



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL

WICTOR EDNEY DAJTENKO LEMOS

**MONITORAMENTO E GESTÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM
RESERVATÓRIOS INCORPORANDO PROCESSOS HIDRODINÂMICOS E
CLIMÁTICOS DE REGIÕES TROPICAIS SEMIÁRIDAS**

FORTALEZA - CEARÁ

2011

Wictor Edney Dajtenko Lemos

Orientador: Francisco de Assis de Souza Filho, DSc.

**MONITORAMENTO E GESTÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM
RESERVATÓRIOS INCORPORANDO PROCESSOS HIDRODINÂMICOS E
CLIMÁTICOS DE REGIÕES TROPICAIS SEMIÁRIDAS**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Francisco de Assis de Souza Filho, DSc.

FORTALEZA - CEARÁ

2011

WICTOR EDNEY DAJTENKO LEMOS

MONITORAMENTO E GESTÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIOS
INCORPORANDO PROCESSOS HIDRODINÂMICOS E CLIMÁTICOS DE REGIÕES
TROPICAIS SEMIÁRIDAS

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 26/01/2011

BANCA EXAMINADORA

Prof. Francisco de Assis de Souza Filho, D.Sc. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Raimundo Oliveira de Souza, D.Sc.
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Rogério Campos, Ph.D
Universidade de Fortaleza - UNIFOR

Às duas mulheres da minha vida: minha mãe querida e amada, Valentina Dajtenko Lemos, que tudo faz pensando no meu crescimento pessoal; e na minha futura esposa, Greice Lopes Bernardo, por me fazer acreditar, pelo incentivo, pelo carinho e por seu amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Senhor de todas as leis que regem o universo;

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho, pelo constante incentivo em todas as etapas desta dissertação e pela incansável e magnífica orientação despendida;

À minha família, meus pais Francisco Franciney Lemos e Valentiva Dajtenko Lemos; e minha irmã, Ana Paula Dajtenko Lemos, pela convivência diária e pela confiança;

À companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) e todos os seus funcionários pela disponibilização dos dados necessários e toda a infraestrutura cedida. Todo este trabalho foi fruto de uma ação conjunta e sem o apoio dado seria impossível sua realização;

Aos amigos que fiz na COGERH e que foram peças fundamentais na concretização deste projeto, em especial: Walt Disney Paulino, Francimeyre Avelino e Marciana Barbosa. Muito obrigado a vocês por tudo;

A todos meus amigos da turma do mestrado 2009.1, pessoas do qual nunca mais irei esquecer;

A todos os professores e funcionários que fazem parte do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DEHA;

À Teresinha (TT), pela companhia durante este tempo; pela recepção na sala de projeto; pelas dicas e informações que só ela sabia ou tinha conhecimento e pela sua irreverência que “quebrava o gelo” todos os dias. Muito obrigado!

Ao pessoal do laboratório de Gerenciamento do Risco Climático e Sustentabilidade Hídrica, GRM-SII, pela amizade e respeito durante estes dois anos de convívio e em especial: Diego Ribeiro, Herbert Medeiros e Marcos Abílio pela contribuição neste trabalho;

A todos da minha família que participaram em algum momento em meu aprendizado;

A todos que de alguma forma influenciaram nas minhas escolhas e no direcionamento dos meus estudos;

Ao CNPq, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de estudos.

“... minha religião consiste em humilde admiração do espírito superior e ilimitado que se revela nos menores detalhes que podemos perceber em nossos espíritos frágeis e incertos. Essa convicção, profundamente emocional na presença de um poder racionalmente superior, que se revela no incompreensível universo, é a idéia que faço de Deus.”

(ALBERT EINSTEIN)

RESUMO

A água é um recurso essencial e atualmente gestores ambientais do mundo inteiro chamam a atenção para o problema da escassez de água limpa. Tal escassez hídrica é ainda mais forte nas regiões áridas e semiáridas do globo. No nordeste brasileiro, e em particular, no semiárido, uma série de fatores o torna particular. A irregularidade pluviométrica, sua má distribuição no tempo e no espaço, a elevada taxa de evaporação/evapotranspiração e as altas temperaturas são traços marcantes do ambiente, diferenciando-o de outros locais do mundo. Assim, o gerenciamento de lagos visando à proteção e manutenção de uma boa qualidade da água, a vida aquática e os outros usos deve ser abordado de maneira em que se leve em consideração as características regionais. O objetivo deste trabalho foi identificar o impacto das variáveis meteorológicas na qualidade da água, analisando a influência do processo de estratificação térmica e de mistura; e com isso, propor um sistema de monitoramento e modelagem. O reservatório estudado foi o Pereira de Miranda (Pentecoste – CE), onde um único ponto de amostragem foi estabelecido, visando sua caracterização vertical. Após a seleção dos principais parâmetros de qualidade da água e dos fatores meteorológicos mais relevantes, foi traçada uma discussão qualitativa e uma análise da variabilidade térmica da coluna d'água. Notou-se pelos perfis verticais de temperatura e dos fluxos de calor obtidos uma clara formação de termoclinas, e sua destruição ao longo do dia, fato associado à radiação solar e os fortes ventos que impôs significativa variação nos valores de oxigênio dissolvido. De posse de todas as variáveis pesquisadas foi proposto um sistema de monitoramento como componente chave da proteção ambiental, com base no Ciclo de Deming. Esta rotina, acoplado a um sistema de modelagem da qualidade da água, aperfeiçoa a avaliação e a gestão dos ecossistemas. Assim, além de exercer o controle das atividades de monitoramento da qualidade da água, poderá ser utilizado de forma contínua para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Monitoramento da qualidade da água. Gestão dos recursos hídricos. Região semiárida.

ABSTRACT

Water is an essential natural resource in the planet and nowadays environmental managers around the world concern to the scarcity of clean water. This scarcity is even greater in arid and semiarid regions of the globe. In northeastern Brazil, and particularly in the semiarid region, a number of factors make it particular. The irregularity of rainfall, its poor distribution in time and space, the high rate of evaporation / evapotranspiration, and high temperatures are characteristics of this environment that differs from other places in the world. Thus, the management of lakes to protect and maintain good water quality, aquatic life and other uses should be analyzed according to regional characteristics. The purpose of this study was to identify the impact of meteorological variables in water quality including the influence of the thermal stratification and mixing, and thus, propose a system for monitoring and modeling. The Pereira de Miranda (Pentecoste-CE) was studied with only one sample point to characterize its vertical profile. After selecting the main parameters of water quality and meteorological factors most relevant, was drawn a qualitative discussion and analysis of thermal variability in the water column. It was observed by the vertical profiles of temperature and heat flux a clear thermocline formation and destruction throughout the day, a fact linked to solar radiation and strong winds that imposed significant variation in levels of dissolved oxygen. In possession of all the variables studied was proposed a monitoring system as a key component of environmental protection, based on the Deming Cycle. This routine, coupled with a modeling system of water quality, improves the assessment and management of ecosystems. Thus, in addition to exerting control over the activities of monitoring of water quality, can be used continuously for the management of water resources.

Keywords: Monitoring of water quality. Water resources management. Semiarid region.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1. Mudança na densidade relativa ao aumento de 1° C na temperatura da água..	28
Figura 3-2. Principais componentes da radiação solar.....	33
Figura 3-3. Proporções relativas das formas do dióxido de carbono em função do pH.	35
Figura 3-4. Um típico perfil térmico de verão em lagos temperados.	39
Figura 3-5. Distribuição dos lagos conforme a latitude.	42
Figura 3-6. Temperatura na superfície e no fundo em lagos durante a estratificação, em função da latitude.....	43
Figura 3-7. Representação da seqüência de mudanças sofridas pela camada de mistura em um lago tropical, através de um período de perda e de ganho de calor.	44
Figura 3-8. Comparação entre os processos de eutrofização natural e cultural.....	50
Figura 4-1. Bacia Hidrográfica do Açude Pereira de Miranda.	63
Figura 4-2. Curvas de nível do açude Pereira de Miranda.....	65
Figura 4-3. Pontos coletados para a confecção da batimetria do açude Pereira de Miranda...	65
Figura 4-4. Gráfico cota x área x volume do açude Pereira de Miranda.	66
Figura 5-1. Açude Pereira de Miranda e o ponto escolhido para as amostragens	68
Figura 5-2. Sonda Multiparamétrica YSI 6600 V2 e algumas soluções padrão utilizadas.....	69
Figura 5-3. Sonda Multiparamétrica YSI 6600 V2.....	70
Figura 5-4. Calibração do oxigênio dissolvido à pressão atmosférica local e conservação das amostras.	71
Figura 5-5. Frasco de 300 mL, para análise microbiológica; e lancha Squalus 600.....	71
Figura 5-6. Garrafa de Van Dorn e disco de Secchi.	71
Figura 5-7. Detalhe do frasco de 1L escuro, para análise da DBO; e frasco de cinco litros, para análise dos nutrientes.	72
Figura 5-8. GPS Garmin Vista HCxetrex e Anemômetro Kestrel 1000.....	72

Figura 5-9. Profundímetro Speedtech Instruments.	73
Figura 5-10. Planilha inicial do S-Plus® com os dados de qualidade da água iniciais.	78
Figura 5-11. Processamento dos dados no S-Plus® via correlação.	79
Figura 5-12. Discretização do reservatório em n camadas horizontais.	82
Figura 6-1. Evolução do volume do reservatório Pereira de Miranda no período de amostragem.	86
Figura 6-2. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 8 Dez. 2009, às 06h00min, 08h00min e 10h00min.	87
Figura 6-3. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 8 Dez. 2009, às 12h00min, 14h00min e 16h00min.	87
Figura 6-4. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 8 Dez. 2009, às 18h00min e 20h00min.	88
Figura 6-5. Velocidade dos ventos registrada nos dias 8 e 9 de Dez. 2009 e 26 e 27 de Jan. 2010.	88
Figura 6-6. Velocidade dos ventos registrada nos dias 2 e 3 de Mar. 2010 e 6 e 7 de Abr. 2010.	89
Figura 6-7. Radiação solar total registrada a 10m da superfície do reservatório Pereira de Miranda nos dias 8 e 9 de Dez. 2009 e 26 e 27 de Jan. 2010.	89
Figura 6-8. Radiação solar total registrada a 10m da superfície do reservatório Pereira de Miranda nos dias 2 e 3 de Mar. 2010 e 6 e 7 de Abr. 2010.	89
Figura 6-9. Rosa dos ventos para o reservatório Pereira de Miranda em 8 e 9 Dez. 2009; 26 e 27 Jan. 2010.	90
Figura 6-10. Rosa dos ventos para o reservatório Pereira de Miranda em 2 e 3 Mar. 2010; 6 e 7 Abr. 2010.	90
Figura 6-11. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 8 Dez. 2009, às 06h00min, 08h00min e 10h00min.	91
Figura 6-12. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 8 Dez. 2009, às e às 12h00min, 14h00min e 16h00min.	91

Figura 6-13. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 8 Dez. 2009, às 18h00min e às 20h00min.....	91
Figura 6-14. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 26 Jan. 2010, às 06h00min e 09h00min.....	95
Figura 6-15. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 26 Jan. 2010, às 15h00min, 18h00min e 21h00min.	96
Figura 6-16. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 27 Jan. 2010, às 03h00min e 06h00min.....	96
Figura 6-17. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 26 Jan. 2010, às 06h00min, 09h00min e 12h00min.....	97
Figura 6-18. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 26 Jan. 2010, às 15h00min, 18h00min e 21h00min.....	97
Figura 6-19. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 27 Jan. 2010, às 03h00min e às 06h00min.....	97
Figura 6-20. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 2 Mar. 2010, às 06h00min, 09h00min e 12h00min.	98
Figura 6-21. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 2 Mar. 2010, às 15h00min, 18h00min e 21h00min.	99
Figura 6-22. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 2 Mar. 2010, às 00h00min, 03h00min e 06h00min.	99
Figura 6-23. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 2 Mar. 2010, às 06h00min, 09h00min e 12h00min.....	100
Figura 6-24. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 2 Mar. 2010, às 15h00min, 18h00min e 21h00min.....	100
Figura 6-25. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 3 Mar. 2010, às 00h00min, 03h00min e 06h00min.....	100
Figura 6-26. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 6 Abr. 2010, às 06h00min, 09h00min e 12h00min.....	102

Figura 6-27. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 6 Abr. 2010, às 15h00min, 18h00min e 21h00min.....	102
Figura 6-28. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 7 Abr. 2010, às 00h00min, 03h00min e 06h00min.....	103
Figura 6-29. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 6 Abr. 2010, às 06h00min, 09h00min e 12h00min.....	103
Figura 6-30. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 6 Abr. 2010, às 15h00min, 18h00min e 21h00min.....	104
Figura 6-31. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 7 Abr. 2010, às 00h00min, 03h00min e 06h00min.....	104
Figura 6-32. Gráfico com as variâncias calculadas para as componentes principais	108
Figura 6-33. Variáveis em cada componente principal calculada.	108
Figura 6-34. Gráfico Biplot gerado para as duas primeiras componentes principais	109
Figura 6-35. Variação diária (8 e 9 Dez. 2009; 2 e 3 Mar. 2010) para os Sólidos Dissolvidos Totais e os Sólidos Totais.	111
Figura 6-36. Variação diária (6 e 7 Abr. 2010) e sazonal (entre meses às 9h00min) para os Sólidos Dissolvidos Totais e os Sólidos Totais.	111
Figura 6-37. Variação sazonal (entre meses às 15h00min e 21h00min) para os Sólidos Dissolvidos Totais e os Sólidos Totais.	111
Figura 6-38. Variação diária (8 e 9 Dez. 2009; 2 e 3 Mar. 2010) para o Nitrogênio Total e o Fósforo Total.....	113
Figura 6-39. Variação diária (6 e 7 Abr. 2010) e sazonal (entre meses às 9h00min) para o Nitrogênio Total e o Fósforo Total.	113
Figura 6-40. Variação sazonal (entre meses às 15h00min e 21h00min) para o Nitrogênio Total e o Fósforo Total.	113
Figura 6-41. Variação diária (8 e 9 Dez. 2009; 2 e 3 Mar. 2010) para o ortofosfato e a clorofila <i>a</i>	115
Figura 6-42. Variação diária (6 e 7 Abr. 2010) e sazonal (entre meses às 9h00min) para o ortofosfato e a clorofila <i>a</i>	115

Figura 6-43. Variação sazonal (entre meses às 15h00min e 21h00min) para o ortofosfato e a clorofila <i>a</i>	115
Figura 6-44. Variação diária (8 e 9 Dez. 2009; 2 e 3 Mar. 2010) para o Nitrogênio Amoniacal.....	117
Figura 6-45. Variação diária (6 e 7 Abr. 2010) e sazonal (entre meses às 9h00min) para o Nitrogênio Amoniacal.....	117
Figura 6-46. Variação sazonal (entre meses às 15h00min e 21h00min) para o Nitrogênio Amoniacal.....	117
Figura 6-47. Variação diária (8 e 9 Dez. 2009; 2 e 3 Mar. 2010) para o Nitrito e o Nitrato.	119
Figura 6-48. Variação diária (6 e 7 Abr. 2010) e sazonal (entre meses às 9h00min) para o Nitrito e o Nitrato.....	119
Figura 6-49. Variação sazonal (entre meses às 15h00min e 21h00min) para o Nitrito e o Nitrato.	119
Figura 6-50. Variação diária (8 e 9 Dez. 2009; 2 e 3 Mar. 2010) para a DBO e os Coliformes Termotolerantes.	121
Figura 6-51. Variação diária (6 e 7 Abr. 2010) e sazonal (entre meses às 9h00min) para a DBO e os Coliformes Termotolerantes.....	122
Figura 6-52. Variação sazonal (entre meses às 15h00min e 21h00min) para a DBO e os Coliformes Termotolerantes.	122
Figura 6-53. Densidades calculadas para a água do reservatório Pereira de Miranda em 8 e 9 Dez. 2009; 26 e 27 Jan. 2010.....	123
Figura 6-54. Densidades calculadas para a água do reservatório Pereira de Miranda em 2 e 3 Mar. 2010; 6 e 7 Abr. 2010.....	124
Figura 6-55. Mapa de contorno das temperaturas registradas no reservatório Pereira de Miranda, em 8 Dez. 2009.....	125
Figura 6-56. Mapa de contorno do Oxigênio Dissolvido registrado no reservatório Pereira de Miranda, em 8 Dez. 2009.....	125
Figura 6-57. Mapa de contorno das temperaturas registradas no reservatório Pereira de Miranda, em 26 Jan. 2010.....	126

Figura 6-58. Mapa de contorno do Oxigênio Dissolvido registrado no reservatório Pereira de Miranda, em 26 Jan. 2010.....	126
Figura 6-59. Mapa de contorno das temperaturas registradas no reservatório Pereira de Miranda, em 3 Mar. 2010.	127
Figura 6-60. Mapa de contorno do Oxigênio Dissolvido registrado no Reservatório Pereira de Miranda, em 3 Mar. 2010.	127
Figura 6-61. Mapa de contorno das temperaturas registradas no Reservatório Pereira de Miranda, em 6 Abr. 2010.....	128
Figura 6-62. Mapa de contorno do Oxigênio Dissolvido registrado no Reservatório Pereira de Miranda, em 6 Abr. 2010.....	128
Figura 6-63. Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais de calor em 8 Dez. 2009, utilizando modelo em MATLAB [®]	130
Figura 6-64. Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais de calor em 26 Jan. 2010, utilizando modelo em MATLAB [®]	131
Figura 6-65. Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais em 2 e 3 Mar. 2010, utilizando modelo em MATLAB [®]	132
Figura 6-66. Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais em 6 e 7 Abr. 2010, utilizando modelo em MATLAB [®]	133
Figura 6-67. Número de Richardson calculado para o reservatório Pereira de Miranda durante o período de amostragem nictemeral.	134
Figura 7-1. Abordagem sistemática dos 3C. Adaptado de Robert C. Ward & Charles A. Peters (2003).	138
Figura 7-2. Ciclo PDCA aplicado à gestão dos recursos hídricos com base no monitoramento e modelagem da qualidade da água.	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1. Distribuição dos Recursos Hídricos no mundo.	22
Tabela 3-1. Processos importantes que afetam a qualidade da água.	31
Tabela 3-2. Relação entre a profundidade média e o comportamento dos lagos tropicais.	46
Tabela 3-3. Faixas aproximadas de valores de fósforo total para os principais níveis tróficos.	53
Tabela 3-4. Limites para o estado trófico definidos por Kratzer & Brezonick (1981) <i>apud</i> Mercante & Tucci-Moura (1999).....	55
Tabela 3-5. Limites para os diferentes níveis de estado trófico segundo o sistema de classificação proposto por Toledo (1990) <i>apud</i> Lamparelli (2004).....	56
Tabela 3-6. Classificação do Estado Trófico de reservatórios segundo índice de Carlson modificado por Lamparelli (2004).....	57
Tabela 4-1. Tabela gerada através do gráfico Cota x Área x Volume do açude Pereira de Miranda.	66
Tabela 5-1. Percentual de amônia não-ionizada com base na temperatura e no pH da água. .	74
Tabela 5-2. Parâmetros de qualidade da água analisados em laboratório.....	77
Tabela 6-1. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para os dados de Temperatura da água.	85
Tabela 6-2. Temperatura do ar registrado durante o período de amostragem.	86
Tabela 6-3. Coeficiente de correlação (r) entre os parâmetros de qualidade da água perfilados por sonda em 8 Dez. 2010.....	92
Tabela 6-4. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados de Oxigênio Dissolvido.	93
Tabela 6-5. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados de pH.....	94
Tabela 6-6. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados de Salinidade.....	94

Tabela 6-7. Coeficiente de correlação (r) entre os parâmetros de qualidade da água perfilados por sonda em 26 e 27Jan. 2010.....	95
Tabela 6-8. Coeficiente de correlação (r) entre os parâmetros de qualidade da água perfilados por sonda em 2 e 23 Mar. 2010.....	98
Tabela 6-9. Coeficiente de correlação (r) entre os parâmetros de qualidade da água perfilados por sonda em 6 e 7 Abr. 2010.....	101
Tabela 6-10. Coeficientes de correlação (r) entre os parâmetros de qualidade da água analisados em laboratório no período de amostragem.....	105
Tabela 6-11. Data e hora das medições durante o período de amostragem.....	105
Tabela 6-12. Níveis calculados (hm^3) do reservatório Pereira de Miranda no período de amostragem.....	105
Tabela 6-13. Coeficiente de correlação (r) entre os parâmetros de qualidade da água analisados em laboratório e os níveis do reservatório Pereira de Miranda no período de amostragem.....	106
Tabela 6-14. Peso fatorial das variáveis nas componentes principais geradas.....	107
Tabela 6-15. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para os Sólidos Totais.....	110
Tabela 6-16. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para os Sólidos Dissolvidos Totais.....	110
Tabela 6-17. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para o Nitrogênio Total.....	112
Tabela 6-18. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para o Fósforo Total.....	112
Tabela 6-19. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para o Ortofosfato.....	114
Tabela 6-20. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para a Clorofila <i>a</i>	114
Tabela 6-21. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para o Nitrogênio Amoniacal.....	116

Tabela 6-22. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para o Nitrito.	118
Tabela 6-23. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para o Nitrato.	118
Tabela 6-24. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para a DBO.	120
Tabela 6-25. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para os Coliformes Termotolerantes.	121
Tabela 6-26. Comparação entre a variação da densidade da água em função apenas da temperatura.	123
Tabela 6-27. Valores calculados para o número de Richardson nos meses em que ocorreu medição nictemeral da temperatura da água.	134
Tabela 7-1. Atividades envolvidas no monitoramento da qualidade da água.	141

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	25
2.1	Objetivo geral	25
2.2	Objetivos específicos	25
3	REVISÃO DA LITERATURA	26
3.1	Definição de lagos e reservatórios	26
3.2	Efeitos da estrutura molecular da água na qualidade dos ambientes aquáticos	27
3.2.1	Calor Específico.....	27
3.2.2	Densidade.....	27
3.2.3	Temperatura	28
3.2.4	Viscosidade	29
3.2.5	Efeitos de superfície.....	29
3.3	Principais fatores que influenciam as condições hidrodinâmicas e da qualidade da água em reservatórios	30
3.3.1	Luz	32
3.3.2	Oxigênio.....	33
3.3.3	pH.....	34
3.3.4	Afluências Hídricas e Correntes Aquáticas	36
3.3.5	Transparência da água.....	37
3.3.6	Estratificação vertical da coluna d'água	38
3.3.7	Estimativa sobre a Estabilidade da Estratificação	46
3.4	Processos naturais em reservatórios	47
3.4.1	Produtividade Biológica.....	47

3.4.2	Variabilidade e mudanças climáticas.....	47
3.4.3	Evolução dos ecossistemas	48
3.4.4	Eutrofização Natural e Cultural	49
3.5	Monitoramento e gestão dos recursos hídricos.....	57
3.5.1	Legislação vigente	58
4	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO.....	62
4.1	Caracterização da Bacia Hidrográfica do Curu.....	62
4.2	Açude Pereira de Miranda	64
4.2.1	Batimetria do reservatório Pereira de Miranda.....	64
5	MATERIAIS E MÉTODOS	67
5.1	Escolha do ecossistema a ser monitorado	67
5.2	Seleção dos pontos de amostragem.....	67
5.3	Frequência temporal amostral.....	68
5.4	Seleção dos principais parâmetros de qualidade da água	69
5.4.1	Nitrogênio Total, Nitrito e Nitrato	73
5.4.2	Amônia total.....	73
5.4.3	Fósforo Total.....	74
5.4.4	Ortofosfato	75
5.4.5	Clorofila <i>a</i>	75
5.4.6	Sólidos Totais e Sólidos Totais Dissolvidos.....	75
5.4.7	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	76
5.4.8	Coliformes Termotolerantes	76
5.4.9	Aquisição de Dados Meteorológicos	77
5.4.10	Análise dos dados de qualidade da água.....	78
5.4.11	Cálculo das densidades	79
5.4.12	Balanco de energia.....	81

5.4.13	Isolinhas da temperatura, oxigênio dissolvido e fluxo de calor na coluna d'água.....	84
6	RESULTADOS	85
6.1	Análise dos dados de qualidade da água	85
6.1.1	Variabilidade sazonal e diária da hidrodinâmica e da qualidade da água.....	85
6.1.2	Densidade da água do reservatório Pereira de Miranda.....	123
6.1.3	Contornos de temperatura e oxigênio dissolvido.....	124
6.1.4	Balço térmico	129
6.1.5	Estabilidade da estratificação.....	134
7	SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA	136
7.1	Monitoramento da qualidade da água	136
7.2	Diretrizes gerais para um modelo de gestão da qualidade da água	140
7.2.1	Diagnóstico inicial do Problema.....	140
7.2.2	Projeto básico de monitoramento.....	140
7.2.3	Aplicação do Ciclo PDCA no monitoramento da qualidade da água.....	142
7.2.4	Sistema de monitoramento acoplado à modelagem numérica.....	144
7.2.5	Programa de Produção do Conhecimento.....	145
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	147
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial ao planeta e atualmente gestores ambientais do mundo inteiro chamam a atenção para o problema da escassez de água limpa. Por ser um recurso finito, a água é fundamental tanto para a sobrevivência do homem como para a manutenção de todas as outras formas de vida e o equilíbrio natural dos ecossistemas. Aproximadamente 71% da superfície terrestre estão cobertos por água, mas grande parte desta porcentagem - superior a 97% - encontra-se nos oceanos, sendo, portanto, impróprias ao consumo e de tratamento via dessalinização inviável (WETZEL, 1983; FRAGOSO Jr. *et al.*, 2009). Somando-se a isso, em torno de 2% da água doce está presa às calotas polares e geleiras, ficando menos de 1% dos recursos hídricos disponíveis à população (TUNDISI, 2008). A Tabela 1-1 mostra como estão distribuídos os recursos hídricos no mundo.

