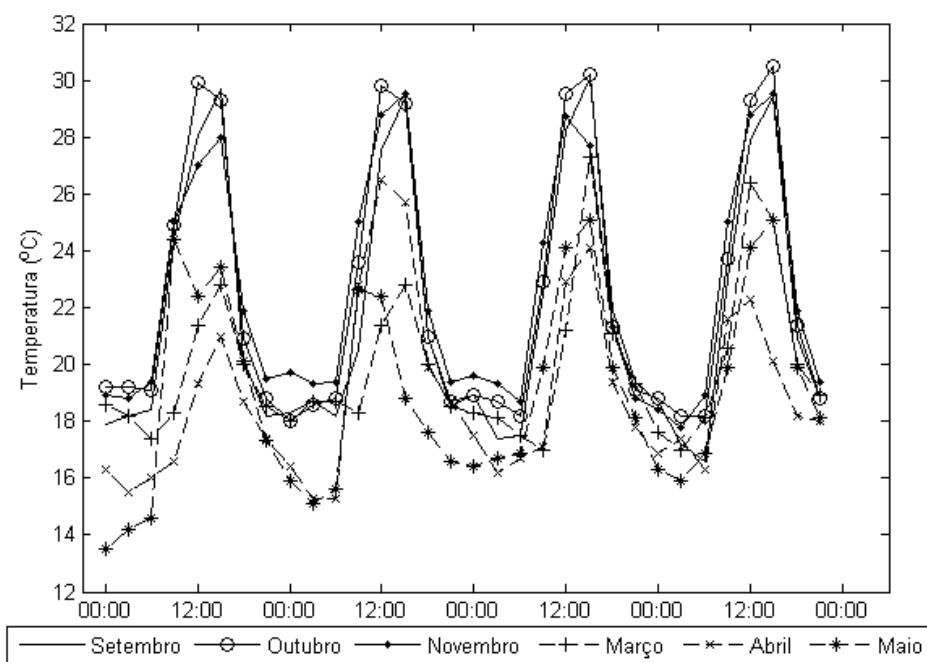


Figura 11 - Temperatura do ar ao longo do dia durante das seis campanhas

Em paralelo ao ciclo diário de temperatura, a Figura 12 aponta o ciclo de radiação solar. Verifica-se um nítido ciclo diurno de radiação solar, com os máximos ocorrendo entre as 12 e 15 horas. Como era de se esperar, os níveis de radiação observados durante o período seco são bem mais altos do que no período chuvoso, devido a menor presença de nuvens na atmosfera.