A quantidade e a qualidade da água presente nos ecossistemas devem ser suficientemente adequadas para que haja um desenvolvimento sócio-econômico sustentável e maduro. Atualmente existe uma preocupação com a evolução dos processos que a fazem um bem em constante deterioração, notadamente por causas antropogênicas. Tais processos ameaçam os ecossistemas aquáticos mundiais com a enorme quantidade de poluentes e outras substâncias que adentram no meio, destruindo o equilíbrio por não apresentarem elevada concentração no ambiente natural.

O problema de escassez hídrica ainda é mais forte nas regiões áridas e semiáridas do globo. Estas regiões cobrem aproximadamente um terço da superfície terrestre e são habitadas por quase 400 milhões de pessoas (WILLIAMS, 1999). As reservas brasileiras de água doce, que representam aproximadamente 12% do volume total mundial, não estão distribuídas de maneira uniforme pelo país, visto que 80% delas concentram-se na Amazônia. A região semi-árida do Nordeste, mesmo incluindo grande parte da bacia do rio São Francisco, possui apenas 4% dos recursos hídricos do país, mas abriga 35% da população brasileira, em sua maioria famílias de baixa renda.

A irregularidade pluviométrica, sua má distribuição no tempo e no espaço, a elevada taxa de evaporação/evapotranspiração e as altas temperaturas caracterizam a região semiárida e condicionam o seu desenvolvimento. O clima tropical semiárido é caracterizado por ter precipitações médias anuais entre 25 e 800 mm, pela ausência de estações frias e por apresentarem temperaturas um tanto uniformes, sendo suas subdivisões climáticas baseadas no volume e na distribuição da precipitação (AYOADE 1988; WILLIAMS, 1999).

Na história da humanidade as civilizações sempre se desenvolveram ao longo dos rios, mostrando a necessidade que os seres humanos têm por água. Toda a fonte de água do planeta provém da precipitação pluviométrica; e, embora caia anualmente sobre a superfície terrestre cerca de 105.000 km³ de precipitação, grande parte desta quantidade volta à atmosfera por evaporação e transpiração das plantas.

Tabela1-1. Distribuição dos Recursos Hídricos no mundo.

Localização	Volume de água (x 10³ km³)	% de água doce	% da água total
Água total	1 385 984,5		100
Água doce	35 029,1	100	2,5274
Geleiras e calotas polares	24 064,0	68,6972	1,7362
Águas subterrâneas	10 530,0	30,0607	0,7597
Gelo subterrâneo	300,0	0,8564	0,0216
Lagos e reservatórios	91,0	0,2598	0,0066
Zona vadosa (zona de aeração)	16,5	0,0471	0,0012
Água atmosférica	12,9	0,0368	0,0009
Pântanos	11,5	0,0328	0,0008
Rios	2,1	0,0060	0,0002
Água biológica	1,1	0,0031	0,0001
Água salina	1 350 955,4	-	97,4726
Oceanos	1 338 000,0	-	96,5379
Águas subterrâneas salinas	12 870,0	-	0,9286
Lagoas salinas e mares interiores	85,4	-	0,0062

Fonte: Adaptado de FAO (2009).

Lewis (1996) demonstrou por amostragens aleatórias a partir de mapas que não mais do que 10% dos lagos do mundo são tropicais, sendo os lagos temperados de formação glacial a grande maioria. Com base nesta problemática, e especificamente nas regiões tropicais do globo, as populações sempre tiveram uma preocupação em encontrar uma forma

de conter a água que precipitava e rapidamente escoava para os oceanos. Uma das formas encontradas foi à construção de barragens que bloqueavam as águas dos rios, mantendo armazenada por mais tempo. Righetto (1998) comenta que as águas represadas constituem verdadeira riqueza regional, algumas vezes de vital importância para o desenvolvimento urbano, rural e industrial.

A grande maioria dos problemas ligados à qualidade de água está diretamente relacionada às cargas poluentes que chegam aos recursos hídricos por meio da drenagem. Ligações clandestinas de esgotos domésticos e/ou industriais e a lixiviação do solo introduzem matéria orgânica, nutrientes e organismos patogênicos ao meio aquático. A matéria orgânica é responsável por consumir indiretamente uma parte do oxigênio dissolvido disponível, através de processos de estabilização realizados por bactérias decompositoras. Os nutrientes, especialmente o fósforo e o nitrogênio, potenciais causadores da eutrofização cultural, influenciam na qualidade das águas adiantando o processo de envelhecimento natural dos lagos. Por fim, os organismos patogênicos, cuja origem em esgotos é predominantemente humana, refletem diretamente o nível de saúde da população e as condições de saneamento básico da região (VON SPERLING, 1996).

Conflitos por causa da água tem se tornado comum em várias localidades, movido pelo descaso dos governos e a falta de instrução da população. Miller Jr. (2006) cita um exemplo de conflito pela água que ocorre no Oriente Médio. Nesta região, grande parte da água provém de três rios principais: Nilo, Jordão e Tigre-Eufrates. O crescimento populacional juntamente com falhas no uso - como um ineficiente uso da água na irrigação, por exemplo - torna a região ainda mais necessitada por água. Isso gera um grande problema. Países que se localizam mais a montante dos rios controlam sua vazão através de represamentos. Um exemplo disso é o caso da Turquia, que tem o controle de toda a água que flui rio abaixo para a Síria e para o Iraque. Como a Turquia fica próxima às nascentes dos rios Tigre e Eufrates, é o primeiro país a utilizar seus recursos.

Resolver estes problemas de distribuição de água exigirá que se combine cooperação regional na alocação dos recursos hídricos, crescimento demográfico reduzido, maior eficiência no uso da água, preços de água mais elevados para ajudar a melhorar a eficiência da irrigação e até uma maior importação de grãos para diminuir a necessidade por água (MILLER Jr., 2006). No Brasil a construção de grandes reservatórios tem vários objetivos, servindo à geração de energia elétrica, regularização de vazões e controle de cheias decorrentes de anos bastante chuvosos, abastecimento humano, navegação, irrigação,

dessedentação animal, aquíicultura, recreação entre outras finalidades (ESTEVEES, 1988; SPERLING, 1999; ITEM, 2003).

A qualidade da água armazenada em reservatórios varia sazonalmente, com as estações do ano; diurnamente, com as variações de temperatura entre o dia e a noite e interanualmente, promovidos pelos ciclos naturais ou por mudanças climáticas globais. A precipitação pluviométrica e a evaporação sobre a bacia de drenagem dos lagos, rios e reservatórios, por exemplo, influenciará sobre a afluência de água e aporte de nutrientes e, conseqüentemente, influenciará o comportamento hidrodinâmico do corpo d'água. Períodos chuvosos poderão tornar as águas mais turvas, diminuindo a produtividade; em épocas de estiagem a transparência das águas pode aumentar e, assim, aumentar a produtividade.

Sistemas tropicais apresentam uma proporção de liberação de fosfato dissolvido relativamente maior, embora com uma acumulação de carbono e nutrientes comparativamente menor que os sistemas temperados, como resultados de maiores temperaturas e processos mais acelerados de reciclagem destes nutrientes nos trópicos. Neste sentido, esforços devem ser aplicados para que as características regionais sejam levadas em consideração na construção de hipóteses mais coerentes. Por exemplo, a limnologia se desenvolveu bastante ao longo dos anos, mas isso ocorreu principalmente nas regiões temperadas, que sofrem com processos climáticos diferenciados, quando comparados às regiões tropicais. Lewis (2000) explica que o crescimento das algas em lagos em qualquer latitude pode ser limitado pela disponibilidade de um ou mais nutrientes chave, mudando muitas características do lago se houver um incremento em suas quantidades. Mas, por outro lado, alguns princípios limnológicos não podem ser aplicados em todas as regiões. Lagos dimíticos temperados apresentam uma estação de crescimento que coincide com os meses mais quentes do ano, mas não se sabe se lagos tropicais apresentam tal estação.

Com isso, o gerenciamento de lagos e reservatórios visando à proteção e manutenção de uma boa qualidade da água, a vida aquática e todos os outros usos anteriormente citados devem ser abordados de maneira que se leve em consideração as características regionais. Sabe-se destas diferenças, e que tais diferenças são relevantes e demandam pesquisa científica no sentido de quantificar as potenciais forçantes que alteram a qualidade da água, ajudando na construção de modelos aceitáveis às condições do clima na região semiárida.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é identificar a estratificação térmica e seus impactos nos processos de mistura e na qualidade da água com vistas ao aprimoramento do sistema de monitoramento e modelagem da qualidade da água nos reservatórios do Estado do Ceará, possibilitando a definição de um sistema integrado de gestão da qualidade da água. De uma forma mais ampla, trata-se de analisar o processo de mistura e estratificação térmica em lagos de baixas latitudes, sua relação com as variáveis climáticas e o impacto gerado nos ecossistemas lacustres.

2.2 Objetivos específicos

Especificamente, o trabalho visa:

- i) Identificar padrões de variação diário e sazonal dos parâmetros de qualidade da água;
- ii) Identificar como as variáveis meteorológicas condicionam o processo de mistura nos lagos e notadamente no processo de estratificação térmica;
- iii) Avaliar o impacto do processo de mistura nas variáveis de qualidade da água do reservatório, avaliando a sensibilidade da dinâmica qualitativa da água e dos ecossistemas aquáticos;
- iv) Definir diretrizes para um sistema integrado de gestão da qualidade da água, estabelecendo condicionantes para uma política de monitoramento em regiões semiáridas, através do estabelecimento de critérios que reconheça as especificidades do processo de mistura e a identificação dos fatores climáticos e/ou ambientais que modulam o ciclo de qualidade de água em reservatórios.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Definição de lagos e reservatórios

Os lagos estão distribuídos ao redor do mundo e são mais abundantes nas altas latitudes, particularmente em áreas sujeitas à ação glacial (JI, 2007). Possuem origem associada à ocorrência de fenômenos naturais, de natureza geológica; principalmente fenômenos glaciais, vulcânicos e tectônicos. São considerados ambientes transitórios, que podem desaparecer devido a uma série de fatores como o clima, o assoreamento, a eutrofização, a sedimentação e as alterações hidrológicas (SPERLING, 1999).

Os reservatórios são lagos formados pelo barramento de rios. Portanto, represamento ou barragem são as formações originadas por alterações humanas. O termo barragem pode ser definido como o elemento estrutural construído transversalmente à direção do escoamento de um curso d'água, formando um reservatório artificial, que tem por finalidade a acumulação de água ou a elevação de seu nível (ITEM, 2003). Consistem em barramentos artificiais de rios feitos com a intenção de acumularem água e formarem grandes reservatórios, tendo como objetivo regularizar a vazão de rios, produzirem eletricidade, produção pesqueira, navegação, dentre outros (ITEM, 2003; JI, 2007).

A principal diferença operacional entre lagos e reservatórios é que os primeiros possuem vazões de saída não controláveis, diferentemente dos reservatórios. Reservatórios têm a necessidade de armazenar água e todos os procedimentos operacionais realizados para servir aos usos múltiplos acabam influenciando o comportamento do ecossistema tornando-o diferente de lagos (NASELLI-FLORES, 2003). Outras características que os diferenciam, por exemplo: reservatórios possuem formas alongadas e dendríticas, já os lagos naturais tendem a ser arredondados; reservatórios apresentam maior flutuação no nível e uma melhor capacidade de mistura; as cargas poluentes que chegam em um reservatório tendem a ser maiores que nos lagos, mesmo considerando uma bacia de drenagem com os mesmos usos do solo (fato relacionado ao tamanho da bacia de drenagem do reservatório, que geralmente é maior do que nos lagos) (CHIN, 2006).

Apesar destas diferenças, lagos e reservatórios possuem diversas características em comum e, fisicamente, são classificados como sistemas abertos, que permutam energia e massa com o meio ambiente, o que torna algumas abordagens de uso e de gerenciamento similares (JORGENSEN; VOLLENWEIDER, 2000; CHIN, 2006). Essas coleções d'água

dependem de forçantes ambientais para a sua manutenção e desenvolvimento; forçantes estas que podem ser controláveis ou não, tais como os fatores climáticos precipitação, vento e radiação solar.

Neste trabalho nos referimos a lagos em um sentido genérico. Os reservatórios estudados muitas vezes são chamados de lagos principalmente quando as características utilizadas no desenvolvimento de algum modelo são próximas aos lagos naturais.

3.2 Efeitos da estrutura molecular da água na qualidade dos ambientes aquáticos

3.2.1 Calor Específico

É a quantidade de calor (calorias) necessária para elevar em um grau Celsius (de 14,5 a 15,5 °C) a temperatura da massa de 1g de certa substância. A água tem um elevado calor específico, ficando atrás apenas da amônia (gás) e do hidrogênio (líquido), sendo necessários 4,186kJ para elevar em 1°C a massa de 1kg de água (LAMPERT; SOMMER, 1997).

O calor específico da água promove a conservação de calor pela massa líquida, gerando um ambiente estável, exercendo efeitos profundos sobre as condições climáticas das massas de ar e de terra adjacentes (WETZEL, 1983).

3.2.2 Densidade

A densidade da água é uma propriedade física única. Ela é menos densa no estado sólido que no estado líquido. Como consequência direta, o gelo bóia sobre a água líquida, fato importante em regiões geladas. O gelo, por ser bom isolante térmico, mantém as camadas mais profundas dos lagos em estado líquido, mantendo a vida mesmo em locais onde a temperatura do ar cai abaixo dos 0°C. As diferenças de densidade são em grande parte responsáveis pela regulação de toda a hidrodinâmica lacustre, refletindo impactos em todo o processo metabólico (WETZEL, 1983). É chamada densidade absoluta (kg m^{-3}) a relação entre a massa (kg) e o volume (m^3) de um corpo. Os dois termos são comumente citados referindo-se à mesma relação, sendo massa específica utilizada para corpos homogêneos.

Diferenças na densidade da água propiciam o aparecimento da estratificação térmica, fenômeno que será detalhado mais a frente. Nos reservatórios localizados em regiões

tropicais e subtropicais, a grande variabilidade na densidade da água ocorre em função da intensa radiação solar, que gera altas temperaturas. É interessante notar que mesmo pequenas variações de temperatura – na ordem de décimos de grau – podem influenciar na densidade.

Para o nordeste setentrional brasileiro, variações de 1°C na temperatura da água produzem um efeito similar a variações de até 6°C de certas regiões temperadas (Figura 3-1). Essa relação é devida a não-linearidade que a curva densidade-temperatura apresenta. Por ser um parâmetro básico na hidrodinâmica e nos estudos de qualidade de água, seu cálculo deve ser o mais preciso possível.

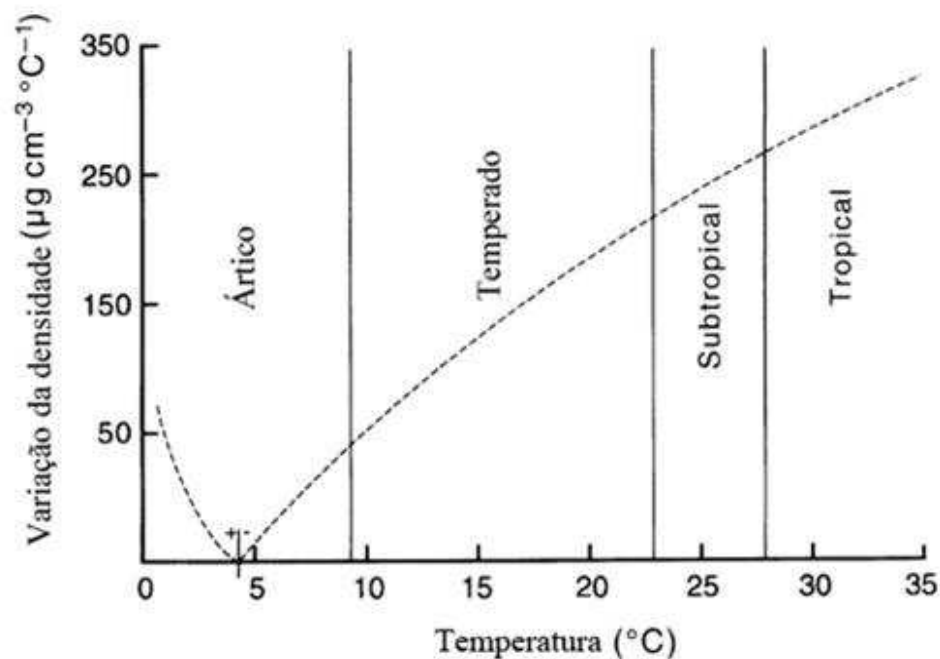


Figura 3-1. Mudança na densidade relativa ao aumento de 1°C na temperatura da água. Adaptado de Lewis (2000).

3.2.3 Temperatura

A distribuição de temperatura em reservatórios é uma característica fundamental desse ecossistema, com repercussão na circulação das águas, processo de mistura, transporte de sedimentos e de nutrientes e no equilíbrio da fauna e da flora do ambiente (RIGHETTO, 1998).

Os ventos e as correntes aquáticas transportam o calor por meio da difusão por turbilhões, levando-o até uma profundidade a qual sua força permita. Estes processos físicos resultam em gradientes de calor, gerando por consequência gradientes químicos que

influenciam a distribuição dos organismos dentro do lago. Apesar da condutividade térmica da água ser maior que a de muitos outros líquidos ($0,569\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), a transmissão de calor por difusão molecular é um processo muito lento em comparação com a mistura turbulenta, sendo negligenciado para fins de cálculo em lagos (LAMPERT; SOMMER, 1997).

O efeito da variação de temperatura é de extrema importância nos ambientes aquáticos, visto sua relação direta com a solubilidade de gases e também sobre o metabolismo dos organismos. Para o oxigênio, vital aos seres aeróbios, um aumento de 10°C na temperatura reduz sua solubilidade em 20% (LAWS, 1993). Modificações na temperatura também influenciam reações químicas e processos fisiológicos dos organismos, afetando diretamente a resposta de enzimas que controlam suas reações bioquímicas. A conhecida Lei de van't Hoff afirma que um aumento de 10°C duplica a velocidade de uma reação química. Por ser composta por uma série de reações químicas, a atividade metabólica dos organismos aquáticos é afetada por esse incremento de temperatura.

3.2.4 Viscosidade

A viscosidade da água, ou viscosidade dinâmica, é função da temperatura e das substâncias dissolvidas, sendo denotada por μ . É gerada pela mútua atração entre suas moléculas, resultando em uma resistência ao fluxo, medida em Pa s ($1\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$). A viscosidade da água decresce com o incremento de temperatura, portanto, águas mais quentes podem ser consideradas “mais fluidas” (LAMPERT; SOMMER, 1997). A viscosidade cinemática (ν) corresponde à razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido em questão.

3.2.5 Efeitos de superfície

A associação entre as moléculas de água é bastante notável na interface superficial, que serve de habitat para diversos seres, como os organismos constituintes do *pleuston* (WETZEL, 1983). Isso é possível graças à tensão superficial, que na água pura é a maior dos líquidos, ficando atrás apenas do mercúrio (LAMPERT; SOMMER, 1997). Tanto a temperatura como alguns poluentes afetam a tensão superficial da água, prejudicando a sobrevivência de diversos organismos.

A tensão superficial da água ocorre devido às forças de coesão e adesão moleculares. A atração entre duas moléculas de água é proporcionada pela formação das

pontes de hidrogênio, caracterizando a coesão. Já a adesão é a atração das moléculas de água por outras substâncias, devido sua polaridade. O grau de adesão depende da composição química da superfície (LAMPERT; SOMMER, 1997).

3.3 Principais fatores que influenciam as condições hidrodinâmicas e da qualidade da água em reservatórios

A qualidade dos ambientes aquáticos depende de vários fatores, podendo ser descrita na forma da qualidade de suas águas, a composição e o estado da vida biológica presente; a formação e o histórico do corpo d'água e das ações humanas no passado; a natureza da matéria particulada. Outro fator importante são seus aspectos físicos como a hidrologia, suas dimensões, a natureza do fundo e o leito do rio; a climatologia; o tamanho e a forma de sua bacia de drenagem, dentre outros (BARTRAM; BALLANCE, 1996; JI, 2007).

Além destes supracitados, fatores ambientais provocados por condições climáticas, geográficas e geológicas, entre elas, a distância do oceano e sua influência de Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , SO_4^{2-} ; o clima predominante e a vegetação; a composição das rochas e a vegetação aquática, que afeta a concentração de nutrientes como o nitrogênio e o fósforo, o pH, oxigênio dissolvido e outras substâncias químicas sensíveis às condições de óxido-redução, correspondem a grande massa de agentes qualitativos (BARTRAM; BALLANCE, 1996). A Tabela 3-1 mostra resumidamente os principais grupos de processos que afetam a qualidade da água. Basicamente existem quatro fatores principais que controlam as condições hidrodinâmicas no lago: morfometria, vazões, tempo de residência e estratificação da densidade (JI, 2007). A profundidade média e o tempo de residência são dois índices-chave que representam bem as características físicas de um lago. A profundidade média de um lago (Z) é igual ao seu volume (V) dividido pela área superficial (A):

$$Z = \frac{V}{A} \quad (1)$$

Tabela 3-1. Processos importantes que afetam a qualidade da água.

Processo	Importância	Corpo d'água
Hidrológico	Diluição	Todos
	Evaporação	Águas superficiais
	Percolação e lixiviação	Águas subterrâneas
	Suspensão	Águas superficiais
Físico	Trocas gasosas	Principalmente rios e lagos
	Volatilização	Principalmente rios e lagos
	Adsorção/dessorção	Todos
	Troca de calor	Principalmente rios e lagos
	Difusão	Todos
Químico	Fotodegradação	Todos
	Reações ácido/base	Todos
	Reações redox	Todos
	Dissolução de partículas	Todos
	Precipitação de minerais	Todos
	Troca iônica	Águas subterrâneas
Biológico	Produção primária	Águas superficiais
	Crescimento e morte microbiana	Todos
	Decomposição de matéria orgânica	Principalmente rios e lagos
	Bioacumulação	Principalmente rios e lagos
	Biomagnificação	Principalmente rios e lagos

Fonte: Adaptado de BARTRAM & BALLANCE, 1996.

Em geral, a profundidade média é inversamente relacionada à produtividade biológica nos lagos. Lagos com grandes profundidades médias geralmente são menos produtivos que os lagos de pequenas profundidades (JI, 2007).

Os lagos podem ser classificados como rasos (< 7 m) e profundos (> 7 m) e podem ser divididos quanto ao seu tempo de residência ou detenção hidráulico, apresentando um curto tempo de residência (< 1 ano) ou longos tempos de residência (\geq 1 ano) (HUTCHINSON, 1957; WETZEL, 1975; CHAPRA, 1997 *apud* JI, 2007).

Em geral, o tempo de residência de reservatórios é da ordem de anos, diferentemente dos rios, que é da ordem de dias. Problemas de poluição aquática em reservatórios podem ser bem persistentes devido a um longo período ou tempo de residência nesses ambientes. O grau de estratificação em lagos ou reservatórios depende diretamente do tempo de residência e de seus altos valores, enquanto que para tempos de residência muito

curtos (< 14 dias) a estratificação não se desenvolve (JØRGENSEN *et al.*, 2005 *apud* CHIN, 2006). O tempo de residência, t_d , pode ser definido pela relação

$$t_d = \frac{V_l}{Q_o} \quad (2)$$

onde V_l é o volume médio do reservatório e Q_o é a taxa média da vazão de saída (CHIN, 2006). Por ser uma aproximação, muitas vezes não reflete a realidade do tempo de residência observado.

3.3.1 Luz

A radiação solar é de extrema importância na dinâmica dos ecossistemas aquáticos uma vez que toda a energia que dirige e controla o seu metabolismo advém da energia solar utilizada na fotossíntese, além das influências no seu balanço térmico (RODRIGUES, 2003). A redução da penetração de luz através da coluna de água de um lago é uma função do espalhamento (*scattering*) e da absorção, influenciando a distribuição e comportamento dos organismos (CHIN, 2006).