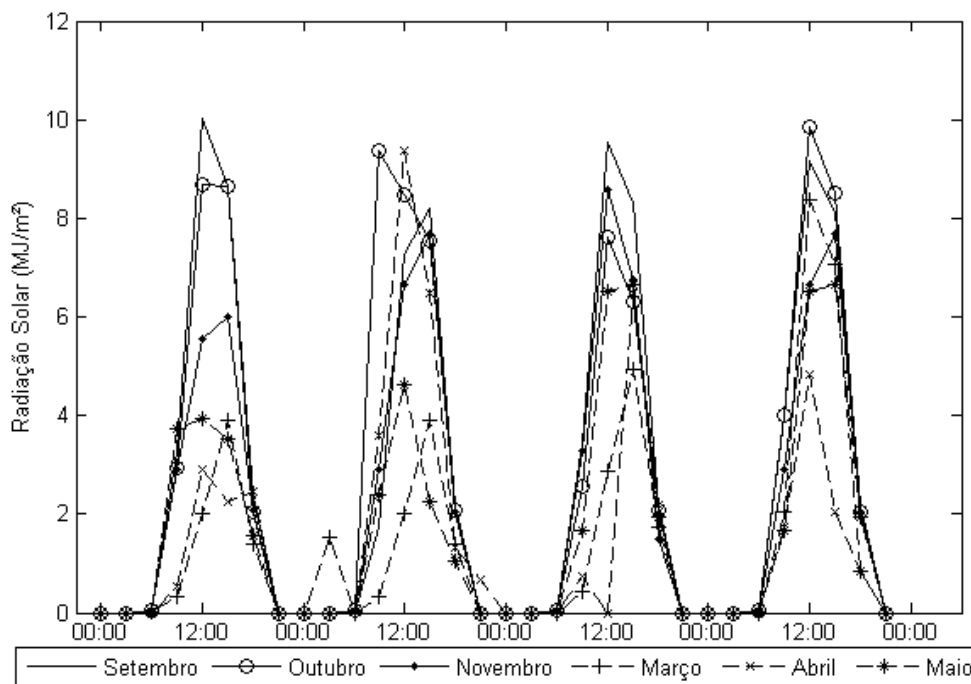


Figura 12 - Radiação Solar ao longo do dia durante das seis campanhas

As Figuras 13, 14 e 15 apresentam a variabilidade observada durante as campanhas de medição da temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento a 10 (dez) metros da superfície. É possível observar que as maiores variações destas variáveis ocorrem durante o período seco, podendo caracterizar os ciclos diurnos de estratificação e desestratificação do lago.

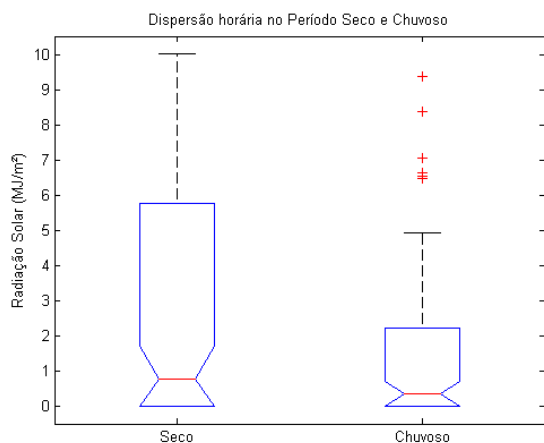


Figura 13 – Dispersão horária da radiação solar

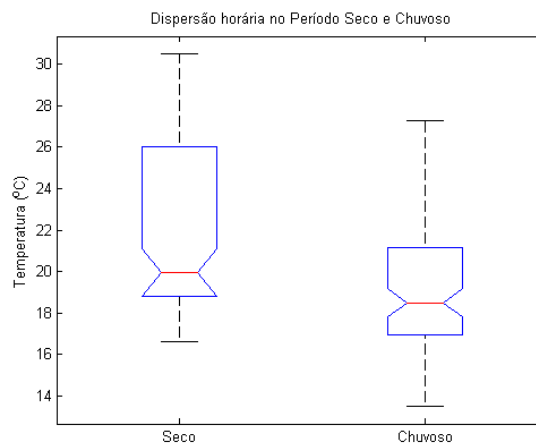


Figura 14 - Dispersão da temperatura do ar

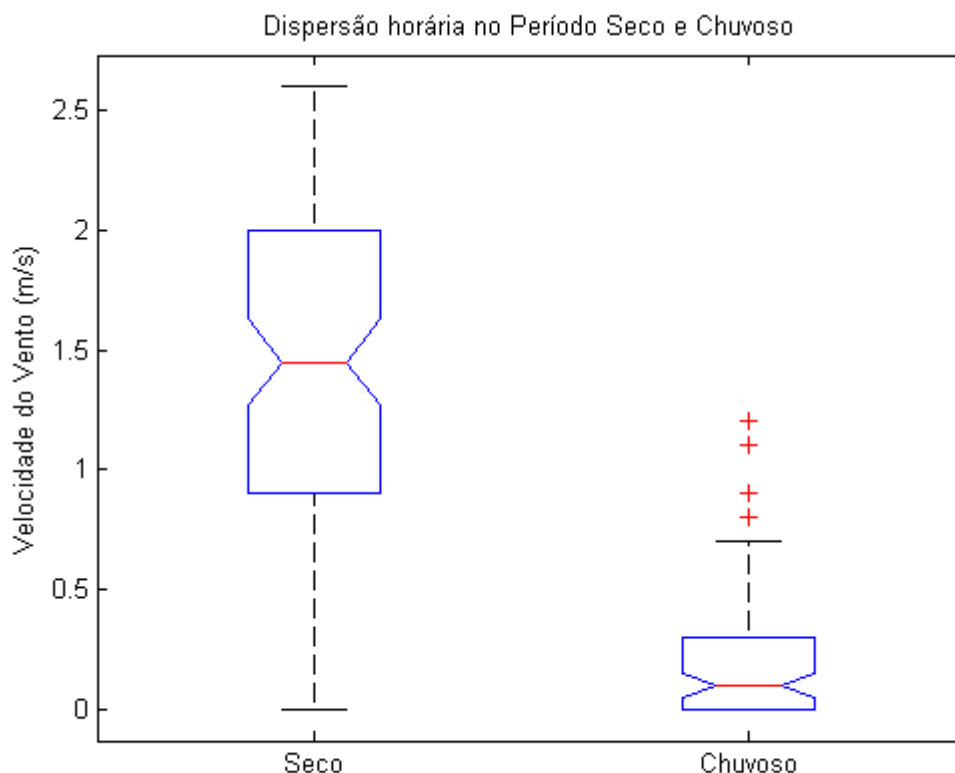


Figura 15 - Dispersão da velocidade do vento ao longo das campanhas

Estes gráficos sugerem que o processo de mistura da água é mais propício a ocorrer no período seco, sendo mais aquecido pela radiação solar, pela troca de calor com o ar e pelas rajadas de ventos, logo favorável à reaeração e penetração das águas quentes no fundo do lago.

3.3 Análise da Estratificação

A definição de uma estratégia de monitoramento de reservatórios no Estado do Ceará passa necessariamente pela compreensão dos processos dinâmicos que ocorrem em diversas escalas temporais.

Por motivos logísticos e econômicos, é comum realizar o monitoramento de qualidade de água em reservatórios com frequência mensal. Porém, como existe uma variação intensa ao longo do dia das variáveis de interesse, devido principalmente às variáveis meteorológicas, fica difícil relacionar estas medições mensais com o estado real da qualidade das águas de um dado reservatório.

Segundo Souza Filho *et. al* (2006), a variação das medidas mensais das variáveis de qualidade das águas pode ser associada ao ciclo diário destas. Como os horários nos quais as medições mensais são realizadas são normalmente diferentes, mesmo que a qualidades das águas do reservatório seja a mesma, as conclusões baseadas no monitoramento mensal realizado desta maneira são geralmente inconclusivos. A água pode ter propriedades extremamente satisfatórias (ou

ruins) em função da hora ou dia em que é realizada a medida. A confirmação desta hipótese passa por quatro pontos de análise:

- identificação de um ciclo diário da qualidade das águas;
- identificação dos fatores climáticos e ou ambientais que modulam este ciclo;
- identificação da variabilidade sazonal da influência destes fatores no ciclo;
- verificação da hipótese de que a diferença observada durante a campanha mensal possa ser explicada pelos fatores climáticos que modulam o potencial ciclo diário.

As Figuras 16, 17, 18 e 19 mostram, respectivamente, a variação horária das concentrações de oxigênio dissolvido e da temperatura da água em diferentes profundidades no reservatório Acarape do Meio, exemplificando o comportamento dos mesmos no período seco e chuvoso.