Ao atravessar a atmosfera terrestre, parte da radiação solar atinge a superfície da água gerando duas parcelas: uma parte penetra na coluna d'água e outra parte é refletida, voltando à atmosfera (Figura 3-2). A taxa de radiação refletida depende do ângulo de incidência e das condições da superfície da água, variando de 2 a 100% da radiação incidente. Essa parcela incidente transforma-se rapidamente em energia calorífica, propagando-se lentamente ao longo da coluna de molécula a molécula e sendo exponencialmente absorvida com o aumento da profundidade (ESTEVES, 1988). Grande parte da radiação solar (entre 50 e 60%) é absorvida já no primeiro metro de profundidade e o processo condutivo é muito demorado, gerando algumas vezes uma redução drástica de temperatura.

A intensidade luminosa mínima necessária à atividade fotossintética é de cerca de 1% da radiação incidente da superfície (COLE, 1979 *apud* CHIN, 2006). A porção da coluna d'água que absorve 99% dessa energia luminosa recebe o nome de zona eufótica. Logo abaixo desta zona, onde a luz pode ser negligenciada em termos fotossintéticos, está a zona afótica. O limite entre estas duas zonas recebe o nome de ponto de compensação, por apresentar a atividade fotossintética equiparando-se a atividade respiratória, e, por isso, a produção líquida é igual a zero (CHIN, 2006).

Diversos fatores interferem na qualidade e na quantidade da radiação solar subaquática, como as condições hidrometeorológicas e os usos e ocupações da bacia hidrográfica, pela entrada de material particulado e dissolvido no sistema, além dos fatores altitude solar, cobertura das nuvens, época do ano e hora do dia (RODRIGUES, 2003).

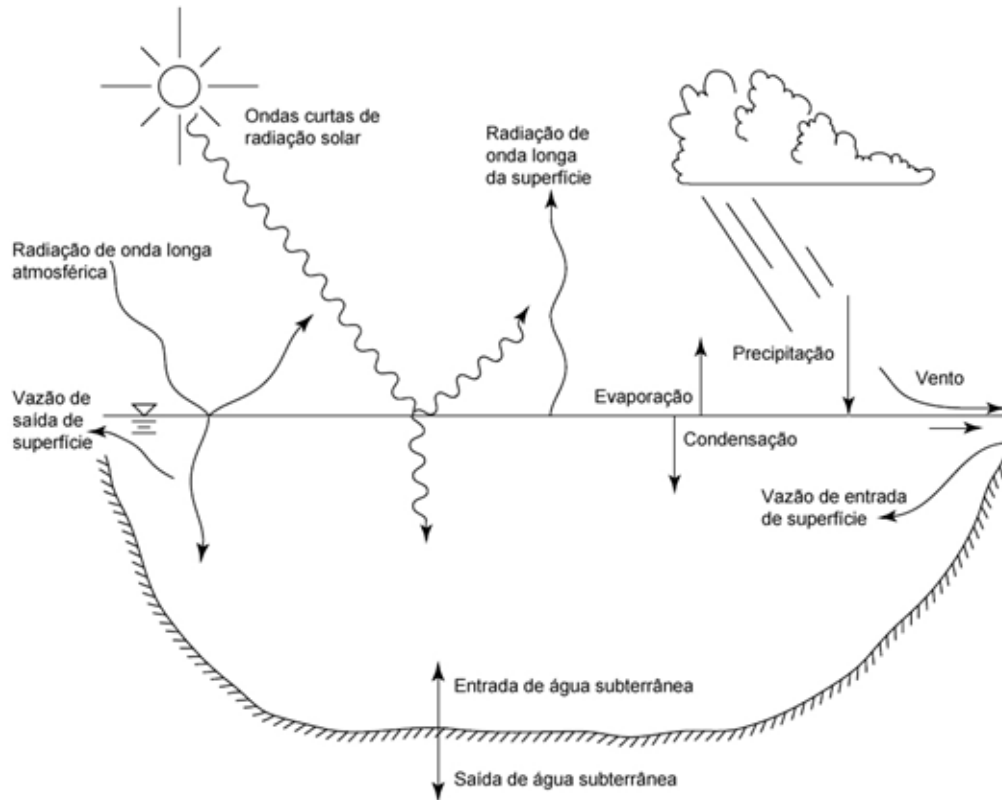


Figura 3-2. Principais componentes da radiação solar. Adaptado de SOCOLOFSKY & JIRKA (2004).

3.3.2 Oxigênio

A concentração do oxigênio dissolvido na água é afetada por vários fatores incluindo a temperatura do ambiente, pressão atmosférica e a atividade iônica (LEWIS, 2006). Dados precisos de sua concentração no ambiente são essenciais para analisar mudanças resultantes dos fenômenos naturais ou de atividade humana. O ecossistema aquático é muito complexo e a variabilidade na concentração do oxigênio dissolvido passa por fatores interativos de diferentes componentes, que no ambiente aquático estão em pleno equilíbrio.

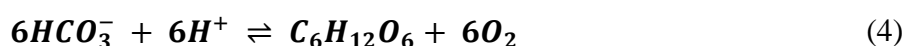
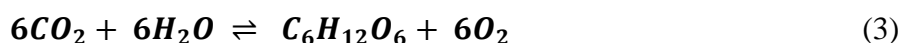
Este sistema de complexas interações das populações entre si e com o ambiente define o funcionamento e a relação entre estes dois compartimentos em uma unidade funcional de tamanho variável (ODUM, 1975; ELLENBERG, 1973; NYBAKKEN, 1982; SCIALABBA, 1998 *apud* GARCIA, 2003).

As fontes do oxigênio dissolvido na água incluem a aeração atmosférica e a atividade fotossintética das plantas aquáticas (ESTEVEES, 1988). Várias reações químicas e biológicas que acontecem na água dependem diretamente ou indiretamente da quantidade de oxigênio disponível. Ele é responsável pela sobrevivência e crescimento de vários organismos aquáticos e é usado como um indicador da saúde dos corpos hídricos.

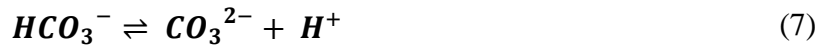
Os lagos possuem duas regiões divididas com base nos processos recorrentes da produção de oxigênio (presença de luz) e do consumo (ausência de luz). A região onde o oxigênio é produzido e a matéria orgânica é sintetizada é chamada de zona tropogênica e a região de degradação de matéria orgânica e consumo de oxigênio é chamada de zona trofólítica (LAMPERT; SOMMER, 1997).

3.3.3 pH

A maioria das águas naturais tem valores de pH variando entre 6,0 e 8,0 (ESTEVEES, 1988). Diferenças verticais na atividade biológica em lagos levam ao desenvolvimento de gradientes e mudanças temporais no pH, que é afetado por três processos principais: fotossíntese, respiração e assimilação de nitrogênio (LAMPERT; SOMMER, 1997). O processo fotossintético juntamente com a respiração afeta grandemente o pH da água devido ao equilíbrio entre carbonatos, bicarbonatos e o dióxido de carbono



A primeira equação simplificada representa a fotossíntese na sua forma direta (da esquerda para a direita). O reverso é a respiração. O resultado direto desta equação é que quando o pH é menor que 6,3 e o dióxido de carbono é a forma dominante, a respiração e a fotossíntese tem pequeno efeito sobre o pH. Para valores mais alcalinos, as outras formas ficam disponíveis, e a retirada/liberação de íons H^+ ocorre, afetando a alcalinidade e a capacidade tampão do sistema (WETZEL, 1983; ESTEVEES, 1988). A Figura 3-3 mostra as proporções relativas das formas do dióxido de carbono em função do pH da água e seu relacionamento como segue as Equações 5, 6 e 7



A variabilidade do pH na água é função principalmente do equilíbrio entre os bicarbonatos, carbonatos e o dióxido de carbônico. O dióxido de carbono não segue a lei de Henry para os gases dissolvidos, sendo encontrado acima do que seria esperado nas águas naturais (LAMPERT; SOMMER, 1997). Quando ele se dissolve na água, uma pequena proporção se liga com a água para formar o fraco ácido carbônico, que por sua vez dissocia-se em bicarbonato e um cátion H^+ . Este processo já abaixa o valor do pH. Uma segunda reação pode então ocorrer, liberando outro cátion H^+ , reduzindo ainda mais seus valores. Este processo é dependente do próprio pH da água, e só ocorre em uma dada faixa fixa.

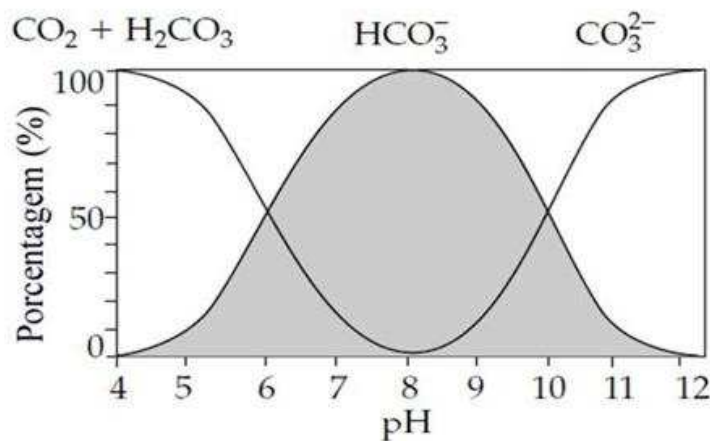
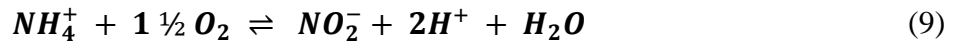


Figura 3-3. Proporções relativas das formas do dióxido de carbono em função do pH. Adaptado de Lampert & Sommer (1997).

O pH dos ambientes aquáticos também sofre grande influência das transformações por que passa o nitrogênio. A natureza e as quantidades disponíveis das formas de nitrogênio no meio aquático muitas vezes determinam a produtividade do sistema. A formação de compostos nitrogenados ocorre como resultado da decomposição aeróbia e anaeróbia da matéria orgânica presente (ESTEVES, 1988). A amônia é a principal excreta dos organismos aquáticos (peixes, por exemplo), permanecendo em equilíbrio de acordo com o pH da água e a quantidade de íons H^+



A amônia ionizada (NH_4^+) é oxidada em meio aeróbio em nitrito, pelas bactérias do gênero *Nitrossomonas*



O nitrito por sua vez é oxidado em nitrato, via bactérias do gênero *Nitrobacter*



Tais reações ocorrem em ambiente oxigenado e são dependentes do pH do meio. O processo inverso é a respiração do nitrato, sendo compostas por duas outras reações: a amonificação do nitrato e a desnitrificação (ESTEVES, 1988). A desnitrificação ocorre principalmente em condições anaeróbias e sua principal localização se dá no sedimento. A nitrificação e desnitrificação são processos acoplados onde ao final de um período e em condições anaeróbias, ocorre grande quantidade de nitrogênio amoniacal. A oxigenação do meio aquático desencadeia o processo de nitrificação, resultando no consumo da amônia acumulada (PEREIRA; MERCANTE, 2005).

3.3.4 Afluências Hídricas e Correntes Aquáticas

A afluência hídrica é uma dentre as principais características que diferenciam lagos de rios. As águas correntes nos rios favorecem o processo de mistura completa, impossibilitando o aparecimento de gradientes verticais, exceto para a luz solar (FORD; JOHNSON, 1986; LAMPERT; SOMMER, 1997). Reservatórios apresentam correntes aquáticas formadas principalmente pelas afluências, fato que influencia diretamente na quebra da estratificação térmica formada, juntamente com as vazões de saída, transferência de energia pelos ventos, alterações da pressão atmosférica, gradientes horizontais de densidade e pela força de Coriolis (WETZEL, 1983; MARTIN & McCUTCHEON, 1999; CHIN, 2006).

Apesar de menos intenso se comparado a rios ou oceanos, o movimento da água nos reservatórios influencia a distribuição dos nutrientes, dos microorganismos e do plâncton, além de afetarem a produtividade biológica e os biota aquáticos (CHIN, 2006).

3.3.5 Transparência da água

A transparência da água em um ambiente aquático é de extrema importância por influenciar sua estrutura térmica e nos padrões de circulação e de estratificação térmica. De acordo com o regime luminoso, a divisão do lago ocorre em dois compartimentos, de acordo com a presença ou ausência de luz. A região da zona fótica ou zona de compensação luminosa delimita o espaço vertical onde as produções fotossintéticas de oxigênio se equivalem ao seu consumo pela respiração dos organismos. Abaixo desta zona aparece a zona afótica, que é a região onde a respiração predomina e a luz é inferior a 1% da incidente superficial.

Um dispositivo bastante simples e muito utilizado na quantificação da transparência da água e na avaliação da profundidade da zona fótica é o disco de Secchi. O disco de Secchi foi inventado pelo padre italiano Pietro Angelo Secchi. Foi utilizado pela primeira vez em 1865, na medição da transparência da água do Mar Mediterrâneo. A transparência da água medida com o disco de Secchi é uma das mais simples e frequentes medições limnológicas (CARLSON, 1977). Atualmente os discos utilizados medem 20 cm de diâmetro, alternando partes brancas e pretas pintadas em metal, fato que facilita sua visualização e o contraste na água. A transparência da água medida pelo disco de Secchi varia bastante entre os ecossistemas aquáticos e depende do regime de circulação da massa de água, da natureza geoquímica da bacia e do regime das chuvas (POMPÊO, 1999).

A radiação de onda curta a uma dada profundidade pode ser descrita utilizando a lei de Beer-Lambert (MARTIN & McCUTCHEON, 1999)

$$H_{sw,z} = H_{sw} e^{-k_e z} \quad (11)$$

Onde z é a distância (m) da superfície até a profundidade em que se deseja saber a radiação. K_e (m^{-1}) é o coeficiente de extinção da luz determinado para cada corpo hídrico.

3.3.6 Estratificação vertical da coluna d'água

Um fator importante que influencia a qualidade da água de lagos e reservatórios é a estratificação térmica, que ocorre quando a água do lago atua como dois corpos de diferentes densidades, um flutuando sobre o outro (BARTRAM; BALLANCE, 1996). Portanto, a estratificação da densidade é a estratificação não homogênea de um fluido devido às diferenças de densidade (FORD; JOHNSON, 1986).

É sempre mais didático iniciar a discussão sobre a estratificação térmica dos lagos pelo exame das condições típicas das regiões de zonas temperadas, que passam por situações mais fortemente contrastantes em termos de sazonalidade (WETZEL, 1983).

Dadas as modificações ocorridas pelo represamento de um rio, alterações significativas nos aspectos hidráulicos do sistema transformam o ambiente que antes era lótico em lântico (zona de represamento). Esse ambiente lântico, em algumas épocas do ano, adicionadas de alguns fatores como a profundidade e a temperatura do ar, favorecem o aparecimento da estratificação térmica, que é definida como o processo de gradeamento das temperaturas da superfície e do fundo de um lago (ESTEVES, 1988). Tal processo depende das características físicas da água, provocando efeitos de grande importância nos corpos de água submetidos à radiação solar, visto que as camadas superiores do reservatório absorvem grande parte da energia luminosa, aquecendo-se mais rapidamente. Esse aquecimento diminui a densidade fazendo com que ocorra uma separação das camadas pela diferença de temperatura, criando-se regiões distintas.

A estratificação térmica nos reservatórios é muito importante visto que implica numa estratificação química, física e biológica, gerando conseqüências na distribuição espacial de organismos e nos ciclos biogeoquímicos. Além disso, todos os processos químicos e biológicos são de alguma forma, dependentes da temperatura (FORD; JOHNSON, 1986).

Um típico perfil térmico de verão que ocorre em lagos temperados pode ser visualizado na Figura 3-4. De acordo com a faixa de transição térmica, três camadas podem ser descritas:

1. Epilímnio: Camada superior, caracterizada por uma temperatura uniforme e quente devido o recebimento da maior parte da energia solar, possuindo certa turbulência (WETZEL, 1983).
2. Metalímnio: Camada intermediária, localizada entre o epilímnio e o hipolímnio, é marcada por uma grande descontinuidade na temperatura, conhecida também por termoclina.

3. Hipolímnio: Camada inferior, fria e densa; relativamente calmo e subjacente ao metalímnio (WETZEL, 1983).

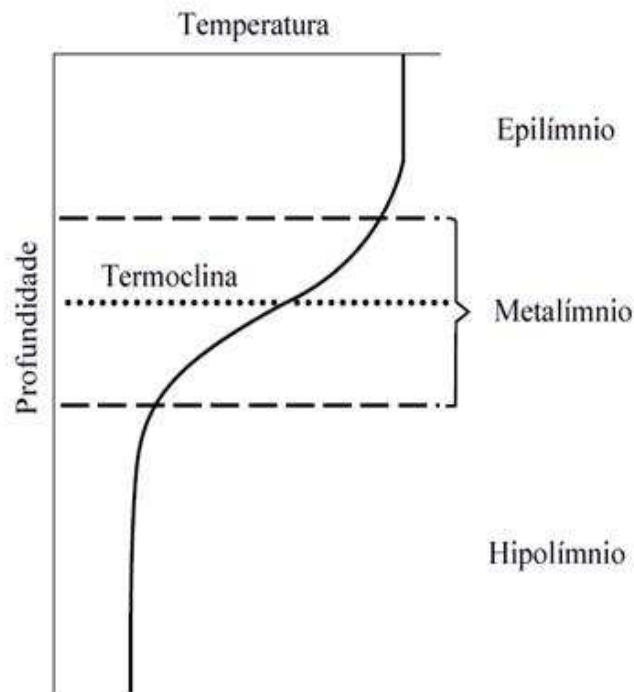


Figura 3-4. Um típico perfil térmico de verão em lagos temperados. Adaptado de Lampert & Sommer (1997).

O epilímnio é geralmente bem misturado principalmente pela ação direta dos ventos, além de representar a parte menos densa em virtude do aquecimento pela radiação solar (JI, 2007). Este aquecimento juntamente com o aporte de nutrientes (principalmente fósforo e nitrogênio) favorece a produtividade primária, que utiliza essa energia luminosa na produção de matéria orgânica. Em alguns casos essa produtividade é tamanha que gera um aumento muito elevado na turbidez da água, reduzindo ainda mais a penetração dos raios solares, afetando negativamente zonas mais profundas (ESTEVEZ, 1988).

Logo abaixo do epilímnio segue o metalímnio, que é uma zona de transição entre as águas mais aquecidas e as águas mais frias. Ele exibe uma taxa máxima de decaimento da temperatura com relação à profundidade, e o mínimo de mistura vertical (JI, 2007). Embora o termo termoclina seja utilizado frequentemente como sinônimo de metalímnio, a termoclina atualmente representa o plano de taxa máxima de decaimento térmico, que está localizada dentro do metalímnio.

O hipolímnio é a camada que se estende ao longo da profundidade a partir do metalímnio e onde ocorre a sedimentação da matéria orgânica advinda de fontes alóctones e

autóctones, dada à estratificação da coluna d'água (ESTEVEZ, 1988; JI, 2007). Nela, uma porção mais densa e fria permanece formada até que alguma força ou energia externa provoque sua mistura.

Chin (1996) apresenta uma classificação para lagos com base nos padrões anuais de mistura:

1. Lagos amícticos: Lagos que nunca misturam e estão permanentemente cobertos por gelo, encontrados em regiões frias como a Antártida e em algumas montanhas de grande altitude;
2. Lagos holomícticos: Lagos que apresentam mistura completa da superfície ao fundo, impulsionada pela força dos ventos, não sendo verificada estratificação térmica. Dividem-se em sub-categorias:
 - 2.1. Oligomícticos: Caracterizados por uma mistura irregular e de pequena duração; ocorre geralmente em lagos pequenos e médios de regiões tropicais ou em lagos muito profundos;
 - 2.2. Monomícticos: Apresentam um período regular de circulação total que ocorre em alguma época do ano. Podem ser quentes, com a temperatura no inverno nunca ficando abaixo de 4°C, ou lagos gelados, com a temperatura máxima de verão não ultrapassando os 4°C. Lagos monomícticos frios estão relacionados com altas latitudes e altitudes e se apresentam congelados a maior parte do ano. O processo de estratificação nesses lagos ocorre devido o aquecimento da superfície. Outro fator importante é o processo de alteração da densidade no hipolímnio, devido a entrada de água de precipitação, que possui uma menor temperatura e com isso, uma maior densidade;
 - 2.3. Dimícticos: Lagos que misturam duas vezes por ano, na primavera e no outono;
 - 2.4. Polimícticos: Lagos que misturam freqüentemente e continuamente, possuindo variações diurnas mais significativas que o caráter sazonal. Muito comum em lagos rasos, que sofrem grande ação dos ventos. A estratificação é formada e mantida por um período curto de tempo, desaparecendo rapidamente.
3. Lagos meromícticos: São lagos que não misturam em toda a extensão da coluna d'água e possuem uma camada que permanece estagnada e sem circulação, denominada monimolímnio. Apresentam uma quantidade significativa de compostos dissolvidos. A anoxia é marcante nesses lagos assim como a formação da quimioclina.

A estratificação térmica pode ter impactos significativos na qualidade da água de reservatórios, seja pela interferência nos processos químico-biológicos ou pela limitação aeróbia causada pela redução da capacidade de difusão do oxigênio dissolvido até camadas mais profundas abaixo da linha do metalímnio. A temperatura e sua distribuição dentro de um lago alteram não somente a qualidade da água, como também pode afetar seu regime térmico e todo o sistema fluvial à jusante (CHIN, 1996). Ela permanece formada principalmente em locais onde o vento não atua promovendo a turbulência e a circulação da água, mantendo as camadas de densidades diferentes separadas. Em alguns casos a estratificação das camadas lacustres pode ser resultado de uma distribuição heterogênea de salinidade, o que é bem menos comum de acontecer (FORD; JOHNSON, 1986).

Segundo Chin (1996), três classes distintas de lagos podem ser identificadas: lagos fortemente estratificados, fracamente estratificados e os não-estratificados. Os primeiros caracterizam-se por apresentarem profundidades elevadas e a presença de isotermas horizontais; o segundo apresenta isotermas inclinadas ao longo de seu eixo longitudinal e por último, lagos não estratificados mostram certa uniformidade na distribuição da temperatura, significando isotermas verticais.

3.3.6.1 Fatores que afetam a Estratificação Térmica

Os principais fatores que influenciam a formação, a estabilidade e a extensão da estratificação são a densidade da água; a radiação solar e o calor transferido entre a interface ar/água; e a mistura resultante da advecção (vazões de entrada e saída) e os ventos (FORD; JOHNSON, 1986).

A radiação solar é a principal fonte de energia para o aquecimento da água. A radiação de onda curta incide na superfície da água aquecendo-a, e através de processos de transporte de calor e de massa o corpo d'água torna-se estratificado e caracterizado por distribuições verticais de temperatura e densidade (RIGHETTO, 1998).

Em reservatórios, a estratificação da densidade é causada principalmente pela temperatura (estratificação térmica), mas diferenças de densidade resultantes de variações nas concentrações de sólidos dissolvidos e suspensos totais podem ser importantes (FORD; JOHNSON, 1986). Esta estratificação implica em uma incompleta mistura vertical, gerando regiões distintas no reservatório que por final impactam na qualidade da água. Lewis (1996) observa ainda que alguns lagos podem apresentar padrões de mistura e/ou estratificação que

não se originam de variações sazonais na radiação solar, mas, por fatores hidrológicos ou ventos sazonais que desestabilizam os reservatórios anualmente.

3.3.6.2 Diferenças entre lagos tropicais e temperados e distribuição geográfica

Existem dois contrastes latitudinais principais entre os lagos: as características fisiográficas e o clima predominante (LEWIS, 2000). Os contrastes fisiográficos indicam a diferença existente entre a abundância relativa de lagos por unidade de área, juntamente com a proporção entre os diferentes tipos de lagos. Já o clima predominante são as variáveis climáticas fundamentais, que estão associadas com a latitude local.

A distribuição dos lagos por latitude pode ser observada na Figura 3-5. Regiões subtropicais tendem a ter uma pequena porcentagem em termos de área lacustre devido à baixa precipitação, que coincide com zonas de alta pressão (McGRECOR; NIEUWOLT, 1998 *apud* LEWIS, 2000); e a escassez de bacias glaciais. O gráfico a seguir mostra a importância da construção dos reservatórios nessas regiões, visto a necessidade de água pela população e a distribuição desigual dos lagos no mundo. A Figura 3-5 mostra a diferença de temperatura na superfície e no fundo de lagos provocado por sua localização latitudinal.