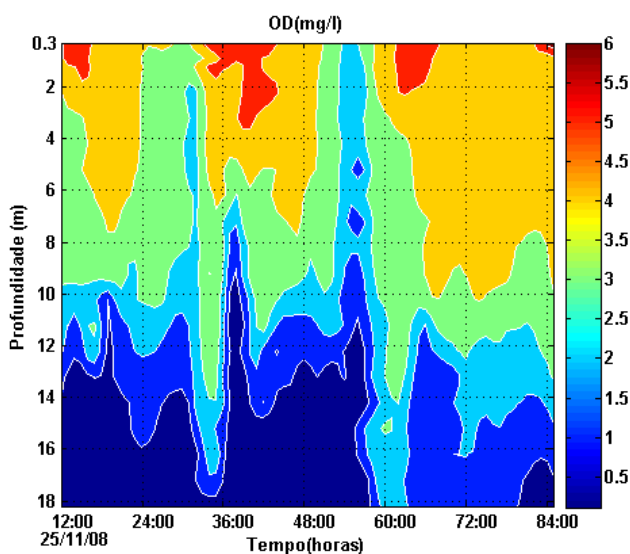


Figura 16 - Perfil de OD na campanha de Novembro

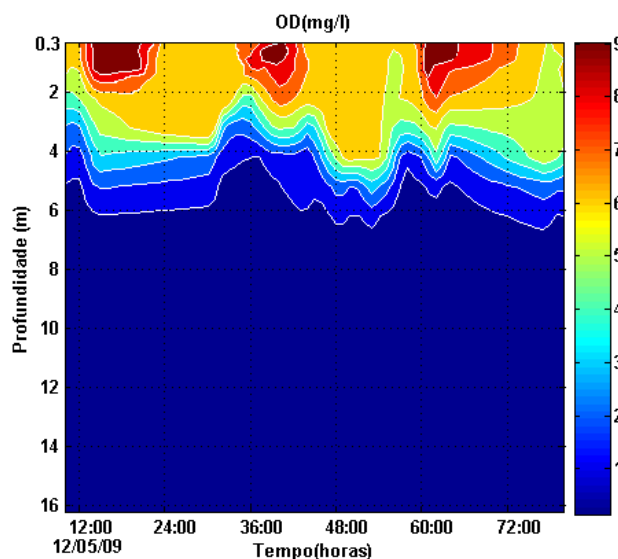


Figura 17 - Perfil de OD na campanha de Março

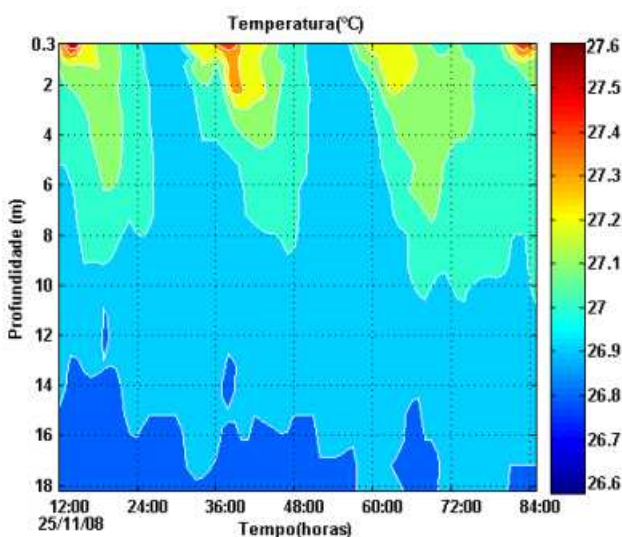


Figura 18 - Perfil de Temperatura na campanha de Novembro

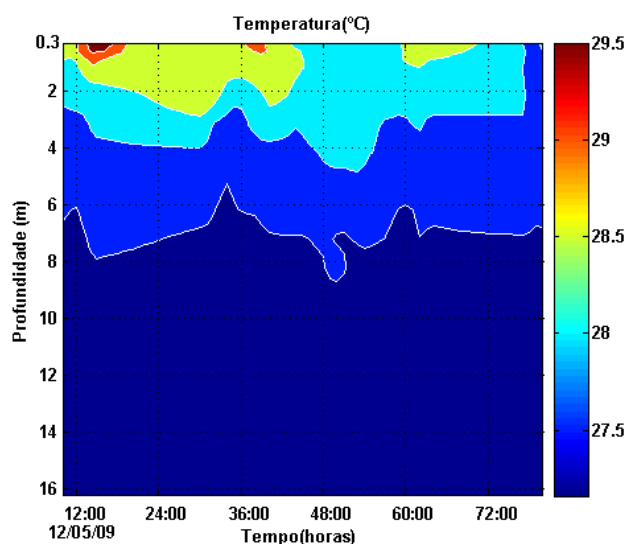


Figura 19 - Perfil de OD na Campanha de Março

Pode-se observar que as máximas concentrações de OD próximo à superfície ocorrem no período entre as 12 e 15 horas. Nos meses secos, como é o caso do mês de novembro, pode-se observar um processo maior de mistura ocorrendo logo após a ocorrência dos valores máximos na superfície. Já nos meses chuvosos, como é o caso do mês de março, embora se observa uma redução da concentração de OD após o período de concentrações máximas, pode-se observar uma forte estratificação no perfil vertical. As Figuras 18 e 19 mostram que as temperaturas são máximas próximas às superfícies no período de 12 às 15 horas, período onde apresenta-se a maior variação de temperatura entre a superfície e o fundo. Esse gradiente de temperatura sugere a ocorrência de estratificação térmica na coluna d'água (Souza Filho *et. al* , 2006; Novotny, 2003). Nos meses secos ocorre o processo de estratificação e mistura ao longo do dia, nos meses chuvosos a estratificação está presente durante todo o período.

Apesar de haver valores mais altos de temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento durante os meses secos, os gradientes de oxigênio dissolvido e temperatura da água ao longo do perfil vertical é bem menor do que aquele observado durante o período chuvoso. Isto é resultado do processo de mistura que se observa no período seco. O balanço de energia na interface ar-água é concentrado próximo à superfície do reservatório durante os meses chuvosos devido exatamente à ao processo de estratificação.

4- CONCLUSÕES

Este artigo possui dois objetivos principais: discutir a importância de se compreender os processos dinâmicos que ocorrem num reservatório numa escala diária, de modo que seja possível definir uma estratégia de monitoramento de qualidade das águas, e apresentar os resultados de seis campanhas intensivas (quatro dias cada) de medições horárias de diversas variáveis ambientais, realizadas ao longo da coluna d'água do reservatório Acarape do meio.

Segundo os resultados obtidos, o reservatório Acarape do Meio pode ser considerado um lago raso (profundidade média de 11 metros), de águas oxigenadas (principalmente na região litorânea e na superfície) e o pH tende da neutralidade a condições básicas..

Assim deve-se ter atenção na concentração de amônia para caracterizar a classe de trofia do lago, fato este não observado na maioria dos reservatórios e lagos brasileiro, von Sperling (2005). Logo a classificação do nível trófico neste reservatório deve levar em consideração, além do fósforo, a concentração de amônia. Ainda o pH básico implica elevados custos de tratamento de água para abastecimento humano.

O reservatório possui comportamento dinâmico diferente ao longo do ano. No período seco, o reservatório tem um ciclo diurno, durante o dia está estratificado e a noite ocorre o processo de

mistura. No período chuvoso, o reservatório está estratificado, sem a verificação do processo de mistura no ciclo diário.

É necessário incentivar estudos no período de queimadas e avaliar seus efeitos no ciclo de estratificação, no ecossistema aquático e no balanço de energia na interface ar-água.

Foi demonstrada a necessidade do acoplamento do monitoramento meteorológico, hidrológico e de qualidade das águas, sendo imprescindível para a avaliação temporal e espacial dos corpos d'águas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o suporte financeiro e logístico da FUNCEME e da COGERH, além da iniciativa destas instituições no âmbito piloto do projeto “*Monitoramento Meteorológico, Hidrológico e de Qualidade das Águas no semi-árido Nordestino*”. Os autores agradecem à equipe de monitoramento da COGERH e da FUNCEME, em especial o técnico Jair Barroso Lúcio, pela sua dedicação e iniciativas demonstradas ao longo das campanhas. Por fim, os autores também agradecem ao Professor Francisco de Assis de Souza Filho pela avaliação inicial dos dados e técnicas de amostragem no reservatório, principalmente pela inferência do balanço de energia na interface ar-água da superfície do lago.

BIBLIOGRAFIA

ESTEVES, F. A. *Fundamentos de Limnologia*. Rio de Janeiro: Interciência/Finep, 575 p, 1988.

NOVOTNY, V. *Water Quality. Diffuse Pollution and Watershed Management*. 2nd ed. By John Wiley & Sons, Inc., New York, 864 p, 2003.

SOUZA FILHO, F. de A. *O processo de mistura em reservatórios do semi-árido e sua implicação na qualidade da água*. Porto Alegre, RS, p. 109-119, RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V. 11, n. 4 Out/Dez 2006.

VON SPERLING, Marcos. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. v.1. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*. 452 p, Belo Horizonte: UFMG. 2005.