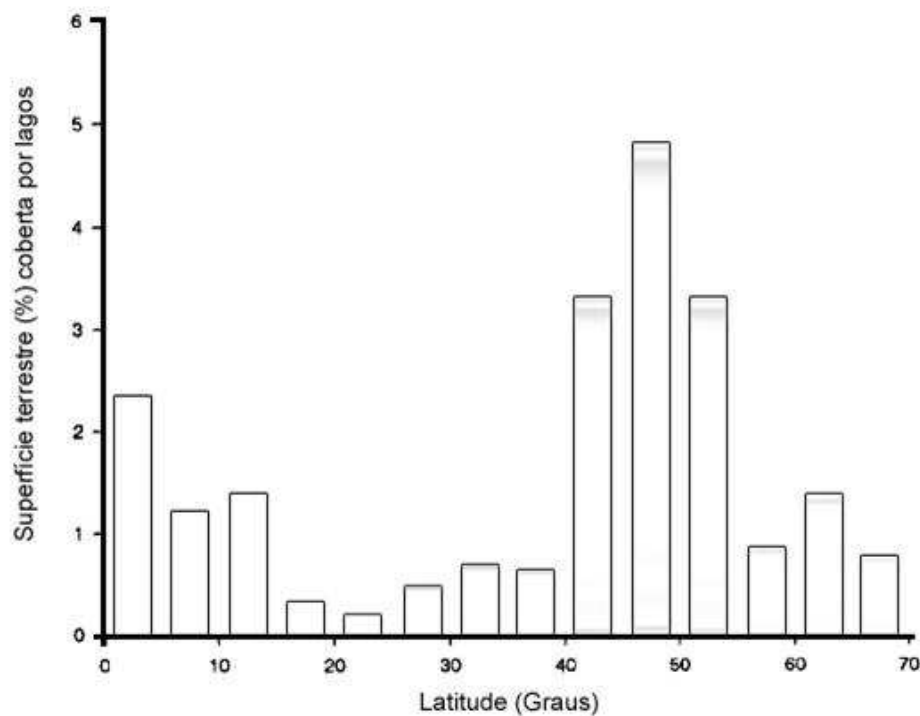


Figura 3-5. Distribuição dos lagos conforme a latitude. Adaptado de Herdendorf (1990) *apud* Lewis (1996).

Do equador até uma latitude de 40° o declínio na temperatura média é explicado principalmente pelo acentuado declínio na temperatura mínima anual, como o refletido pela temperatura do fundo da coluna da água durante a estratificação. Assim, lagos tropicais e temperados são diferenciados mais fortemente pelas mínimas temperaturas do que pelas altas temperaturas.

Em regiões temperadas, mudanças sazonais na temperatura da água são associadas com os processos de mistura e estratificação. A sazonalidade é reduzida nos trópicos, o que não significa ausência. A Figura 3-6 apresenta uma comparação entre a temperatura na superfície e no fundo dos lagos durante a estratificação, em função da latitude.

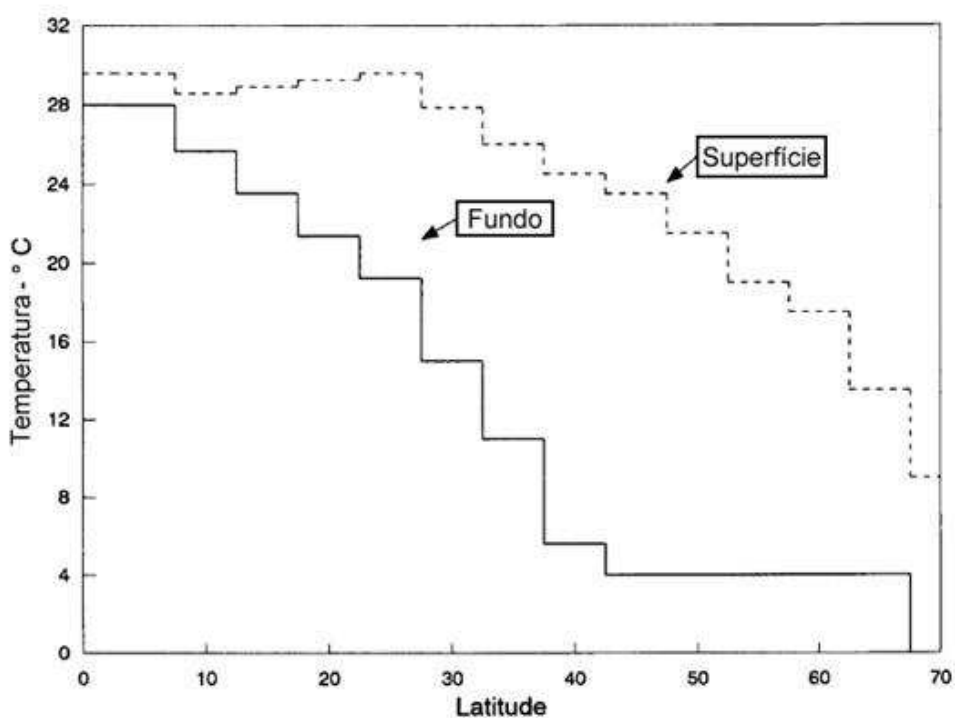


Figura 3-6. Temperatura na superfície e no fundo em lagos durante a estratificação, em função da latitude. Adaptado de Lewis (1996).

3.3.6.3 Estratificação térmica da água em lagos tropicais

Em regiões localizadas nas baixas latitudes observamos que a influência sazonal tão importante em regiões de clima temperado, é bem menos relevante que a variabilidade diária, como o proposto no trabalho realizado por Ruttner (1940) *apud* Esteves (1988), comparando o aumento da resistência à mistura das camadas de diferentes densidades, em relação à densidade padrão que ocorre em 4-5 °C. O resultado mostrou que com o aumento da

temperatura, maior é a resistência das camadas à mistura. Portanto, regiões de clima tropical exibem diferenças entre densidades mais intensas, gerando camadas mais estáveis em relação à estratificação. Isto explica por que pequenas variações de temperatura são capazes de estratificar os corpos d'água nesses locais. A Figura 3-7 mostra uma representação seqüencial das mudanças sofridas pela camada de mistura em um lago tropical, através de um período de perda e de ganho de calor promovidos pelo aquecimento da água e pela ação dos ventos.

Uma característica física comum dos lagos em regiões tropicais são suas pequenas variações sazonais na temperatura da água, como resultado de uma radiação relativamente constante. As temperaturas da água geralmente são elevadas, mas diminuem com o aumento da altitude. A amplitude térmica anual da água é apenas 2-3°C na superfície e muito menos em profundidades superiores a 30 m, e diferenças de densidade são mínimos, pois a temperatura da água é quase constante (BARTRAM; BALLANCE, 1996). Os ventos, a precipitação e a radiação, que tendem a ser sazonais, desempenham um papel importante na mistura da coluna de água.

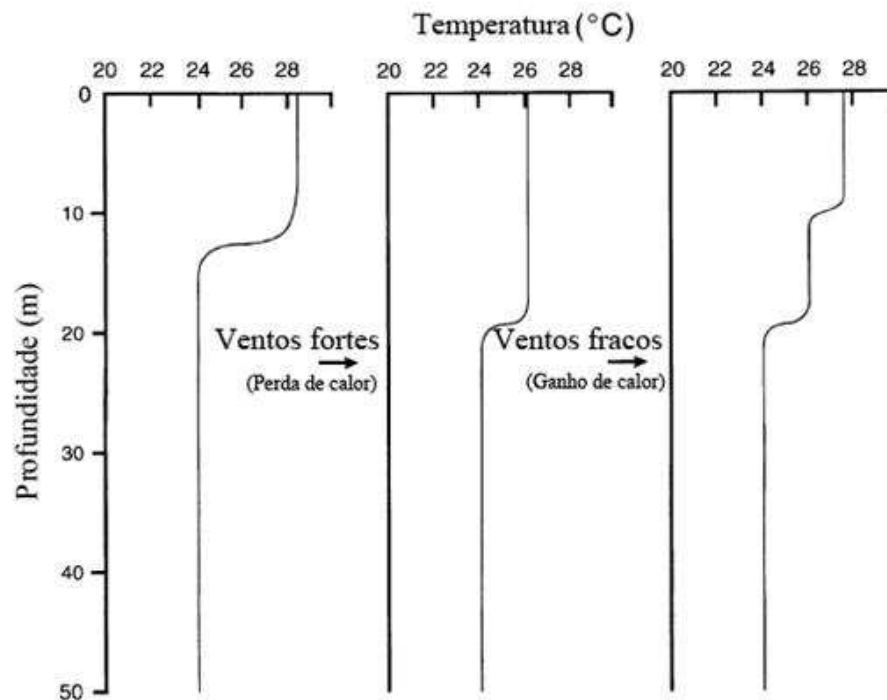


Figura 3-7. Representação da seqüência de mudanças sofridas pela camada de mistura em um lago tropical, através de um período de perda e de ganho de calor. Adaptado de Lewis (2000).

Os padrões de estratificação térmica, mesmo em ecossistemas localizados em uma mesma região, são muito variáveis. Reservatórios da região semi-árida nordestina costumam apresentar ciclos de estratificação e desestratificação explicados em parte por sua maior variabilidade de temperatura ocorrer no período de 24 horas, que somadas as suas altas taxas de incidência de radiação solar e de fortes ventos sugerem um comportamento diurno de variação (SOUZA FILHO *et al.*, 2006).

Em alguns lagos tropicais, variações no nível da água de alguns metros podem ser resultado de grandes diferenças da precipitação líquida (total precipitado menos o total evaporado) entre as estações seca e úmida. Tais variações têm efeitos pronunciados tanto sobre a diluição, como sobre o fornecimento de nutrientes que, por sua vez, afetam a proliferação de algas, a reprodução do zooplâncton e a desova dos peixes (BARTRAM; BALLANCE, 1996). Durante a estação seca, as velocidades do vento são geralmente mais elevadas do que em outras épocas do ano e as taxas de evaporação estão no seu máximo. A perda de calor e a turbulência causada pela ação do vento promovem a mistura da coluna d'água.

A classificação dos lagos com base na variação sazonal da temperatura a diferentes profundidades, como a que ocorre em regiões temperadas do globo, não é aplicável aos lagos tropicais. Lagos tropicais que são suficientemente profundos para estratificar tendem a misturar previsivelmente em um dado momento do ano, e permanecer estratificado no restante (LEWIS, 1996). Neste sentido, as diferenças entre eles se dão mais em relação ao tempo da estação climática em que se encontra o processo de mistura, às vezes durando poucas semanas (ex. trópicos). Na maioria dos casos a estação de mistura coincide com o inverno nos hemisférios, que implica no maior gradiente latitudinal da mínima radiação solar, como causa principal da sazonalidade.

Lagos entre 1-3 metros de profundidade média tipicamente são polimíticos contínuos, com misturas diárias; e entre 3-10 metros são freqüentemente polimíticos descontínuos, misturando irregularmente e mais de uma vez por ano (Tabela 3-2). A estação climática onde encontramos a temperatura mínima é geralmente a estação onde ocorre a mistura completa, exceto em lagos rasos, que misturam freqüentemente ou mesmo diariamente (LEWIS, 1996; SOUZA FILHO *et al.*, 2006).

Tabela 3-2. Relação entre a profundidade média e o comportamento dos lagos tropicais.

Profundidade média (m)	Padrão de mistura
3-10	Polimíticos contínuos
3-10	Polimíticos descontínuos

Fonte: Adaptado de Lewis (1996).

Para uma classificação mais realista e de acordo com suas características, uma classificação que considera tamanho, profundidade e outras características físicas é mais relevante (BARTRAM; BALLANCE, 1996). Em lagos grandes e profundos, por exemplo, ocorre a formação de uma termoclina sazonal, profunda, e sobre uma massa de água anóxica. A recirculação de águas profundas pode ocorrer, mas o mecanismo responsável ainda não está claro. No caso dos lagos grandes e rasos, a tendência é a variação de temperatura diurna distinta. A temperatura é uniforme na parte da manhã, a estratificação se desenvolve no período da tarde e é destruída à noite (FORD; JOHNSON, 1986). A flutuação do nível da água pode ser considerada relativa ao volume do lago e a planície de inundação gerada por estas oscilações terá profundos efeitos sobre a produtividade biológica na água.

3.3.7 Estimativa sobre a Estabilidade da Estratificação

A estabilidade da estratificação em um reservatório pode ser estimada pelo número adimensional de *Froude densimétrico*, cuja equação foi modificada por Norton *et al.* (1968) *apud* Martin & McCutcheon (1998) resultando em

$$Fr_D = \sqrt{\frac{1}{(ge)} \frac{LQ}{D_m V}} \quad (12)$$

Onde g é a aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$); D_m é a profundidade média (m); V é o volume do reservatório (m^3); L é o comprimento do reservatório (m); ($e = 10^{-6}\ m^{-1}$) é um adimensional do gradiente de densidade e Q a vazão média de saída ($m^3\ s^{-1}$).

Quando $Fr_D \gg 1/\pi$ o reservatório está bem misturado; quando $Fr_D \ll 1/\pi$ é esperado um comportamento de forte estratificação e quando $Fr_D \approx 1/\pi$, o reservatório encontra-se fracamente ou intermitentemente estratificado. Ford e Johnson (1986) indicaram

que lagos tendem a estratificar quando sua profundidade média excede 10 metros, para um tempo de residência anual médio maior que 20 dias.

3.4 Processos naturais em reservatórios

3.4.1 Produtividade Biológica

A produção primária é toda a matéria orgânica produzida por algas, plantas e certas bactérias fotossintetizantes. Reservatórios que apresentam longos períodos de tempo de residência geralmente tendem a desenvolver problemas de qualidade de água com uma excessiva produtividade biológica. O tempo de residência mínimo ao desenvolvimento e crescimento algal é de, pelo menos, várias semanas (NOVOTNY, 2003 *apud* CHIN, 2006). Para estimar a produtividade biológica potencial em lagos, dois parâmetros são bastante utilizados: o carregamento hidráulico e o fator de forma. O carregamento hidráulico, Q_s (m/ano), é dado por:

$$Q_s = \frac{Q}{A} \quad (13)$$

Onde Q é a afluência anual ao reservatório, em m^3 /ano; e A é a área superficial do lago, em m^2 (CHIN, 2006).

A produtividade biológica potencial de um reservatório é inversamente proporcional ao carregamento hidráulico. Já o fator de forma (α) de um reservatório é definido como a razão entre o comprimento e a largura média do represamento. Quanto mais próximo de um, maior a tendência do lago em ter uma excessiva produtividade biológica.

3.4.2 Variabilidade e mudanças climáticas

Alterações climáticas (aumento das temperaturas e mudanças nos padrões hidrológicos, tais como secas e inundações) afetam a qualidade da água provocando desertificações, enchentes, derretimento de geleiras, ondas de calor, ciclones, doenças transmitidas pela água, como o cólera, dentre outros. Sobretudo, importantes lacunas ao pleno conhecimento dos impactos das mudanças climáticas sobre a água, especialmente na

qualidade, ainda precisam ser desvendadas. Há uma necessidade de melhorar a compreensão e a modelagem das mudanças climáticas. As informações sobre os impactos relacionados com as alterações climáticas ainda são insuficientes para definir a influência na qualidade da água e nos ecossistemas aquáticos.

Modelos climáticos globais (MCG) fornecem uma boa base física, quantificando os efeitos de mudanças no clima. Eles são bons para reproduzir características de circulação atmosférica, mas não podem resolver os processos de pequena escala que influenciam a dinâmica dos lagos (George *et al.*, 2007). Para isso, técnicas de downscaling dinâmico têm sido utilizadas, onde modelos climáticos regionais (MCR) são utilizados, combinados a medições de longo prazo, tendo por objetivo avaliar o impacto da mudança climática em suas características físicas.

3.4.3 Evolução dos ecossistemas

O processo de evolução ou envelhecimento de um reservatório depende, principalmente, das características da fase de enchimento deste ecossistema formado e das inter-relações que se estabelecem, ao longo do tempo, entre o reservatório e sua bacia hidrográfica (TUNDISI, 2008). A evolução do ecossistema aquático vem sempre acompanhada por um aumento da complexidade, gerando um equilíbrio que garante proteção contra impactos de variáveis externas. O aumento das concentrações dos nutrientes rompe este equilíbrio, provocando uma produção primária exagerada (DATSENKO, 2000 *apud* FUNCEME, 2002).

O enriquecimento por nutrientes é hoje um dos principais problemas dos ecossistemas de água doce. As mudanças climáticas associados ao crescente fenômeno da eutrofização dos lagos e a erosão dos solos podem levar a consequências adversas ao bom funcionamento do ecossistema e seus serviços ambientais, levando a proliferação de algas tóxicas, depleção de oxigênio, declínio da biodiversidade e/ou mortandade de peixes em massa. Kirilova *et al.* (2009) estudaram a relação entre as alterações no nível trófico provocada pela indução climática no SacrowerSee, um lago central europeu localizado a nordeste da Alemanha. Para tal estudo, analisaram a evolução do lago nos últimos 13.000 anos, reconstruindo as concentrações do fósforo total do epilímnio usando uma função de transferência diatomácea – fósforo total. Técnicas de Paleolimnologia utilizaram fósseis de Chironomidae (Diptera) na reconstrução trófica que ajudou na avaliação da disponibilidade de oxigênio no hipolímnio.

Para o caso dos reservatórios do semiárido brasileiro, construídos recentemente, tais estudos não se aplicam, mas chama a atenção para a importância de se analisar o que ocorreu no passado, mesmo que recente. Estudos de caso deste tipo mostram a estabilidade que os ecossistemas aquáticos apresentavam na ausência da atividade humana, mesmo em condições climáticas semelhantes às de hoje.

3.4.4 Eutrofização Natural e Cultural

O fenômeno conhecido por eutrofização tem várias interpretações entre os estudiosos da área limnológica, que desenvolveram diversas definições relacionadas à produtividade crescente dos ecossistemas aquáticos. Geralmente, este termo é utilizado para sinalizar que alguma mudança está ocorrendo com o meio ambiente. Entre tantas definições, é consenso entre os limnologistas que o termo eutrofização seja sinônimo de um aumento nas taxas de crescimento dos biota dos lagos, e de que esta taxa de aumento da produtividade é acelerada em relação à que existiria se o sistema não tivesse sido perturbado (WETZEL, 1983).

A esse aumento de produtividade, evidenciado pelo intenso crescimento das algas principalmente, percebe-se uma série de parâmetros que a afeta. Por algas entende-se uma designação mais abrangente que inclui tanto as plantas de movimentação livre (fitoplâncton e as plantas flutuantes), como as algas bênticas aderidas (plantas fixas enraizadas e microscópicas aderidas) (VON SPERLING, 1996). A intensidade de luz, a temperatura da água, o nitrogênio e o fósforo, além de outros nutrientes traços que são difíceis de controlar nos corpos d'água naturais podem de certa maneira limitar o crescimento e desenvolvimento de uma elevada produtividade primária.

A eutrofização dos corpos d'água é um fenômeno natural mais que atualmente vem sendo acelerado por processos artificiais antrópicos (eutrofização cultural ou antrópica) (Figura 3-8). O fenômeno natural tem ordem de grandeza de algumas centenas de anos, contra décadas ou até mesmo anos ao desenvolvimento do fenômeno cultural (JI, 2007).

Com base na produtividade biológica e nas condições que o ambiente oferece em termos de nutrientes, um reservatório pode ser classificado em níveis tróficos, que, em síntese, são descritos a seguir:

1. Oligotrófico: Possui baixa produtividade biológica, concentração algal e concentração de nutrientes, além de apresentar em águas claras e de boa qualidade;

2. Mesotrófico: Apresentam características intermediárias entre lagos oligotróficos e eutróficos, com uma atividade biológica mediana e águas mantendo a boa qualidade;
3. Eutrófico: São lagos que apresentam uma intensa produtividade, ricos em nutrientes (principalmente fósforo e nitrogênio) e apresentam problemas de anóxia;
4. Hipereutrófico: São lagos extremamente eutrofizados. Geralmente é resultado de poluição por matéria orgânica (antropogênica) e afluições não tratadas de esgotos domésticos e industriais.

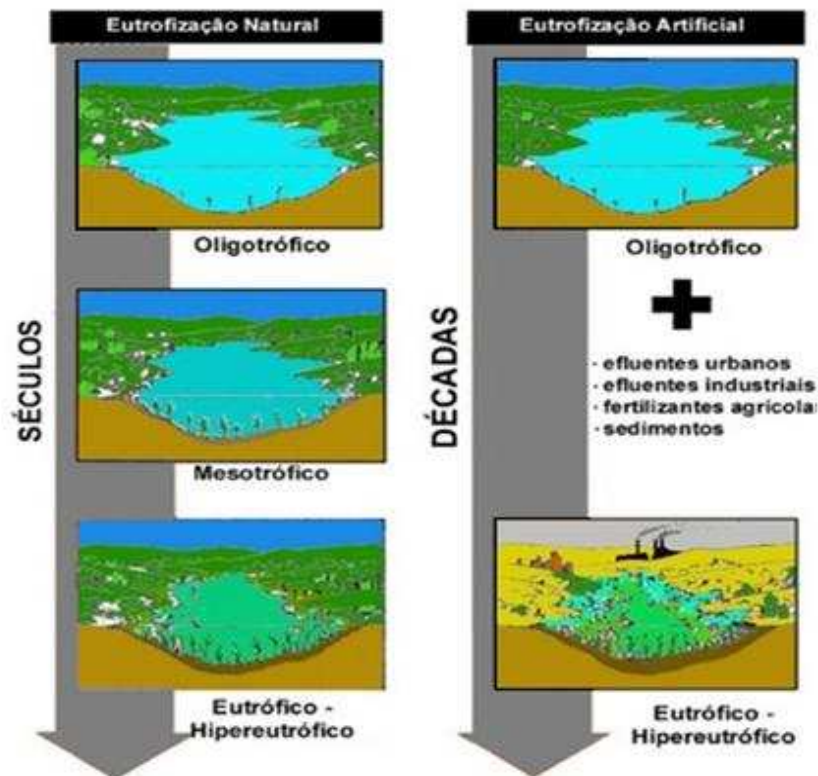


Figura 3-8. Comparação entre os processos de eutrofização natural e cultural. Laboratório de Limnologia e Planejamento Ambiental. Disponível em: <<http://www.dern.ufes.br/limnol/main.html>>. Acesso em 27 Ago. 2010.

3.4.4.1 Problemas acarretados pela eutrofização

O fenômeno da eutrofização lacustre determina o estágio em que sistema perde a proteção natural e a qualidade da água começa a diminuir bruscamente. O equilíbrio entre a produção primária e a decomposição da matéria orgânica altera-se em detrimento da produção primária excessiva. O aumento de matéria orgânica, como efeito direto das condições favoráveis de fotossíntese, gera, em consequência, o aumento dos detritos orgânicos que serão

decompostos, na região bentônica, por processos anaeróbios (DATSENKO, 2000). Esse processo de decomposição traz consigo o surgimento de gases, tais como o metano e o sulfídrico. Altera-se também a cadeia trófica do ecossistema – em vez de algas e zooplâncton herbívoros, começam a dominar detritos e bactérias (ESTEVES, 1988; DATSENKO, 2000).

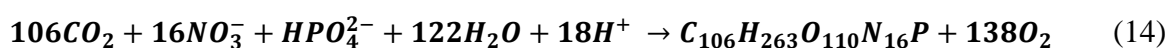
3.4.4.2 Nutrientes limitantes

Quando algum nutriente que está normalmente disponível às algas se torna mais escasso no ambiente, ele passa a desempenhar um papel limitante da produtividade primária, ou seja, um nutriente limitante. Este conceito de nutriente limitante é base aos estudos de controle da eutrofização. A idéia central é que, controlando a entrada de certos nutrientes limitantes, através da identificação e redução de sua entrada nos ambientes, o crescimento e reprodução das algas possam ser controlados (JI, 2007).

De acordo com a lei do mínimo de Liebig, o crescimento de um organismo limita-se ao elemento essencial que se encontra em uma concentração inferior ao requerido por este organismo. Esta lei foi proposta no final do século XIX, quando o então pesquisador Justus von Liebig, estudando o crescimento de plantas, notou a relação entre o crescimento dos organismos e os recursos escassos no ambiente (BERRYMAN, 2003; JI, 2007).

Variações nas condições geográficas e climáticas impedem a formatação de critérios numéricos universalmente aplicáveis à quantificação do estado trófico de lagos e reservatórios. Von Liebig não formulou sua lei matematicamente, mas partindo de sua idéia, diversas equações empíricas puderam ser desenvolvidas (KREUS, 1995).

Por exemplo, as algas consomem nutrientes em uma razão estequiométrica relativamente fixa (JI, 2007). A matéria orgânica que compõe algas e macrófitas aquáticas contém fósforo, nitrogênio e carbono em proporções mais ou menos constantes. A razão entre a concentração de nitrogênio e fósforo (N/P) nos ambientes aquáticos é utilizada como indicador do nutriente limitante ao crescimento algal. Para ajudar a ilustrar esta relação entre as quantidades de fósforo, nitrogênio e carbono necessárias às algas, Stumm & Morgan (1981) *apud* Ji (2007) apresentaram a seguinte equação química que representa o processo fotossintético (Equação 14):



Portanto, a razão em termos de massa entre N/P é

$$\frac{N}{P} = \frac{16 \times 14}{1 \times 31} = 7,2 \quad (15)$$

E para o carbono

$$\frac{C}{P} = \frac{106 \times 12}{1 \times 31} = 41 \quad (16)$$

Assim, a razão em massa desses elementos que as algas necessitam é de aproximadamente 1P: 7N: 40C (WETZEL, 1983; JØRGENSEN; VOLLENWEIDER, 2000; JI, 2007).

3.4.4.3 Abordagem do processo da eutrofização para regiões tropicais

A quantificação do nível trófico é mais difícil especialmente nos lagos tropicais. Von Sperling (1996) apresentou dados comparativos e cita que os corpos d'água tropicais apresentam uma maior capacidade de assimilação de fósforo que corpos d'água das regiões de climas temperados. A Tabela 3-3 relata em síntese sua pesquisa.

Salas e Martino (1991) estudando os lagos tropicais Latino-americanos notaram que a grande maioria são limitados pelo fósforo. O fósforo é o mais utilizado em modelagens tróficas por estar geralmente em menor quantidade no ambiente, mas, com o avanço da poluição hídrica e o aumento de sua disponibilidade nos ecossistemas, o nitrogênio pode ser o nutriente limitante em algumas regiões (JI, 2007). Outro aspecto é que, mesmo que se controle o aporte externo de nitrogênio, há algas com capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico, que não teriam a sua concentração reduzida com a diminuição da carga afluente de nitrogênio (VON SPERLING, 1996).

Para que se possa caracterizar um reservatório quanto ao grau de trofia, diversas equações empíricas que relacionam o fósforo são utilizadas. Dentre estes modelos, o mais utilizado mundialmente é o modelo de Vollenweider (1976), que foi inicialmente desenvolvido para ser aplicado em lagos temperados (VON SPERLING, 1996).

Tabela 3-3. Faixas aproximadas de valores de fósforo total para os principais níveis tróficos.

Classe de trofia	Concentração de fósforo total na represa (mg m ⁻³)
Oligotrófico	< 10 – 20
Mesotrófico	10 – 50
Eutrófico	25 – 100
Hipereutrófico	> 100

Fonte: von Sperling (1996).

A grande diferença entre os lagos temperados e os tropicais, tendo em vista apenas as variáveis utilizadas no modelo, é o coeficiente de perda de fósforo por sedimentação (K_s) (1/ano). Salas e Martino (1991) analisando dados experimentais de lagos e reservatórios na América Latina e no Caribe obtiveram, por análise de regressão, a seguinte relação para K_s

$$K_s = \frac{2}{\sqrt{t}} \quad (17)$$

Adaptando este valor de K_s na equação original de Vollenweider, a concentração de fósforo no reservatório será

$$P = \frac{L \cdot 10^3}{V \left(\frac{1}{t} + \frac{2}{\sqrt{t}} \right)} \quad (18)$$

Onde P é a concentração de fósforo no corpo d'água (gP/m³); L é a carga afluente de fósforo em (kgP/ano); V é o volume da represa (m³) e t é o tempo de detenção hidráulica (ano).

3.4.4.3.1 Índice de Estado Trófico (IET)

Robert E. Carlson (1977) apresentou uma metodologia simples para classificar os lagos quanto ao seu estado trófico. A determinação do estado trófico sempre levou em consideração a examinação de diversos critérios, como a forma da curva do oxigênio dissolvido, composição de espécies da fauna do fundo ou o fitoplâncton, concentração de nutrientes, e várias medidas de biomassa ou produção. A grande quantidade de critérios para

se enquadrar um lago sempre tornou confusa sua classificação; alguns lagos podem ser classificados como oligotróficos por um critério, e eutróficos por outro.

Um parâmetro indispensável e considerado como elemento chave para a construção de um modelo simples foi a biomassa algal. Ela pode ser estimada de várias formas, e entre elas, a transparência de Secchi. A relação entre a biomassa algal e a transparência dada pelo disco de Secchi é expressa pela equação de extinção da luz na água (CARLSON, 1977)

$$I_z = I_0 e^{-(K_w + K_b)z} \quad (19)$$

Onde I_z é a intensidade luminosa no ponto onde o disco de Secchi desaparece; I_0 é a intensidade de luz incidente na superfície do lago; K_w é o coeficiente de atenuação da luz pela água e pelas substâncias dissolvidas; K_b é o coeficiente de atenuação da luz pela matéria particulada e z a profundidade em que o disco de Secchi desaparece.

O termo K_b pode ser reescrito como αC , onde α tem dimensão $m^2 mg^{-1}$ e C é a concentração da matéria particulada, em $(mg m^{-3})$. Reescrevendo a equação e rearranjando os termos na forma linear,

$$\left(\frac{1}{z}\right) \left(\ln \frac{I_0}{I_z}\right) = k_w + \alpha C \quad (20)$$

Os índices de estado trófico (TSI – Trophic State Index) para o disco de Secchi (SD) e para o fósforo total (PT) e a clorofila *a* (Chl*a*), através de correlação entre as concentrações de fósforo total e clorofila *a* disponíveis com o disco de Secchi são:

$$IET(SD) = 10 \left(6 - \frac{\ln SD}{\ln 2} \right) \quad (21)$$

$$IET(Chl) = 10 \left(6 - \frac{2,04 - 0,68 \ln Chl}{\ln 2} \right) \quad (22)$$

$$IET(PT) = 10 \left(6 - \frac{\ln \frac{48}{PT}}{\ln 2} \right) \quad (23)$$

Por considerar o ecossistema aquático um ambiente extremamente complexo, Carlson relacionou as concentrações de fósforo total, clorofila *a* e transparência de Secchi em um índice, porém não fixou limites para sua representação em termos tróficos. Os valores do índice (Tabela 3-4) podem então ser comparados com os limites definidos por Kratzer & Brezonick (1981) *apud* Mercante & Tucci-Moura (1999) para a classificação do estado trófico.

O índice criado por Carlson (aplicado para lagos de regiões temperadas) é um dos modelos mais aplicados no Brasil para se estimar o estado trófico dos nossos sistemas aquáticos (MERCANTE; TUCCI-MOURA, 1999).

Tabela 3-4. Limites para o estado trófico definidos por Kratzer & Brezonick (1981) *apud* Mercante & Tucci-Moura (1999).

Ultra-Oligotrófico	< 20
Oligotrófico	21 – 40
Mesotrófico	41 – 50
Eutrófico	51 – 60
Hipereutrófico	>61

Fonte: Adaptado de Mercante & Tucci-Moura (1999).

Toledo *et al.* (1983) *apud* Mercante & Tucci-Moura (1999) propuseram uma modificação na equação original de Carlson, além da inclusão de uma expressão para o fósforo solúvel reativo:

$$IET(SD) = 10 \left(6 - \frac{0,64 + \ln SD}{\ln 2} \right) \quad (24)$$

$$IET(Chl) = 10 \left(6 - \frac{2,04 - 0,695 \ln Chl}{\ln 2} \right) \quad (25)$$

$$IET(PT) = 10 \left(6 - \frac{\ln \frac{80,32}{PT}}{\ln 2} \right) \quad (26)$$

$$IET(PSR) = 10 \left(6 - \frac{\ln \frac{21,67}{PSR}}{\ln 2} \right) \quad (27)$$

O IET de Carlson pode ser considerado como restritivo e conservador (CETESB, 2002). A versão modificada deste índice tem se mostrado mais adequada para a determinação do estado trófico em lagos de clima tropical (TUNDISI *et al.*, 1985; CALIJURI, 1988; CEBALLOS, 1995 *apud* CETESB, 2002).

Tabela 3-5. Limites para os diferentes níveis de estado trófico segundo o sistema de classificação proposto por Toledo (1990) *apud* Lamparelli (2004).

Critério	Estado Trófico	Secchi (m)	PT (mg L⁻¹)	Chla (µg L⁻¹)
IET ≤ 24	Ultraoligotrófico	≥ 7,8	≤ 0,006	≤ 0,51
24 < IET ≤ 44	Oligotrófico	7,7 – 2,0	0,007 – 0,026	0,52 – 3,81
44 < IET ≤ 54	Mesotrófico	1,9 – 1,0	0,027 – 0,052	3,82 – 10,34
54 < IET ≤ 74	Eutrófico	0,9 – 0,3	0,053 – 0,211	10,35 - 76,06
IET > 74	Hipereutrófico	< 0,3	>0,211	> 76,06

Fonte: Lamparelli (2004).

A CETESB tem utilizado uma modificação do índice de Carlson mais atual, fruto da pesquisa de Lamparelli (2004). Das três variáveis citadas para o cálculo do Índice do Estado Trófico, apenas duas são utilizadas, deixando de fora os valores de transparência da água que muitas vezes não representam corretamente o estado trófico dos ambientes no Estado de São Paulo.

Neste novo índice, o fósforo (IET-PT) é tido como o causador potencial da eutrofização, e a clorofila *a* (IET-Chl) é considerada como uma medida da resposta do corpo d'água à carga de fósforo. Para a aplicação em reservatórios, a equação de Carlson modificada por Lamparelli (2004) fica

$$IET(Chl) = 10 \left[6 - \left(0,92 - \frac{0,34 \ln Chl}{\ln 2} \right) \right] \quad (28)$$

$$IET(PT) = 10 \left[6 - \left(1,77 - \frac{0,42 \ln PT}{\ln 2} \right) \right] \quad (29)$$

$$IET = \frac{[IET(PT) + IET(Chl)]}{2} \quad (30)$$

Quando os dois índices (em relação ao fósforo e a clorofila) puderem ser determinados, o resultado final do IET será a média aritmética simples entre os dois.

Tabela 3-6. Classificação do Estado Trófico de reservatórios segundo índice de Carlson modificado por Lamparelli (2004).

Critério	Estado Trófico	Secchi - S - (m)	PT (mg L⁻¹)	Chla (µg L⁻¹)
IET ≤ 47	Ultraoligotrófico	≥ 2,4	PT ≤ 8	Chl ≤ 1,17
47 < IET ≤ 52	Oligotrófico	2,4 > S ≥ 1,7	8 < PT ≤ 19	1,17 < Chl ≤ 3,24
52 < IET ≤ 59	Mesotrófico	1,7 > S ≥ 1,1	19 < PT ≤ 52	3,24 < Chl ≤ 11,03
59 < IET ≤ 63	Eutrófico	1,1 > S ≥ 0,8	52 < PT ≤ 120	11,03 < Chl ≤ 30,55
63 < IET ≤ 67	Supereutrófico	0,8 > S ≥ 0,6	120 < PT ≤ 233	30,55 < Chl ≤ 69,05
IET > 67	Hipereutrófico	0,6 > S	233 < PT	69,05 < Chl

Fonte: Adaptado de Lamparelli (2004).

3.5 Monitoramento e gestão dos recursos hídricos

A correta gestão dos recursos hídricos parte de um ponto fundamental centrado em políticas públicas sérias e de uma criteriosa elaboração. A manutenção e preservação de todos os serviços ambientais e sócio-econômicos dos quais reservatórios são responsáveis depende de uma gestão com uma abordagem ecossistêmica. Tal gestão é algo óbvio do ponto de vista físico, visto que o fluxo de água consumida ou redistribuída periodicamente pela irrigação ou pela energia hidrelétrica, por exemplo, afeta a capacidade de depuração de rios e reservatórios e, conseqüentemente, o efeito dos despejos de efluentes industriais ou urbanos na qualidade da água (MARGULIS *et al.*, 2002). A autodepuração dos corpos d'água é um fenômeno que promove o restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, após as alterações

induzidas pelos despejos afluentes (VON SPERLING, 1996). Esse restabelecimento das condições reflete a capacidade do corpo hídrico em superar o impacto da entrada dos efluentes não tratados no sistema.

3.5.1 Legislação vigente

A Agência Nacional das Águas (ANA) é o órgão responsável por implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos, cabendo-lhe, entre outras atribuições, promover a elaboração de estudos para subsidiar a aplicação de recursos financeiros da União em obras e serviços de regularização de cursos d'água, de alocação e distribuição de água e controle da poluição hídrica, em consonância com o estabelecido nos Planos de Recursos Hídricos (ANA, 2005). É atribuição da Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos da ANA elaborar e manter atualizado o diagnóstico de oferta e demanda, em quantidade e qualidade, dos recursos hídricos do País.

O capítulo II da política nacional dos recursos hídricos destaca os objetivos principais da qualidade da água, que é “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos”. Já no capítulo III, encontramos as diretrizes gerais para a implementação da política, como, por exemplo, “a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade”. O grande problema é que historicamente a gestão da qualidade das águas não teve o mesmo destaque que a gestão de suas quantidades, com informações insuficientes ou até mesmo inexistentes (ANA, 2005).

Uma importante ferramenta de gestão dos recursos hídricos é a correta alocação de água. A outorga de direito de uso de recursos hídricos é um dos seis instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelecidos no inciso III, do art. 5º da Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que estabelece também os Planos de Recursos Hídricos, o enquadramento dos corpos de água em classes, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos, a compensação a municípios e o Sistema de Informações sobre os Recursos Hídricos. Este instrumento tem como objetivo assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água, baseando-se no princípio da permissão de uma descarga de poluente tal que, após sua diluição na vazão mínima fixada como referência, a qualidade da água no corpo receptor permaneça satisfatória, conforme seus objetivos de qualidade estabelecidos pela classe de uso.

De acordo com o inciso IV, do art. 4º da Lei Federal nº 9.984, de 17 de junho de 2000, compete à Agência Nacional de Águas, ANA, outorgar, por intermédio de autorização, o direito de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio da União, bem como emitir outorga preventiva. O instrumento de outorga é necessário para o gerenciamento dos recursos hídricos, pois permite ao administrador realizar o controle quali-quantitativo da água, e ao usuário a necessária autorização para implementação de seus empreendimentos produtivos e o uso racional e sustentável da água. É, também, um instrumento importante para minimizar os conflitos entre os diversos setores usuários e evitar impactos ambientais negativos aos corpos hídricos. Campos & Studart (2003) comentam que duas questões são relevantes: o máximo outorgável (volume ou vazão, ou ambos) e como alocar a água em épocas de escassez. Essas são decisões regionais, dependentes do regime dos rios e de seus controles e, por isso, o estabelecimento de normas nacionais para regulamentar a outorga deve ser vista com muita cautela.

Por qualidade da água entende-se o conjunto de todas as características físicas, químicas e biológicas que ela apresenta. A qualidade varia de acordo com a sua utilização, onde padrões de classificação pretendem classificar a água de acordo com a sua potabilidade, a segurança que apresenta para o ser humano e para o bem estar dos ecossistemas. A resolução CONAMA 357/2005 dispõe sobre a qualidade apresentando-a por um segmento de corpo d'água, num determinado momento, em termos dos usos possíveis com segurança adequada, frente às Classes de Qualidade. Por classes de qualidade define-se o conjunto de condições e padrões de qualidade de água necessários ao atendimento dos usos preponderantes, atuais ou futuros.

A mesma lei impõe enquadramentos específicos para cada classe de qualidade de acordo com o estabelecimento de metas ou objetivos a serem obrigatoriamente alcançados ou mantidos em um segmento de corpo de água, de acordo com os usos preponderantes pretendidos, ao longo do tempo. Para as águas doces, respectivamente a grande maioria dos reservatórios da região semiárida nordestina, o Art. 4º desta resolução classifica em:

I - classe especial: águas destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção;
- b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e,
- c) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral,

II - classe 1: águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000;
- d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e
- e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas,

III - classe 2: águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000;
- d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e
- e) à aqüicultura e à atividade de pesca,

IV - classe 3: águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado;
- b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;
- c) à pesca amadora;
- d) à recreação de contato secundário; e
- e) à dessedentação de animais,

V - classe 4: águas que podem ser destinadas:

- a) à navegação; e
- b) à harmonia paisagística.

Dentre as várias metodologias empregadas nos sistemas de monitoramento da qualidade da água, deve-se antes de tudo levar em consideração quais classes serão respeitadas ou atendidas. Neste trabalho foi priorizado o projeto de um sistema de monitoramento que atenda a qualidade dos recursos hídricos no ambiente, visando o bem

estar das comunidades que integram o ecossistema e a sustentabilidade. A sustentabilidade existe nas esferas sociocultural, econômica e ambiental, mas, o capital natural e ecossistêmico é um bem difuso e coletivo disponível às funções vitais dos seres humanos e das outras espécies biológicas existentes no planeta. Por esta razão considera-se que o capital a ser enfocado e melhor valorado seja o capital natural e ecossistêmico e que os capitais socioculturais e econômicos sejam direcionados com vistas ao melhor alcance dos objetivos e metas que mantenham e/ou aumentem aquele capital (VALENTI, 2002).

A primeira política baseada em abordagens ecossistêmicas foi criada em 1992 (Eco-92), na Convenção sobre Diversidade Biológica, adotada na Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento e promulgada no Brasil pelo decreto Nº 2.519 de 16 de março de 1998. A Convenção definiu a abordagem ecossistêmica como uma estratégia de integração entre a gestão da terra, da água e dos recursos que promovem a conservação e a sustentabilidade nos usos em um meio equilibrado (HAMBREY *et al.*, 2008).

4 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

4.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica do Curu

A bacia do Rio Curu localiza-se na região norte do estado do Ceará e compreendem os municípios de Apuiarés, Canindé, Caridade, Irauçuba, General Sampaio, Itapajé, Paracuru, Paraipaba, Paramoti, Pentecoste, São Gonçalo do Amarante, São Luís do Curu, Tejuçuoca e Umirim, o que representa uma área de aproximadamente 6% do território cearense.

A vegetação é formada principalmente por vestígios de vegetação antiga e da flora inicial da região, além da evolução do ambiente físico global, cujas modificações geológicas, geomorfológicas, pedológicas e climáticas tiveram importância fundamental no estabelecimento e na distribuição da vida vegetal e florística, principalmente nas últimas épocas geológicas com o estabelecimento da caatinga. Seis unidades fito-ecológicas são encontradas, e estão divididas em: complexo vegetacional da Zona Litorânea, que inclui florestas subperinifólias e ciliares de carnaúbas, de caatinga arbustiva densa. É própria de solos planos e profundos; Floresta Subperenifólia Tropical Pluvio-Nebular (Matas Úmidas, Serranas); Floresta Subcaducifólia Tropical Pluvial (Mata Seca); Caatinga Arbustiva Densa - própria de solos ricos e rasos; Caatinga Arbustiva Aberta - própria de solos pobres e rasos e Floresta Mista Dicótilo-Palmácea (Mata Ciliar com Carnaúba e Dicotiledôneas).

A bacia hidrográfica do açude Pentecoste possui uma área drenada de 2.840 km², abrangendo parte dos municípios de Pentecoste, Apuiarés, Canindé, Caridade e Paramoti (IBGE, 2000). O referido açude se compõe de um maciço de terra compactado, homogêneo, provido de um filtro vertical de alvenaria de pedra arrumada, com uma transição de areia nos paramentos de montante e jusante (ARAÚJO, 1990). A bacia hidrográfica do açude Pentecoste está inserida na microrregião do Médio Curu. A bacia (Figura 4-1) apresenta características predominantes do semi-árido nordestino, com cobertura vegetal do tipo caatinga arbustiva densa e os solos classificados como bruno não cálcico e litólicos (IPECE, 2009). Com relação ao uso e ocupação do solo, ao longo da bacia hidrográfica existe a prática predominante da cultura do caju e nas áreas próximas à bacia hidráulica são cultivadas, para subsistência, feijão e milho (COGERH, 2010).

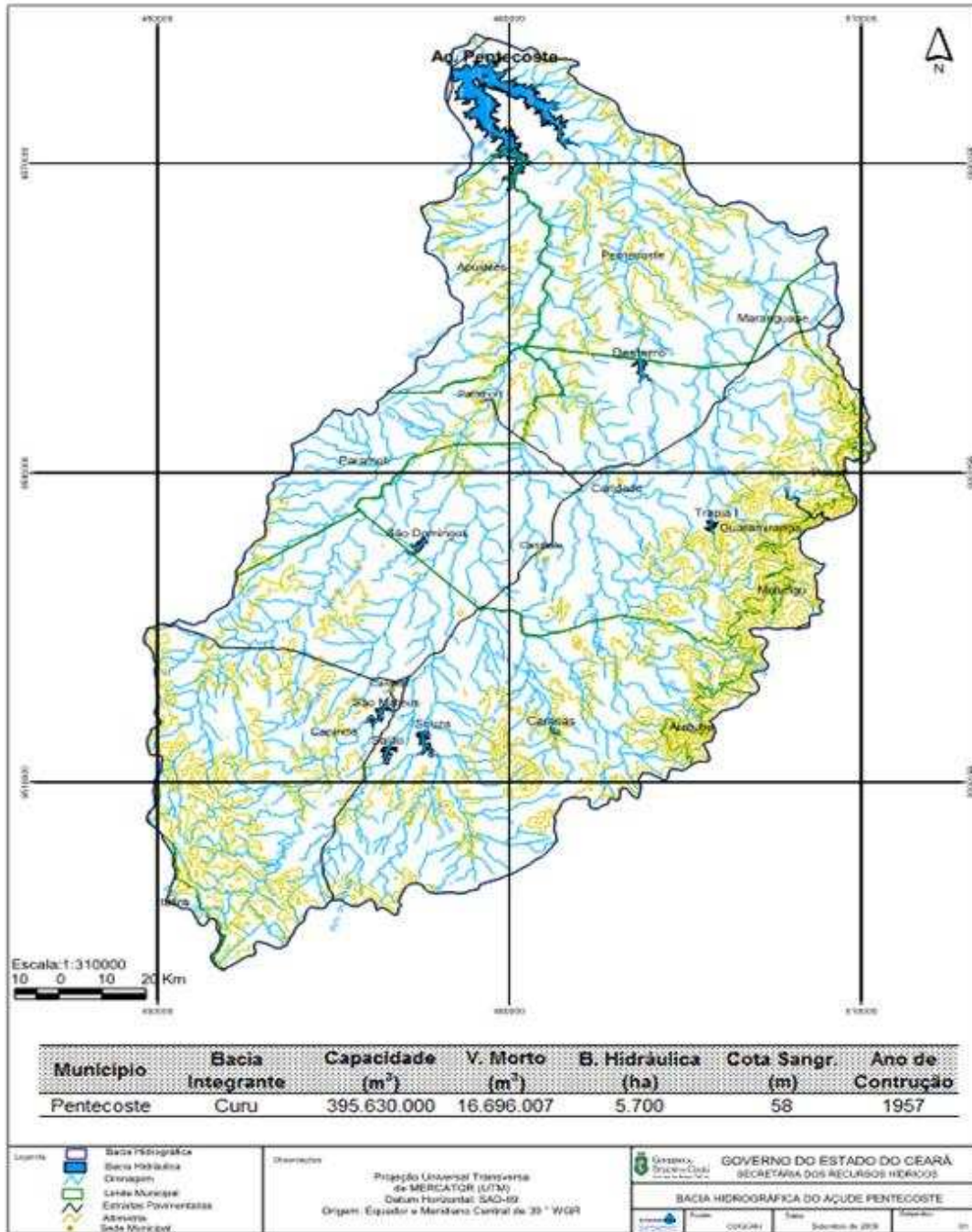


Figura 4-1. Bacia Hidrográfica do Açude Pereira de Miranda.

4.2 Açude Pereira de Miranda

O açude Pereira de Miranda, conhecido como açude Pentecoste, localiza-se a 85 km de Fortaleza. Foi construído pelo Departamento de Obras Contra as Secas – DNOCS entre os anos de 1950 e 1957, barrando o rio Canindé na sua foz junto ao rio Curu. Os objetivos da sua construção foram o abastecimento de água, a irrigação, a geração de energia elétrica, a piscicultura e o controle das cheias do rio Curu (COGERH, 2010).

Possui uma área inundável de 54,86 km² e capacidade para armazenar 395.638.000 metros cúbicos e sua barragem, localizada nas coordenadas geográficas 470.797 E e 9.580.258 N, se compõe de um maciço de terra compactado, homogêneo, provido de um filtro vertical de alvenaria de pedra arrumada, com uma transição de areia nos paramentos de montante e jusante (ARAÚJO, 1990 *apud* COGERH, 2010). O DNOCS mantém uma estação de piscicultura, o Centro de Pesquisas em Aqüicultura “Rodolpho Von Ihering”, localizado à jusante do açude.

Apresenta médios índices pluviométricos, cerca de 817,7 mm.ano⁻¹, concentrados de janeiro a abril, com temperatura variando de 26 a 28 °C. A classificação climática o enquadra como tropical quente semi-árido. A região possui alto poder de evaporação, que provoca um regime de escoamento superficial de alta variabilidade, com cursos d’água intermitentes, apresentando vazões nulas por longos períodos.

4.2.1 Batimetria do reservatório Pereira de Miranda

A batimetria do reservatório Pereira de Miranda foi fornecida pela COGERH e utilizada na simulação dos balanços de massa e térmico do lago. Consiste no levantamento de dados das curvas de nível (Figura 4-2) com o objetivo de obter o gráfico da Cota x Área x Volume de um determinado reservatório. No caso do açude em estudo, foi feita a delimitação da sua bacia hidráulica com auxílio de um GPS e foram coletados diversos pontos dentro do reservatório.

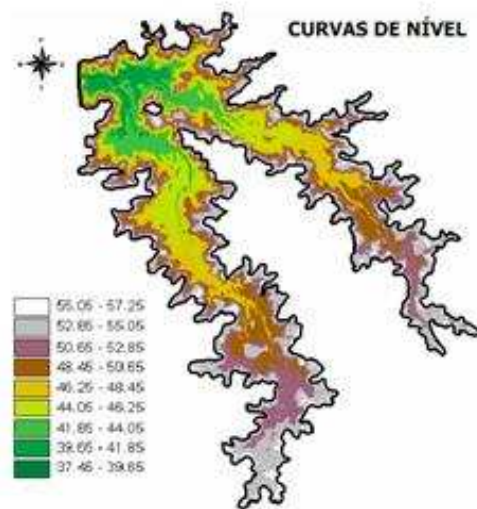


Figura 4-2. Curvas de nível do açude Pereira de Miranda.

Para cada um destes pontos, a profundidade e suas coordenadas geográficas foram obtidas, com a utilização de um ecobatímetro. Em posse da malha de pontos capturados (Figura 4-3), realiza-se o processamento dos dados, que irá gerar as curvas de nível existentes dentro do reservatório. Os volumes e as áreas em cada cota podem ser então encontrados (Tabela 4-1) com base no gráfico da Cota x Área x Volume (Figura 4-4). No dia da batimetria, a cota do nível da água foi de 57,25 m. A cota do Sangradouro do açude é de 58,00 m, a área da sua bacia hidráulica 50,40 km², o perímetro da bacia hidráulica 126,91 km e sua profundidade máxima é de 19,80 m.



Figura 4-3. Pontos coletados para a confecção da batimetria do açude Pereira de Miranda.

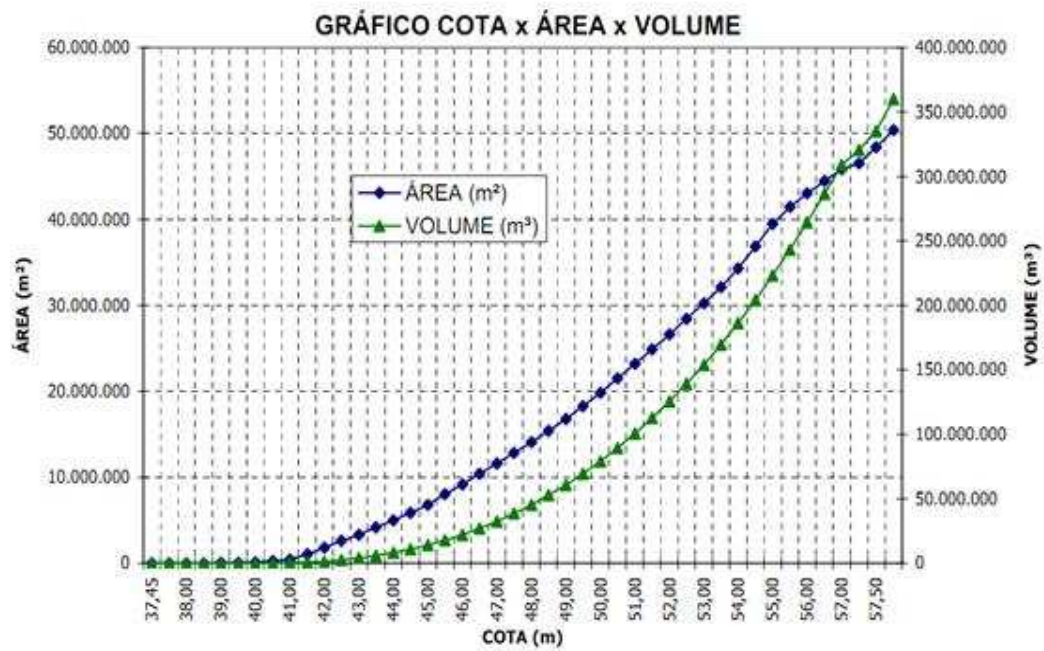


Figura 4-4. Gráfico cota x área x volume do açude Pereira de Miranda.

COTA (m)	ÁREA (m ²)	VOLUME (m ³)	COTA (m)	ÁREA (m ²)	VOLUME (m ³)
37,45	0	0	48,00	14.116.034	45.347.634
37,50	19	0	48,50	15.399.982	52.736.479
38,00	5.034	908	49,00	16.762.845	60.781.641
38,50	13.556	5.279	49,50	18.299.517	69.543.500
39,00	34.545	16.985	50,00	19.856.618	79.098.609
39,50	66.565	41.226	50,50	21.500.217	89.429.761
40,00	135.409	90.153	51,00	23.196.783	100.606.028
40,50	240.801	181.822	51,50	24.887.580	112.634.907
41,00	465.729	349.436	52,00	26.653.199	125.523.650
41,50	1.057.091	712.556	52,50	28.423.895	139.295.226
42,00	1.824.229	1.425.787	53,00	30.263.898	153.989.439
42,50	2.592.104	2.533.815	53,50	32.132.035	169.573.718
43,00	3.329.948	4.006.588	54,00	34.319.417	186.194.771
43,50	4.171.480	5.880.799	54,50	36.847.897	203.983.927
44,00	4.961.999	8.162.758	55,00	39.487.488	223.098.936
44,50	5.849.993	10.864.775	55,50	41.506.690	243.386.356
45,00	6.826.331	14.023.801	56,00	43.021.634	264.540.650
45,50	8.031.949	17.751.928	56,50	44.443.192	286.415.157
46,00	9.168.408	22.042.157	57,00	45.823.175	308.983.346
46,50	10.427.377	26.949.079	57,25	46.498.795	320.523.791
47,00	11.613.204	32.464.573	57,50	48.400.000	335.000.000
47,50	12.872.921	38.599.011	58,00	50.400.000	360.000.000

Tabela 4-1. Tabela gerada através do gráfico Cota x Área x Volume do açude Pereira de Miranda.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Escolha do ecossistema a ser monitorado

O reservatório escolhido foi o Pereira de Miranda (Pentecoste – CE), caracterizado pela forte influência na população local. A COGERH em busca de melhorias em seu sistema de monitoramento da qualidade da água, sempre procurou investir esforços na geração do conhecimento, ora patrocinando, ora apoiando institutos de pesquisa e/ou Universidades. Este esforço tornou o trabalho possível, dado toda a infra-estrutura que foi disponibilizada. O açude Pereira de Miranda representa bem a região semi-árida nordestina, servindo aos mais diversos usos à população que teve um incremento enorme na sua qualidade de vida após sua construção pelo DNOCS.

Outra característica importante foi a presença de estações de monitoramento fixas da FUNCEME, que forneceram uma base de dados climatológicos consistentes ao monitoramento climatológico desenvolvido no trabalho.

5.2 Seleção dos pontos de amostragem

Um único ponto de amostragem foi estabelecido, correspondendo a uma posição central, que não estivesse sobre influência direta de nenhum afluente e nem dos maciços da barragem. Dois afluentes principais contribuem para a formação do reservatório, e o ponto central a esses tributários representou um ponto de aporte de águas similares. Outra consideração foi à escolha de um ponto que já fazia parte do sistema de monitoramento realizado pela COGERH.

A escolha de um único ponto de amostragem sempre gera críticas devido à variabilidade natural que ocorre nas três dimensões do reservatório. Considerando-se três variáveis, x , y e z , onde x é a largura, y a profundidade e z o comprimento de um reservatório qualquer, a escolha de um único ponto levará em consideração apenas uma dimensão, ou seja, as variações na qualidade da água serão função apenas de sua profundidade. Com efeito, este é um grande problema quando se estuda rios ou até mesmo reservatórios com correntes internas consideráveis. Neste trabalho procurou-se descrever o impacto de forçantes físicas no seu balanço energético, analisando o fenômeno da estratificação térmica e/ou mistura que ocorre ao longo da coluna d'água. Além disso, custos relativos à amostragem de mais de um

ponto tornaria custosa a metodologia utilizada, onde se procurou coletar dados com intervalos de tempo de três horas, perfazendo um ciclo diurno. A Figura 5-1 mostra o reservatório Pereira de Miranda e o ponto escolhido (PET-01), localizado às coordenadas UTM 471747,552 e 9579942,792; Zona 24.

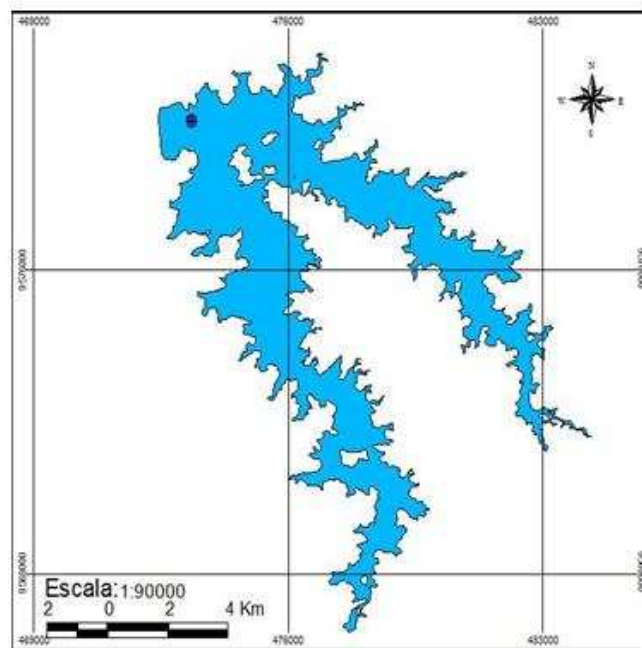


Figura 5-1. Açude Pereira de Miranda e o ponto escolhido para as amostragens (PET-01), localizado às coordenadas UTM 471747,552 e 9579942,792; Zona 24.

5.3 Freqüência temporal amostral

Para analisar o reservatório em campanhas que englobassem os dois períodos típicos de nossa região e mais relevantes quanto ao clima, o período chuvoso e o seco, foram realizadas amostragens no tempo e no espaço, descrevendo a variação sofrida ao longo da coluna d'água. A preocupação em minimizar custos também esteve presente, e por isso, dado a disponibilidade infra-estrutural, as medições foram iniciadas em dezembro de 2009 – época seca – onde permaneceram as coletas mensais até abril – época chuvosa.

O mês de dezembro, início das amostragens, foi adotado uma metodologia diferente do restante do monitoramento. O motivo foi o ajuste da metodologia ao apoio operacional proporcionado pela COGERH. A medição nictemeral nos meses subseqüentes foi posta em prática, com início às 06h00min de um dia e término às 06h00min do dia seguinte.

O intervalo entre uma medição e outra foi de três horas, mesmo intervalo utilizado pelas PCD (Plataforma de coleta de dados) da FUNCEME.

Para as coletas de água, o intervalo foi de seis horas, perfazendo um total de quatro amostragens de água em um dia. A primeira coleta era realizada juntamente à análise com sonda multiparamétrica, às 09h00min, e prosseguia até a última coleta, às 03h00min do dia seguinte, com coletas da água de superfície e do fundo do reservatório.

5.4 Seleção dos principais parâmetros de qualidade da água

Os parâmetros físico-químicos verificados foram Temperatura (T), Condutividade Elétrica (CE), Potencial Hidrogeniônico (pH), Oxigênio Dissolvido (OD) e Salinidade (S) através de sonda multiparamétrica YSI modelo 6600 V2, devidamente calibrada com soluções padrão (Figura 5-2). Também foram realizadas análises laboratoriais para a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Clorofila *a* (Clra), Fósforo Total (PT), Ortofosfato (Orto-P), Nitrogênio Total (NT), Amônia, Nitrito e Nitrato, Sólidos Totais (ST) e Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) e Coliformes Termotolerantes (Colif.).



Figura 5-2. Sonda Multiparamétrica YSI 6600 V2 e algumas soluções padrão utilizadas.

Para um adequado funcionamento dos sensores, é necessário que estes estejam bem calibrados, e para isso, utilizam-se soluções padrão que podem ser preparadas em laboratório, conforme as instruções contidas no manual do fabricante do equipamento, ou compradas prontas em distribuidores credenciados (ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2007). Para um melhor desempenho, preservação e prolongamento da vida útil dos eletrodos, seguiram-se

algumas recomendações durante a calibração, onde foi seguido uma ordem cronológica de calibração.

Primeiramente, procedeu-se a calibração do sensor de pH (Figura 5-3), de modo a não prejudicar o funcionamento dos outros sensores de íons seletivos. Para tal, foi feita a higienização do sensor com água destilada e lenço de papel; antes, depois e entre cada calibração. A solução padrão foi então colocada em copos plásticos descartáveis, que teve suas bordas retiradas para facilitar o contato com a solução e o manuseio com os sensores. Foram utilizadas duas soluções padrão de pH, um neutro (pH=7) e um alcalino (pH=10).

Logo após seguiu-se com a calibração da condutividade elétrica, com sua solução padrão ($1.412 \mu\text{S cm}^{-1}$), que também calibra a condutância específica, a salinidade e os sólidos totais dissolvidos (YSI INCORPORATED, 2009); oxigênio dissolvido, calibrado de acordo com seu valor de saturação à pressão atmosférica local registrada na sonda (Figura 5-4); turbidez, com solução padrão de 100 NTU, e por último a clorofila, onde ocorreu uma falha de calibração em algumas campanhas, devido a um erro quanto à temperatura que consta na tabela do fabricante, e cujos dados foram excluídos.



Figura 5-3. Sonda Multiparamétrica YSI 6600 V2. Em detalhe os sensores e a calibração do pH.

Nas coletas de água, uma lancha de alumínio Levefort Squalus 600 com motor YAMAHA 15HP, foi utilizada (Figura 5-5). A conservação das amostras coletadas foi feita em isopor com gelo, e enviadas ao laboratório do Centro Federal de Ciência e Tecnologia, IFCE-Sobral, para análise. Para a água superficial, coletou-se água em frascos de cinco litros, para análise de nutrientes, e em frascos de 300 ml, para análise microbiológica. Para a coleta de água no fundo do reservatório, utilizou-se uma garrafa de Van Dorn Milan GCM-03 (Figura 5-6), e estocagem em garrafas de vidro escuras de um litro, para posterior análise da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (Figura 5-7).



Figura 5-4. Calibração do oxigênio dissolvido à pressão atmosférica local e conservação das amostras.



Figura 5-5. Detalhe do frasco de 300 mL, para análise microbiológica; e lancha Squalus 600.



Figura 5-6. Garrafa de Van Dorn e disco de Secchi.



Figura 5-7. Detalhe do frasco de 1L escuro, para análise da DBO; e frasco de cinco litros, para análise dos nutrientes.

Outros equipamentos utilizados na amostragem: GPS Garmin Vista HCxetrex, utilizado na localização exata do ponto selecionado (Figura 5-8); anemômetro kestrel 1000, medição da velocidade do vento “in loco”; disco de Secchi padrão de 20 cm de diâmetro, para a medição da profundidade de atenuação da radiação solar profundímetro Speedtech Instruments (Figura 5-9), para a verificação da profundidade correta em que desceria a sonda multiparamétrica e em que seria coletada a amostra de água do fundo. Uma breve explanação sobre cada componente é apresentada e a seguir.



Figura 5-8. GPS Garmin Vista HCxetrex e Anemômetro Kestrel 1000.



Figura 5-9. Profundímetro Speedtech Instruments.

5.4.1 Nitrogênio Total, Nitrito e Nitrato

O nitrogênio, juntamente com o fósforo, são os dois nutrientes que mais influenciam a produtividade em água doce. Em águas naturais é encontrado em quatro formas principais, em ordem decrescente de estado de oxidação: nitrato, nitrito, amônia e nitrogênio orgânico APHA (2005). O nitrogênio total é a soma desses componentes. Uma das principais fontes de nitrogênio na biosfera é a fixação do nitrogênio molecular atmosférico (N_2).

5.4.2 Amônia total

A amônia está presente naturalmente em águas naturais e residuais. Tem sua origem na atividade das bactérias heterotróficas, por ser um produto primário da decomposição da matéria orgânica, seja de proteínas ou qualquer outro composto orgânico nitrogenado (WETZEL, 1983). As duas formas em que a amônia é encontrada na água são distintas quanto à sua toxidez. A forma gasosa NH_3 (amônia não ionizada) é bastante tóxica, causando irritações nas brânquias dos peixes, problemas respiratórios, além de impedir seu pleno desenvolvimento e até mesmo a morte (PEREIRA; MERCANTE, 2005). A sua forma ionizada, NH_4^+ , conhecido por íon amônio, é sua forma mais comum nas águas naturais. O equilíbrio entre suas formas depende da temperatura da água e o seu pH. Em águas quentes e com pH elevado, a conversão da amônia ionizada à forma não ionizada ocorre, piorando a qualidade do ambiente.

Boyd & Tucker (1998) apresentaram uma tabela (Tabela 5-1) que relaciona o percentual de amônia não-ionizada com base na temperatura e no pH da água:

Tabela 5-1. Percentual de amônia não-ionizada com base na temperatura e no pH da água.

pH	Temperatura °C						
	8	12	16	20	24	28	32
7,0	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1,0
8,0	1,6	2,1	2,9	3,8	5,0	6,6	8,8
8,2	2,5	3,3	4,5	5,9	7,7	10,0	13,2
8,4	3,9	5,2	6,9	9,1	11,6	15,0	19,5
8,6	6,0	7,9	10,6	13,7	17,3	21,8	27,7
8,8	9,2	12,0	15,8	20,1	24,9	30,7	37,8
9,0	13,8	17,8	22,9	28,5	34,4	41,2	49,0
9,2	20,4	25,8	32	38,7	45,4	52,6	60,4
9,4	30,0	35,5	42,7	50,0	56,9	63,8	70,7
9,6	39,2	46,5	54,1	61,3	67,6	73,6	79,3
9,8	50,5	58,1	65,2	71,5	76,8	81,6	85,8
10,0	61,7	68,5	74,8	79,9	84,0	87,5	90,6

Fonte: Adaptado de Boyd & Tucker (1998).

5.4.3 Fósforo Total

A produtividade anual de águas naturais depende principalmente das concentrações de fósforo que de qualquer outro nutriente ou fator ambiental, onde é essencial ao crescimento dos organismos (APHA, 2005). A principal fonte de fósforo para os ecossistemas aquáticos naturais são as rochas fosfatadas, através da erosão dos solos, e de forma não natural, como consequência da poluição através de águas residuais (WELCH, 1992). Normalmente está presente nas bacias hidrográficas em quantidades reduzidas sendo encontrado na água como fosfatos e organofosfatos originários de descargas de águas residuais, detergentes domésticos e resíduos agrícolas.

O fósforo é um componente importantíssimo dos seres vivos e com relação a outros macronutrientes é o menos abundante, sendo por isso classificado como fator limitante da produtividade biológica. Ocorre em águas naturais quase sempre ligados a fosfatos orgânicos e constituintes celulares dos organismos, tanto vivos como mortos, encontrando-se ainda dentro e/ou adsorvido a colóides orgânicos (WETZEL, 1983).

5.4.4 Ortofosfato

Em águas naturais e residuais, o fósforo ocorre quase que exclusivamente sob a forma de fosfatos (APHA, 2005). O ortofosfato [PO_4^{3-}] é a forma diretamente utilizável de fósforo inorgânico dissolvido pelos seres autótrofos. Por ser extremamente solúvel, reage com muitos cátions (exemplo o Fe^{2+} e o Ca^{2+}) para formar, especialmente em condições de oxidação, compostos relativamente insolúveis que precipitam na coluna d'água. Sua disponibilidade fica diminuída ainda pela adsorção a colóides inorgânicos e compostos particulados como argilas, carbonatos e hidróxidos (WETZEL, 1983). O fósforo assimilado pelos produtores é liberado também na forma de ortofosfato para o meio através da hidrólise de compostos orgânicos excretados pelos microorganismos, autólise e mineralização da matéria orgânica (PENA NAVAL & COUTO, 2005).

5.4.5 Clorofila *a*

A concentração de pigmentos fotossintéticos é extensamente utilizada para se estimar a biomassa fitoplanctônica. A clorofila *a* está presente em todas as plantas verdes, constituindo entre 1 e 2% do peso seco das algas planctônicas (APHA, 2005). Outros pigmentos podem ser encontrados no fitoplâncton como clorofilas *b* e *c*, xantofilas, ficobilinas e carotenóides. Por ser o pigmento mais comum, correspondem ao pigmento mais estudado.

5.4.6 Sólidos Totais e Sólidos Totais Dissolvidos

Os sólidos correspondem a toda matéria suspensa ou dissolvida na água. Sólidos totais é o termo utilizado para definir o material residual que sobra em um recipiente após a evaporação da água de uma dada amostra e sua subsequente secagem em forno com temperatura previamente estabelecida (APHA, 2005). Os sólidos totais incluem a porção que fica retida através de um filtro – sólidos suspensos totais – e uma parte que passa através do filtro – os sólidos dissolvidos totais. Os sólidos totais afetam a qualidade das águas de várias formas, como, por exemplo, diminuindo a penetração da radiação solar. Os sólidos dissolvidos totais é a porção dos sólidos totais que passam através de um filtro de $2\mu\text{m}$.

5.4.7 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A determinação da demanda bioquímica de oxigênio é um teste empírico, onde procedimentos laboratoriais padronizados são utilizados na determinação da necessidade relativa de oxigênio molecular para as reações bioquímicas de degradação da matéria orgânica (demanda carbonácea) e também o oxigênio necessário à oxidação de materiais inorgânicos (sulfetos e ferro ferroso), podendo também medir a quantidade de oxigênio necessária para oxidar formas reduzidas de nitrogênio (demanda nitrogenada).

São conhecidas várias formas de se estimar a demanda bioquímica de oxigênio, sendo mais utilizado o teste de $DBO_{20,5}$. Ele consiste na incubação de uma amostra por cinco dias a uma temperatura de 20 °C, onde o oxigênio dissolvido é medido no início e no final da incubação, e a DBO é computada como sendo sua variação entre o início e o fim do experimento. Para o consumo total de oxigênio da amostra, que representa o consumo total de oxigênio ao final de vários dias (cerca de 20 dias ou mais para o esgoto doméstico), tem-se a demanda última de oxigênio (DBO_u).

5.4.8 Coliformes Termotolerantes

As bactérias do grupo coliforme são as mais estudadas quando o assunto é indicação de contaminação fecal. A transmissão de doenças através de águas contaminadas constitui uma das mais importantes fontes de infecção e foi responsável por grandes epidemias de doenças entéricas graves como febre tifóide e cólera, que periodicamente aparecia em todos os países até o início deste século (YOKOYA *et al.*, 2010).

Dentre os coliformes, algumas subdivisões podem ser levadas em consideração e, às vezes, causarem certa confusão. O termo coliforme total é mais amplo, caracterizado, segundo a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde, pelos bacilos gram-negativos, aeróbios ou anaeróbios facultativos, não formadores de esporos, oxidase-negativos, capazes de desenvolver na presença de sais biliares ou agentes tensoativos que fermentam a lactose com produção de ácido, gás e aldeído a $35,0 \pm 0,5$ °C em 24-48 horas, e que podem apresentar atividade da enzima β -galactosidase (a maioria das bactérias do grupo coliforme pertence aos gêneros *Escherichia*, *Citrobacter*, *Klebsiella* e *Enterobacter*, embora vários outros gêneros e espécies pertençam ao grupo).

Os coliformes fecais, também chamados coliformes termotolerantes, é o subgrupo do grupo coliforme que fermentam a lactose a $44,5 \pm 0,2$ °C em 24 horas; tendo como

principal representante a *Escherichia coli*, de origem exclusivamente fecal. Os coliformes fecais, por serem restritos ao trato intestinal de animais de sangue quente, são os indicadores mais utilizados na determinação de contaminação fecal, e entre eles, a *Escherichia coli* é considerada o mais específico indicador de contaminação fecal recente e de eventual presença de organismos patogênicos, pela relativa facilidade de quantificação.

A Tabela 5-2 mostra todos os parâmetros analisados em laboratório, suas unidades e a metodologia de análise.

Tabela 5-2. Parâmetros de qualidade da água analisados em laboratório.

Parâmetro	Unidade	Método
Sólidos dissolvidos totais	mgL ⁻¹	Gravimetria (2540 C) - APHA, 2005.
Sólidos totais	mg L ⁻¹	Gravimetria (2540 B) - APHA, 2005.
Nitrogênio total	mg N L ⁻¹	Soma do Nitrogênio orgânico, amoniacal, Nitrito e Nitrato.
Fósforo total	mg P L ⁻¹	Ácido ascórbico (4500-P E) - APHA, 2005.
Ortofosfato	mg P-PO ₄ ³⁻ L ⁻¹	Ácido ascórbico (4500-P E) - APHA, 2005.
Clorofila a	µg L ⁻¹	Espectrofotométrico (10200 H) - APHA, 2005.
Feoftina	µg L ⁻¹	Espectrofotométrico (10200 H) - APHA, 2005.
Nitrogênio amoniacal	mg N-NH ₃ L ⁻¹	Nesslerização direta - APHA, 1989.
Nitrito	mg N-NO ₂ ⁻ L ⁻¹	Colorimétrico (4500-NO ₂ ⁻ B) - APHA, 2005.
Nitrato	mg N-NO ₃ ⁻ L ⁻¹	Salicilato de sódio - RODIER, 1975.
DBO	mg O ₂ L ⁻¹	Iodometria (5210 B) - APHA, 2005.
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	Tubos múltiplos com meio A1 (9221 E 2)- APHA, 2005.

5.4.9 Aquisição de Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos mais relevantes foram disponibilizados através das séries históricas das plataformas de coleta de dados (PCD) da FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Os parâmetros destas séries históricas foram a radiação solar, a velocidade e a direção dos ventos, a umidade relativa, a precipitação pluviométrica, a pressão barométrica e a temperatura do ar.

Dados referentes às características geomorfológicas dos açudes foram disponibilizados através de consultas à COGERH (Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará) e a batimetria do açude Pentecoste, encomendada com a finalidade da futura aplicação de um modelo de qualidade de água.

5.4.10 Análise dos dados de qualidade da água

Para os principais dados de qualidade da água registrados com sonda multiparamétrica (temperatura, oxigênio dissolvido, salinidade e pH), foi realizada uma discussão com base na estatística descritiva básica e correlações lineares entre os parâmetros e alguns fatores hidrológicos/climatológicos relevantes do reservatório durante o período de amostragem.

Para os onze parâmetros de qualidade da água analisados em laboratório, foi feita além de uma caracterização geral das estatísticas descritivas básicas e das correlações com os fatores hidrológicos, uma análise multivariada dos dados. A intenção de tal análise foi a verificação do modo de variação dos dados e as suas influências na qualidade da água, além da estimação de quais parâmetros quantificados respondem mais pela qualidade da água total. Para isso foi utilizada a técnica de análise das componentes principais (PCA), que tem por objetivo explicar a estrutura de variância e covariância de um vetor aleatório, composto por 'p' variáveis aleatórias (Figura 5-10), através da construção de combinações lineares entre as variáveis originais (MINGOTI, 2005).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	SSD	ST	NT	PT	ORTO	CLOR	AMONIA	NITRE	NITRA	D&O	COLIF			
1	212.00	234.00	0.93	0.14	0.03	16.00	0.52	0.01	0.04	11.50	2.00			
2	215.00	245.00	1.07	0.10	0.03	13.00	0.56	0.03	0.04	12.10	4.00			
3	211.00	240.00	1.13	0.09	0.03	15.00	0.27	0.01	0.05	12.10	8.00			
4	208.00	227.00	0.58	0.08	0.03	12.00	0.31	0.03	0.04	9.30	13.00			
5	210.00	238.00	0.88	0.10	0.03	14.00	0.21	0.01	0.06	11.00	900.00			
6	213.00	235.00	0.97	0.07	0.02	13.00	0.35	0.01	0.03	13.20	1600.00			
7	238.20	248.30	1.09	0.14	0.03	15.90	0.14	0.00	0.01	5.00	900.00			
8	215.80	246.80	1.45	0.10	0.03	12.00	0.23	0.00	0.06	4.00	1600.00			
9	233.20	247.70	1.32	0.12	0.02	11.50	0.21	0.00	0.02	3.50	140.00			
10	244.20	247.80	1.35	0.11	0.03	12.30	0.25	0.00	0.02	3.00	50.00			
11	231.00	241.70	1.34	0.12	0.01	10.70	0.10	0.00	0.04	2.40	280.00			
12	221.80	249.00	1.56	0.09	0.01	12.30	0.11	0.01	0.04	3.00	0.00			
13	244.00	246.30	1.36	0.26	0.01	5.60	0.10	0.01	0.04	4.40	500.00			
14	233.50	242.50	1.75	0.20	0.01	10.70	0.10	0.00	0.06	3.60	30.00			
15														
16														
17														

Figura 5-10. Planilha inicial do S-Plus® com os dados de qualidade da água iniciais.

Para isso, foi calculada a matriz de correlação dos dados (Figura 5-11), no sentido de eliminar o problema de escalas e unidades diferenciadas em que as variáveis são medidas. Os cálculos e a confecção dos gráficos foram realizados com o software estatístico S-Plus® 2000.

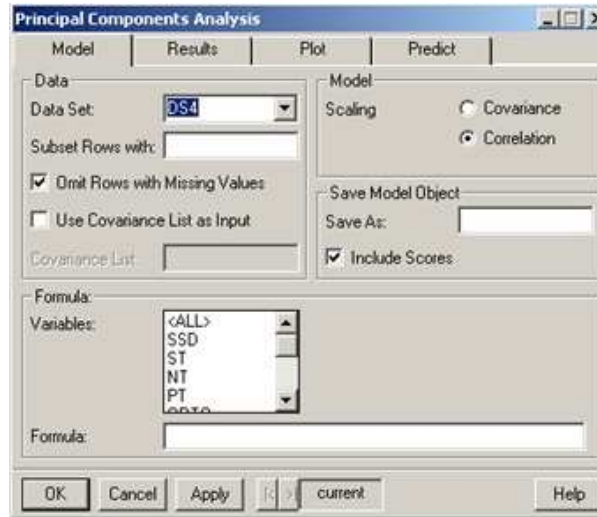


Figura 5-11. Processamento dos dados no S-Plus® via correlação.

5.4.11 Cálculo das densidades

Segundo JI (2007), a densidade (ρ) é função principalmente de três parâmetros: temperatura (T), salinidade (S) e concentração de sólidos totais (C). A relação entre essas quatro variáveis pode ser escrita como:

$$\rho = f(T, S, C) \quad (31)$$

e é referida como uma equação de estado. A atual forma da função f foi estabelecida empiricamente. Expressando a equação de estado na forma diferencial (Equação 32),

$$d\rho = \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)_{S,C} dT + \left(\frac{\partial\rho}{\partial S}\right)_{T,C} dS + \left(\frac{\partial\rho}{\partial C}\right)_{T,S} dC \quad (32)$$

Conseqüentemente,

$$\rho = \rho_T + \Delta\rho_S + \Delta\rho_C \quad (33)$$

Onde ρ_T = densidade da água pura como função da temperatura (kg m^{-3}), $\Delta\rho_S$ = incremento de densidade pela salinidade e $\Delta\rho_C$ = incremento da densidade pelos sólidos totais.

Uma grande variedade de equações empíricas foram propostas para descrever a densidade da água pura como função da temperatura, da salinidade e dos sólidos totais; dentre elas, a mais utilizada em modelagem hidrodinâmica (GILL, 1982; FORD; JOHNSON, 1986 *apud* JI, 2007) é a Equação 34

$$\begin{aligned} \rho_T = & 999,842594 + 6,793952 \times 10^{-2}T - 9,095290 \times 10^{-3}T^2 \\ & + 1,001685 \times 10^{-4}T^3 - 1,120083 \times 10^{-6}T^4 \\ & + 6,536332 \times 10^{-9}T^5 \end{aligned} \quad (34)$$

Onde T é a temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$). O incremento devido a salinidade é apresentado na Equação 35

$$\begin{aligned} \Delta\rho_S = & S(0,824493 - 4,0899 \times 10^{-3}T + 7,6438 \times 10^{-5}T^2 - 8,2467 \times 10^{-7}T^3 \\ & + 5,3875 \times 10^{-9}T^4) \\ & + S^{3/2}(-5,72466 \times 10^{-3} + 1,0227 \times 10^{-4}T \\ & - 1,6546 \times 10^{-6}T^2) + S^2 4,8314 \times 10^{-4} \end{aligned} \quad (35)$$

Onde S = Salinidade, kg/m^3 . Os sólidos totais, C, inclui duas partes; sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos totais. O seu incremento na densidade pode ser dado pela Equação 36

$$\begin{aligned} \Delta\rho_C = & TSS \left(\frac{1 - 1}{SG} \right) \times 10^{-3} \\ & + TDS(8,221 \times 10^{-4} - 3,87 \times 10^{-6}T + 4,99 \times 10^{-8}T^2) \end{aligned} \quad (36)$$

Onde TSS = concentração de sólidos suspensos totais (g/m^3), TDS = concentração de sólidos dissolvidos totais (g/m^3) e SG = densidade relativa dos sólidos suspensos totais; unidade adimensional, razão entre a densidade de um fluido (ou sólido) e a densidade da água pura (=2,56).

5.4.12 Balanço de energia

A avaliação do balanço de energia do lago tem por finalidade a determinação da profundidade da termoclina a cada intervalo de tempo. Alguns modelos matemáticos são utilizados visando à modelação de tal profundidade, através do balanço entre as energias mecânicas e térmicas (fluxo de calor) que atuam no reservatório. Os ventos, os fluxos de massa (entradas e saídas) e as trocas cinéticas entre o hipolímnio e o epilímnio são as energias mecânicas que promovem a mistura entre as camadas, homogeneizando o sistema (RIGHETTO, 1998).

A energia térmica que aquece a camada superficial dos lagos tem origem da radiação solar, e a absorção de tal radiação depende de fatores como comprimento de onda da luz incidente e da quantidade de material em suspensão. Ford e Johnson (1986) afirmam que grande parte dos perfis verticais de temperatura para lagos e reservatórios apresentam características que os tornam particulares. A região superior (epilímnio) dos lagos geralmente se encontra misturada, devido à ação dos ventos principalmente, e a profundidade deste epilímnio misturado é muito variável, dada as condições hidrometeorológicas locais.

Um modelo bastante simples pode ser utilizado levando-se em consideração apenas a temperatura como forçante física. Conhecendo-se o perfil térmico da coluna d'água, pode-se estimar a transferência de calor ao longo da profundidade. Para isso, algumas hipóteses simplificadoras são assumidas: desconsideram-se variações longitudinais das camadas e considera-se o fundo do lago como um isolante térmico, portanto, não há troca de calor entre o substrato e a camada mais profunda. Chapra (1997) mostrou uma relação para a temperatura e o calor absorvido pela água, mostrado na Equação 37

$$T = \frac{H}{\rho C_p V} \quad (37)$$

Onde T é a temperatura da água em °C; H é o calor, em Joules e C_p é o calor específico, em $J (kg \text{ } ^\circ C)^{-1}$.

Inicialmente foi realizada a segmentação do lago em camadas horizontais fixas (ΔH) onde se calcula a temperatura média para cada camada, seguindo dados coletados com sonda multiparamétrica do perfil térmico. Em seguida, avaliou-se a quantidade de calor trocada por cada camada pré-estabelecida, estimando as trocas térmicas, da camada inferior à camada superior.

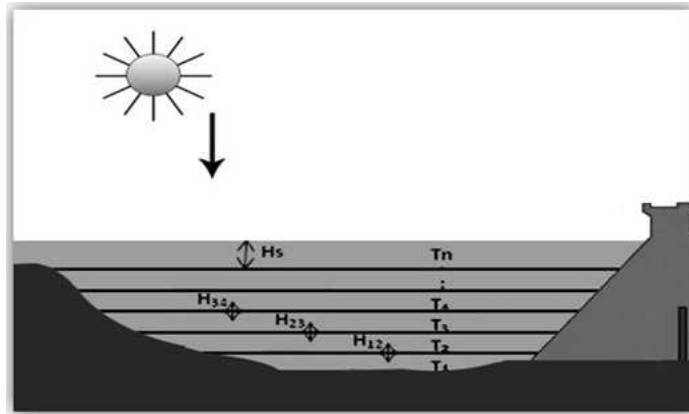


Figura 5-12. Discretização do reservatório em n camadas horizontais, onde $H_{i, i+1} = H_i + H_{i-1, i}$.

Para cada camada calcula-se a quantidade de calor armazenado com base na temperatura medida por sonda multiparamétrica, e o perfil formado por todas as diferenças ao longo da coluna d'água fornece o fluxo de calor por camada por unidade de tempo, segundo a Equação 38

$$\Delta Q = Hs - Hi \quad (38)$$

Onde ΔQ é a variação no calor armazenado; Hs é o calor da camada superior e Hi o calor da camada inferior.

Na Figura 5-12, Hs representa a quantidade de calor armazenado na camada superior. As trocas caloríficas entre as camadas estão representadas por H_{12} , H_{23} e H_{34} . A diferença da quantidade de calor entre camadas ou a variação na quantidade de calor é resultado da advecção/condução térmica pela coluna d'água. A identificação da termoclina é feita através deste balanço, pela análise das trocas térmicas. Para variações pequenas ou próximas a zero, pode-se afirmar que não há troca de calor, e, com isso, uma região misturada está presente. Quando a variação na quantidade de calor trocada é alta, é sinal de que a termoclina está próxima.

Assim como o balanço de massa, o balanço térmico pode ser escrito com base no volume hídrico. A partir da batimetria do reservatório, foram calculados os volumes do reservatório para cada cota específica. Como o reservatório foi dividido em camadas fixas de alturas ΔH , o cálculo do volume para cada camada específica e de qualquer altura pode ser realizado por meio da ferramenta Solver, ferramenta da planilha do Microsoft Office Excel, empregado em soluções de problemas matemáticos de relativa complexidade. O cálculo é

então realizado minimizando os erros relativos entre o cálculo dos volumes e os volumes medidos (Equação 39)

$$e = Vobs_i - Vcal_i \quad (39)$$

Onde $Vobs_i$ é o volume medido e $Vcal_i$ é o volume calculado. Assim, pela Equação 40

$$\frac{Mín}{\alpha, \beta} \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad (40)$$

Minimiza-se a função variando os parâmetros α e β . Para o reservatório Pereira de Miranda, as variáveis α e β calculadas foram, respectivamente, 0,03179 e 3,08955. O volume na cota específica pode então ser calculado através da fórmula:

$$V = \alpha (H - H_0)^\beta \quad (41)$$

Para a análise da estabilidade da estratificação de densidades foi utilizado o número de Richardson, adimensional expresso como uma relação entre as forças de flutuação e a energia de mistura fornecida pelos ventos, onde

$$R_i = -\frac{g}{\rho} \frac{\frac{\partial \rho}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \quad (42)$$

com z representando a coordenada vertical da profundidade (m); ρ a densidade da água ($m^3 kg^{-1}$); g a gravidade ($m s^{-2}$) e u a velocidade ($m s^{-1}$).

Quando R_i é um valor alto, ocorre estratificação e é estável. Valores de R_i menores que 0,25 significam que a mistura ocorre entre camadas estratificadas (WETZEL, 1975; TURNER, 1973; MONIN & YAGLON, 1971 *apud* MARTIN & McCUTCHEON, 1998). Para valores de R_i próximos a zero, tem-se uma condição homogênea das camadas.

5.4.13 Isolinhas da temperatura, oxigênio dissolvido e fluxo de calor na coluna d'água

As isolinhas de temperatura, oxigênio dissolvido e os gráficos dos fluxos de calor na coluna d'água foram realizados a partir da interpolação dos dados qualitativos coletados em campo com sonda multiparamétrica, através do método de *krigagem*, e com o auxílio dos softwares S-Plus[®] 2000 e MATLAB[®].

6 RESULTADOS

6.1 Análise dos dados de qualidade da água

6.1.1 Variabilidade sazonal e diária da hidrodinâmica e da qualidade da água

6.1.1.1 Temperatura, Oxigênio Dissolvido, pH e Salinidade da Água

A discussão qualitativa da água contida em um reservatório é algo complexo dado à variedade de parâmetros que a influencia. Um aspecto muito útil na quantificação dos processos físicos (tais como a estratificação de densidades) é a análise da variabilidade térmica da coluna d'água. A temperatura da água (Tabela 6-1) é de grande importância em um ambiente aquático, visto que as transformações físicas, químicas e biológicas são a ela sensíveis (CHAPRA, 1997). A caracterização dos perfis verticais de temperatura (Figura 6-1) em um reservatório, com base nos dados de campo capturados, fornece uma base sólida para o entendimento das mudanças provocadas pelo aquecimento da água.

Tabela 6-1. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para os dados de Temperatura da água.

Temperatura (°C)	Mínimo	Máximo	Δ (°C)	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	27,03	28,56	1,53	27,58	0,3302	1,20
Janeiro	28,24	29,65	1,41	28,73	0,3941	1,37
Março	29,29	31,50	2,21	29,70	0,4551	1,53
Abril	29,58	31,77	2,19	30,30	0,7205	2,38

A primeira perfilagem realizada no açude Pereira de Miranda, em dezembro de 2009, foi realizada em intervalos de 2 horas, com início às 06h00min e término às 20h00min. A intenção primordial foi a identificação do processo de estratificação térmica, e sua influência nos outros parâmetros sondados. A temperatura registrada variou entre 27,03 e 31,77 °C, e apresentou um aquecimento notável da coluna d'água de 3,21°C ao longo do período de amostragem. Tal aquecimento pode ser explicado pela diminuição no volume total do reservatório, que teve pouca ou nenhuma afluência, e permaneceu liberando água através

da tomada d'água. Com um volume de água menor, o reservatório tendeu a aumentar sua temperatura, dado a pequena variação da temperatura do ar (Tabela 6-2).

Tabela 6-2. Temperatura do ar registrado durante o período de amostragem.

Temperatura do ar (°C)	Mínimo	Máximo
Dezembro	24,9	34,4
Janeiro	24,2	33,4
Março	24,0	35,4
Abril	24,1	32,3

O volume armazenado no reservatório Pereira de Miranda variou entre 283hm³ em Dezembro de 2009 e 238 hm³ em Abril de 2010. A partir da primeira campanha de monitoramento do reservatório o volume começou a decair em virtude da falta de chuvas no período, da intensa evaporação potencial e da contínua liberação de água pela tomada d'água. Esta redução de 15,6 % foi decisiva não só para o aumento na temperatura média do reservatório, como também para uma série de outros impactos advindos da diminuição do volume.

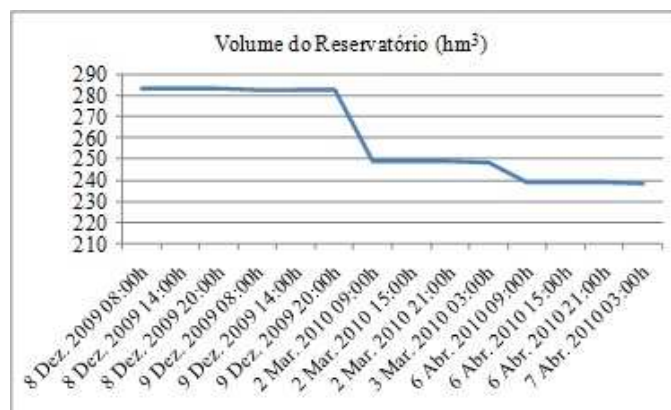


Figura 6-1. Evolução do volume do reservatório Pereira de Miranda no período de amostragem.

Os perfis de temperatura da água mostram que o reservatório Pereira de Miranda apresentou-se estratificado em períodos mais ou menos constantes, mostrando certo padrão de mistura e estratificação ao longo do dia. Este padrão de mistura e estratificação pode ser explicado em grande parte pelo aquecimento do epilímnio durante as horas de influência da luz solar no reservatório, e a tendência de poucos ventos nas primeiras horas do dia. As Figuras 6-1 à 6-4 mostram os perfis verticais de oxigênio dissolvido e temperatura para o mês

de Dezembro de 2009. Pode-se notar, através destes gráficos, o deslocamento da termoclina e a variação dos perfis de temperatura e oxigênio que ocorreram em função da hidrodinâmica lacustre.

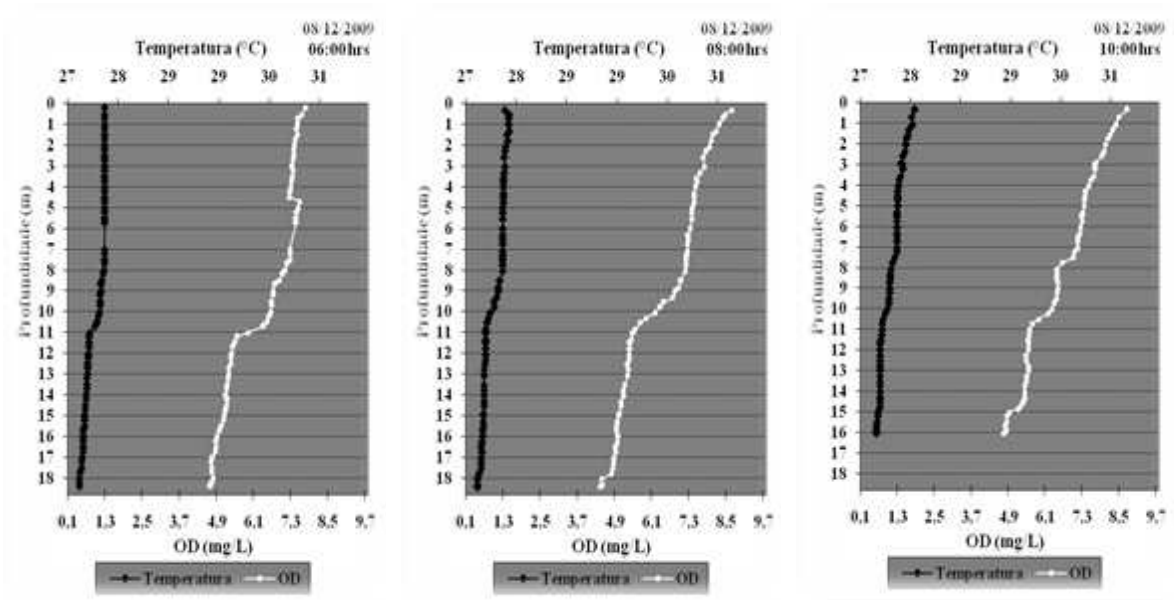


Figura 6-2. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 8 Dez. 2009, às 06h00min, 08h00min e 10h00min.

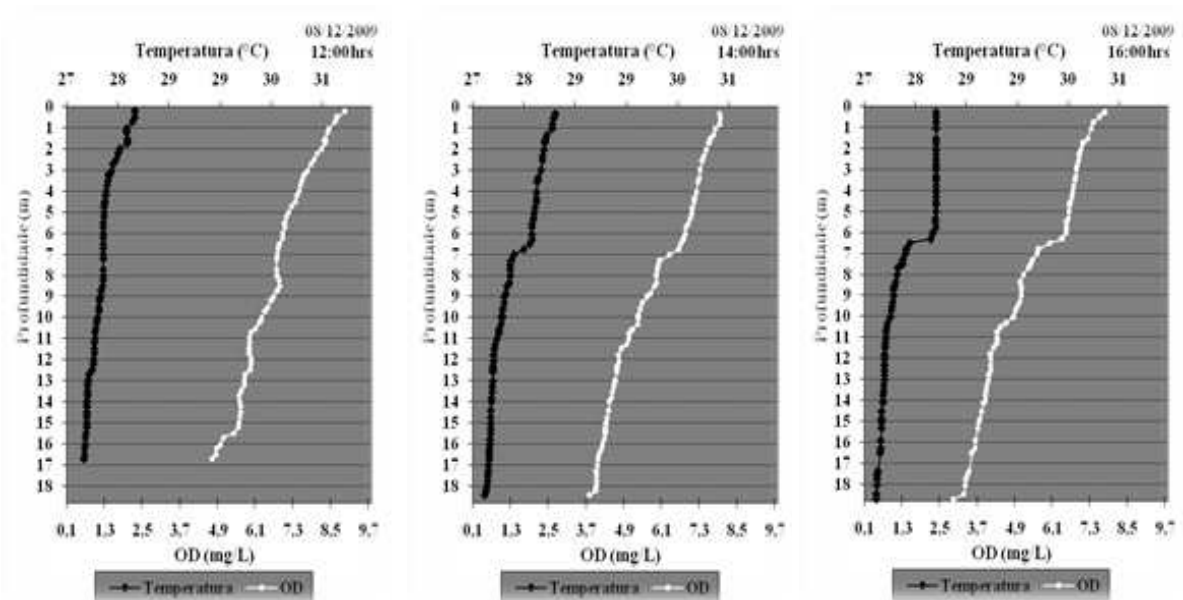


Figura 6-3. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 8 Dez. 2009, às 12h00min, 14h00min e 16h00min.

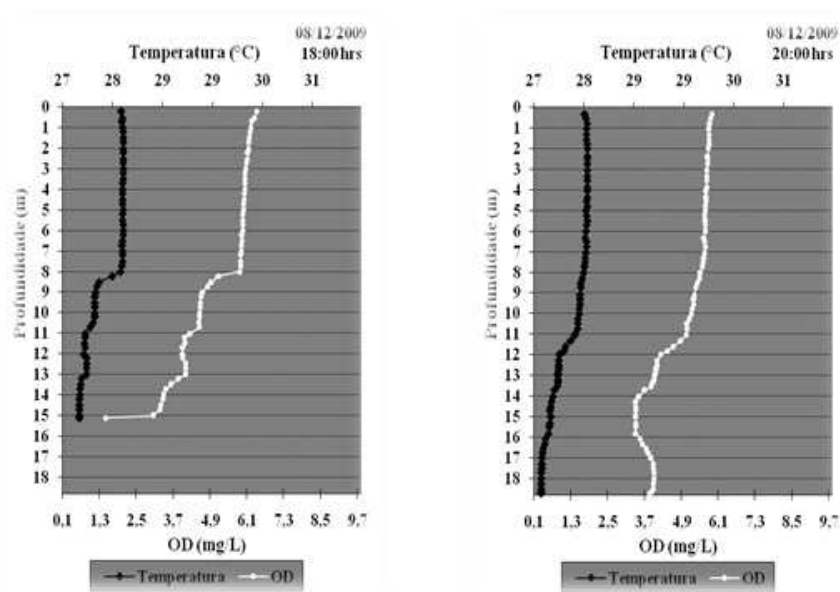


Figura 6-4. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 8 Dez. 2009, às 18h00min e 20h00min.

Este padrão de circulação e estabilidade da coluna d'água em lagos tropicais é função do aquecimento e resfriamento diário. Como é de se esperar, com a radiação solar praticamente constante (Figura 6-4), os processos hidrodinâmicos passam a ser função da velocidade e duração dos ventos e as afluências principalmente. A amostragem realizada em dezembro (Tabela 6-2) no reservatório Pereira de Miranda revelou um padrão governado pela variabilidade diurna dos ventos (Figuras 6-5 e 6-6).

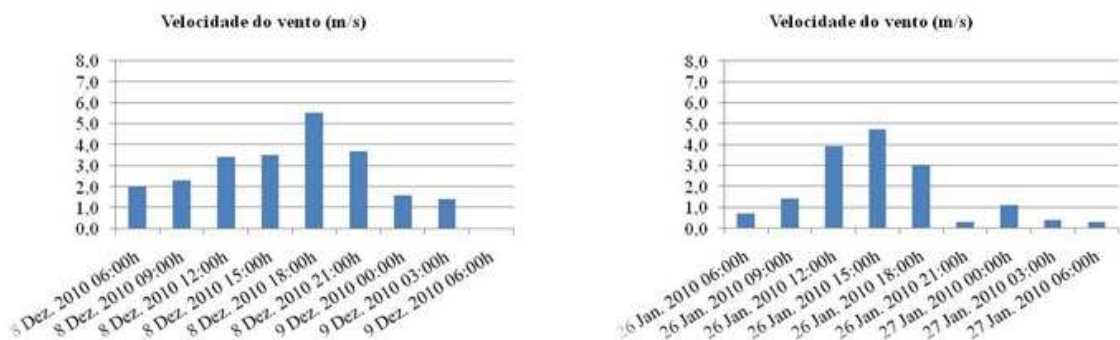


Figura 6-5. Velocidade dos ventos registrada nos dias 8 e 9 de Dez. 2009 e 26 e 27 de Jan. 2010.

Notou-se uma tendência dos picos na intensidade dos ventos ocorrerem entre as 15h00min e 20h00min. Este acréscimo na intensidade dos ventos reflete diretamente na coluna da água, deslocado a profundidade média da termoclina.

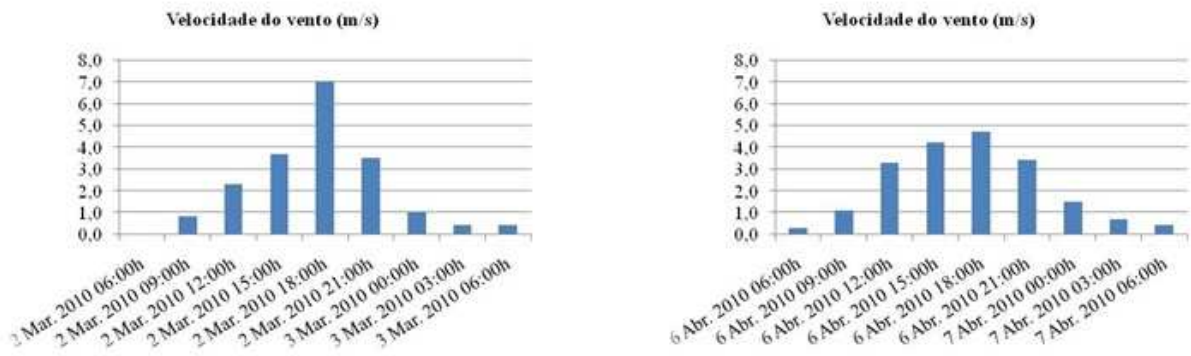


Figura 6-6. Velocidade dos ventos registrada nos dias 2 e 3 de Mar. 2010 e 6 e 7 de Abr. 2010.

No período da tarde, a insolação máxima que transferiu energia térmica para a superfície da água, agora começa o processo de diminuição da intensidade, e paralelamente a isso, os ventos aumentaram sua velocidade e duração. As Figuras 6-7 e 6-8 mostra como variou a radiação solar no período de amostragem.

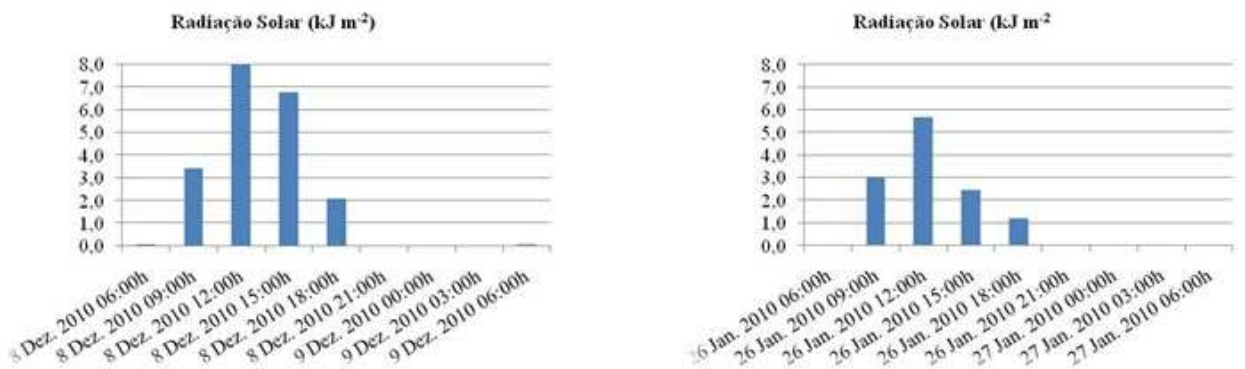


Figura 6-7. Radiação solar total registrada a 10m da superfície do reservatório Pereira de Miranda nos dias 8 e 9 de Dez. 2009 e 26 e 27 de Jan. 2010.

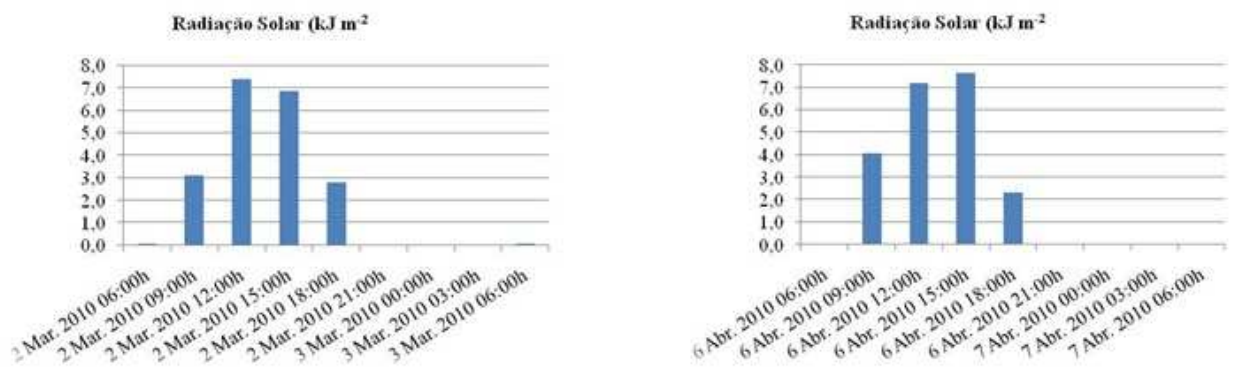


Figura 6-8. Radiação solar total registrada a 10m da superfície do reservatório Pereira de Miranda nos dias 2 e 3 de Mar. 2010 e 6 e 7 de Abr. 2010.

A duração de ventos mais intensos pôde ser observada no local, mas faltaram instrumentos para quantificar sua amplitude. Outro importante fator para a qualidade da água é a direção dos ventos. As Figuras 6-9 e 6-10 mostram sua variação no período de amostragem.

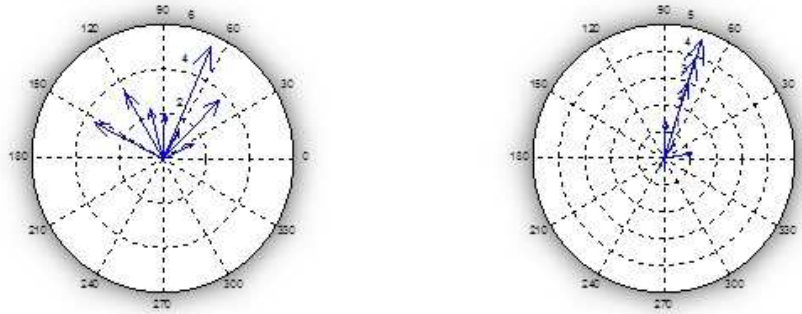


Figura 6-9. Rosa dos ventos para o reservatório Pereira de Miranda em 8 e 9 Dez. 2009; 26 e 27 Jan. 2010.

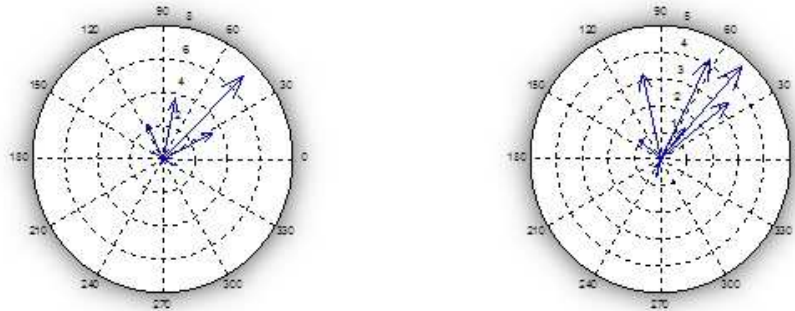


Figura 6-10. Rosa dos ventos para o reservatório Pereira de Miranda em 2 e 3 Mar. 2010; 6 e 7 Abr. 2010.

A direção dos ventos impacta diretamente na qualidade da água e este impacto é função da pista de vento, ou *fetch*. A movimentação da água é devida em grande parte a este processo, que varia de acordo com a disposição morfológica do reservatório. Quanto maior a pista de vento, maior será a superfície livre que o vento irá atritar, provocando maiores turbulências na coluna d'água. O vento durante o período de amostragem manteve sua direção preferencial nordeste, e o plano de inclinação do reservatório é no sentido noroeste-sudeste. Esta inclinação entre os braços principais do reservatório e a direção dos ventos forma um ângulo de 90° , que diminui o efeito do *fetch*. Mesmo com esses dados, pôde ser notada uma pequena variação ao longo do dia, e essa variação, principalmente nos períodos da tarde, foi decisiva para a mistura das camadas estratificadas.

Tendo em vista a complexidade ecossistêmica em um reservatório como é o caso do Pereira de Miranda, amplas relações devem ser procuradas a fim de classificar bem o ambiente. A metodologia de monitoramento foi adequada ao padrão nictemeral de variação do semiárido nordestino, juntamente com a possibilidade de confrontarmos dados meteorológicos observados pela FUNCEME com intervalo de tempo de 3 horas.

A estratificação térmica que foi observada na coluna d'água influenciou vários parâmetros da qualidade da água, como pôde ser percebido pelos perfis de pH e salinidade (Figuras 6-11 à 6-13).

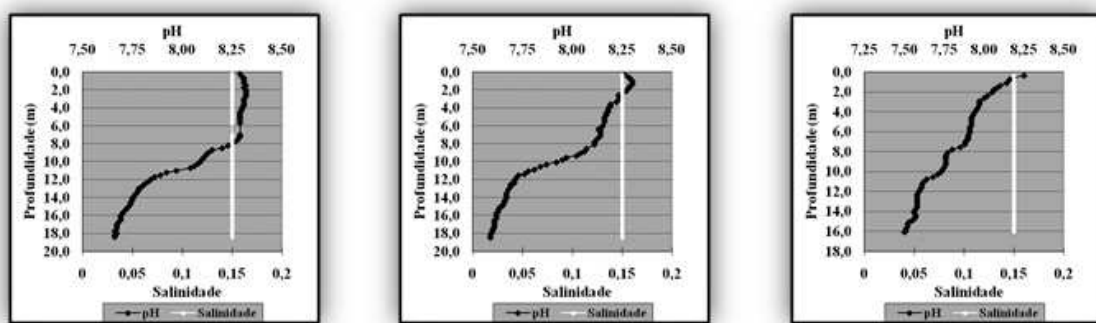


Figura 6-11. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 8 Dez. 2009, às 06h00min, 08h00min e 10h00min

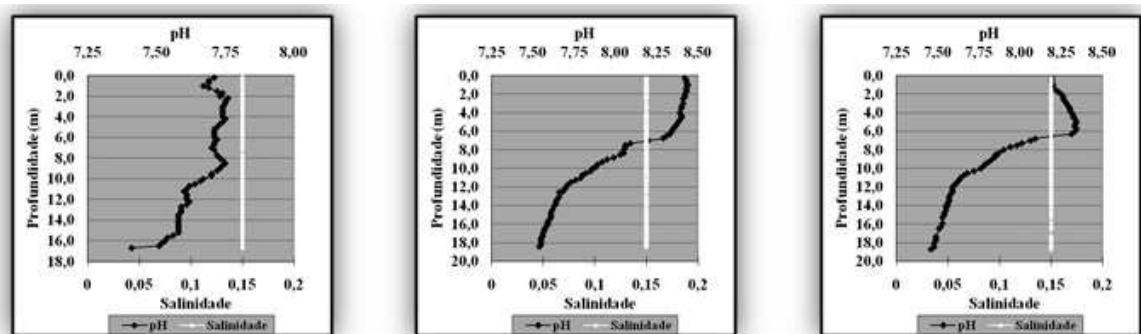


Figura 6-12. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 8 Dez. 2009, às e às 12h00min, 14h00min e 16h00min.

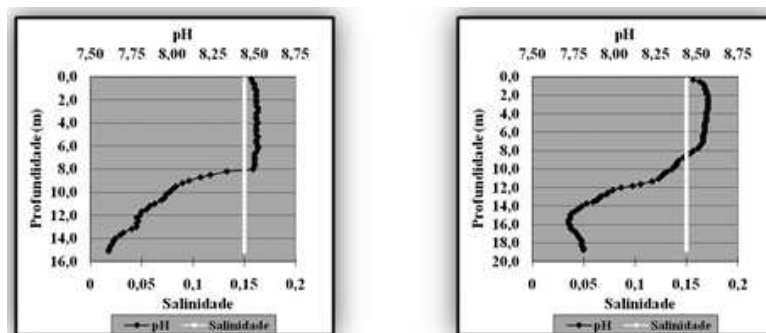


Figura 6-13. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 8 Dez. 2009, às 18h00min e às 20h00min.

A energia térmica absorvida pela superfície é transferida às camadas mais profundas tanto pela difusão molecular - processo mais lento - como pela advecção da água em movimento, provocado pelas correntes internas. Tal energia é armazenada pelas camadas superiores e se desloca no sentido do fundo do reservatório, sofrendo com a brusca diminuição na transferência devido a formação da termoclina.

A temperatura da água apresentou alta correlação com os padrões de oxigênio dissolvido, fato comum de ser presenciado em vários corpos d'água. A temperatura da água afeta não só as reações bioquímicas com influencia diretamente na solubilidade dos gases. O valor mínimo para o coeficiente de correlação de Pearson encontrado se deu no mês de dezembro ($r = 0,6649$). Os meses subsequentes apresentaram alta correlação, comprovando a importância da temperatura nos níveis de oxigênio dissolvido (valores variando entre 0,9304 e 0,9910). A Tabela 6-3 mostra os coeficientes de correlação linear calculados para as variáveis medidas com sonda multiparamétrica, em Dezembro de 2010.

Tabela 6-3. Coeficiente de correlação (r) entre os parâmetros de qualidade da água perfilados por sonda em 8 Dez. 2010.

Dezembro	Profundidade (m)	Temperatura (°C)	OD (mg L⁻¹)	Salinidade (ppt)	pH
Profundidade (m)	1				
Temperatura (°C)	-0,8548	1			
OD (mg L⁻¹)	-0,8353	0,6650	1		
Salinidade (ppt)	0,0000	0,0000	0,0000	1	
pH	-0,7603	0,8119	0,5093	0,0000	1

O epilímnio mais oxigenado pelas produções fotossintéticas e pelo processo de reaeração permanece com plenas condições à vida aquática, mostrando concentração de oxigênio dissolvido superior a 5,0 mg L⁻¹, valor mínimo recomendado, por exemplo, para a manutenção dos biota aquáticos, como o referido pela Resolução Federal CONAMA 357/2005.

Com base nos critérios de oxigênio dissolvido publicados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), as faixas de concentração de oxigênio dissolvido com as respectivas comunidades aquáticas que podem suportar tais níveis são: de 0 a 2 mg L⁻¹ é insuficiente para manter a vida aquática; de 2 a 4 mg L⁻¹ somente poucas espécies de peixes podem sobreviver; de 4 a 7 mg L⁻¹ é aceitável para peixes de águas quentes e de 7 a 11 mg L⁻¹ é ideal para peixes de águas frias (SILVA; JARDIM, 2006). A Tabela 6-4 mostra os valores descritivos básicos para o oxigênio dissolvido.

Os valores apresentaram uma grande variação, mas se mantiveram dentro da média aceitável para peixes de águas quentes, por exemplo. Os valores mínimos encontrados e que correspondem a momentos de anoxia foram registrados principalmente no fundo do reservatório.

Tabela 6-4. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados de Oxigênio Dissolvido.

OD (mg L ⁻¹)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	0,87	8,94	5,91	1,3476	22,79
Janeiro	1,05	8,05	3,66	2,3257	63,55
Março	0,27	9,67	4,48	2,5125	56,06
Abril	0,12	9,79	3,59	3,6877	102,68

Nestes locais mais profundos, a produção de oxigênio não ocorre devido à ausência da radiação solar. Em lagos e reservatórios tropicais o consumo de oxigênio é bastante elevado e o efeito da estratificação térmica aumenta os déficits de oxigênio dissolvido a grandes profundidades (BEZERRA-NETO; PINTO-COELHO, 2001). Nota-se pelos perfis de OD que o perfil clinogrado apresentado reflete a dependência deste pela temperatura. A produtividade primária que produz grande parte do OD durante o período com luz solar não ocorre no hipolímnio, e sua produção restrita ao epilímnio não ultrapassa as barreiras formadas pela diferença de densidade entre as camadas estratificadas.

Reservatórios eutrofizados caracterizam-se por uma elevada produtividade primária. Esta elevada produtividade acarreta uma quantidade maior de reações bioquímicas que de uma forma ou de outra impacta em todos os compartimentos do ambiente aquático. A fotossíntese eleva o pH em função do maior consumo do gás carbônico e, por outro lado, a respiração e a decomposição da matéria orgânica tornam a água mais ácida, pois ocasionam maior produção desse gás, com conseqüente desequilíbrio no sistema carbônico (DODDS, 2002).

Durante o período de amostragem o pH da água do reservatório Pereira de Miranda apresentou-se dentro da normalidade para lagos e reservatórios. Os valores de pH da água do reservatório se mantiveram dentro da faixa alcalina, variando de valores próximos a 9 na superfície até valores próximos de 7 no fundo. Esta variabilidade pode ser explicada pela retirada do gás carbônico dissolvido da água pelos organismos produtores, deslocando o

equilíbrio da reação no sentido da formação de O₂. A Tabela 6-5 mostra valores descritivos básicos para o pH da água do reservatório Pereira de Miranda.

Muitas regiões áridas e semiáridas do mundo costumam apresentar problemas com a salinização, que é o processo de aumento da concentração dos sais dissolvidos na água. Estes problemas são frequentes em ambientes onde a evaporação é elevada.

Tabela 6-5. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados de pH.

pH	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	7,39	8,7	7,99	0,3563	4,46
Janeiro	7,35	8,87	7,99	0,5149	6,45
Março	7,28	8,85	7,90	0,4841	6,13
Abril	7,27	8,96	7,94	0,6608	8,32

Dois tipos de salinização podem ser distinguidos, natural ou antropogênica (salinização secundária), sendo a última causada principalmente pelos desvios no curso dos rios, mudanças no uso e ocupação da terra e irrigação (WILLIAMS, 1999). A salinidade do reservatório Pereira de Miranda variou muito pouco diariamente (Tabela 6-6), acompanhando a estratificação das camadas.

Tabela 6-6. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados de Salinidade.

Salinidade (ppt)	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	0,15	0,15	0,15	0	0
Janeiro	0,16	0,16	0,16	0	0
Março	0,19	0,20	0,1980	0,0039	0
Abril	0,19	0,20	0,1970	0,0047	0

Nas últimas campanhas os valores tiveram um pequeno acréscimo, fato devido possivelmente à diminuição do volume hídrico e conseqüente concentração dos sais presentes. As correlações entre os valores da Temperatura da água com o pH e o OD foram altos e positivos (Tabela 6-7), comprovando a sua relação clara com o processo fotossintético. O fato da água do reservatório ter ficado sempre na faixa alcalina é importante para caracterizar o efeito tampão que o sistema apresenta. O equilíbrio ácido-básico é de fundamental importância para os biota aquáticos e se mantém estável de acordo com três variáveis limnológicas principais, que são o pH, a alcalinidade e a concentração de CO₂ livre (CROSSETTI & BICUDO, 2008).

As perfilagens subseqüentes ao mês de dezembro mostraram a manutenção do padrão térmico, com uma termoclina principal aparecendo no início do aquecimento da superfície.

Tabela 6-7. Coeficiente de correlação (r) entre os parâmetros de qualidade da água perfilados por sonda em 26 e 27Jan. 2010.

Janeiro	Profundidade (m)	Temperatura (°C)	OD (mg L ⁻¹)	Salinidade (ppt)	pH
Profundidade (m)	1				
Temperatura (°C)	-0,9000	1			
OD (mg L ⁻¹)	-0,9099	0,9881	1		
Salinidade (ppt)	0,0000	0,0000	0,0000	1	
pH	-0,8992	0,9861	0,9877	0,0000	1

Notou-se também o aparecimento de algumas termoclinas secundárias, mais profunda no período do dia após as 15h00min devido à propagação do calor por transporte de massa d'água e mistura acentuada pelos fortes ventos. Este processo que integra o aquecimento da superfície e os fortes ventos deslocou a termoclina várias vezes ao dia, como pode ser percebido comparando as Figuras 6-14 e 6-16. Uma das características físicas mais importantes dos lagos é sua profundidade de mistura durante os períodos de estratificação. A presença do hipolímnio limitou de certa forma a propagação de calor da superfície ao fundo do reservatório, além de gases dissolvidos, como é o caso do oxigênio.

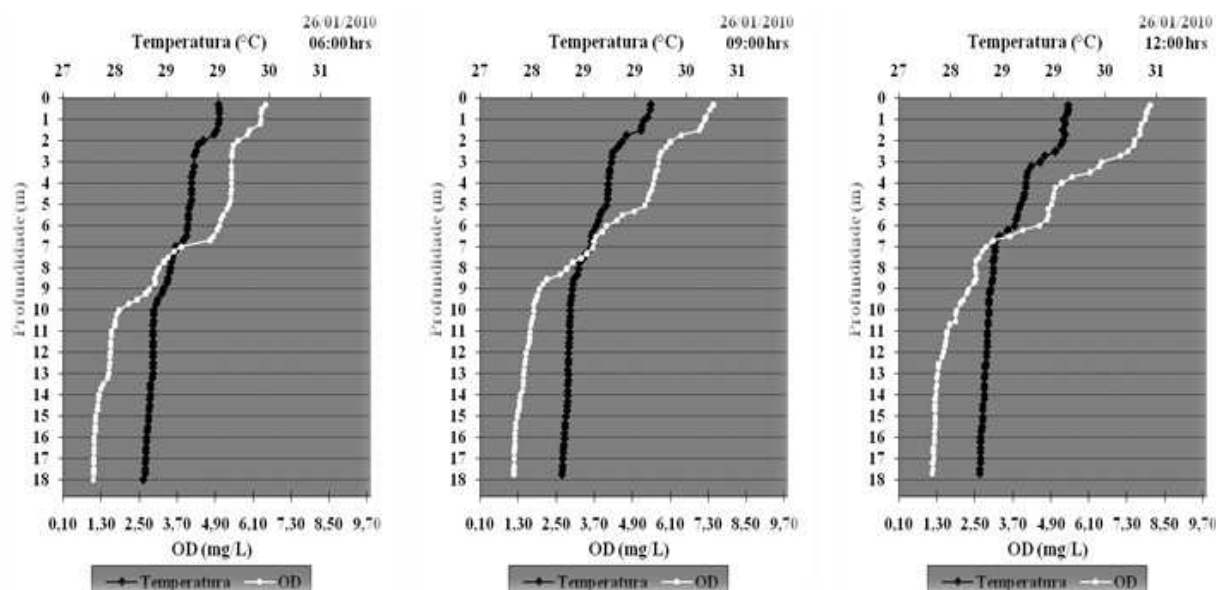


Figura 6-14. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 26 Jan. 2010, às 06h00min e 09h00min.

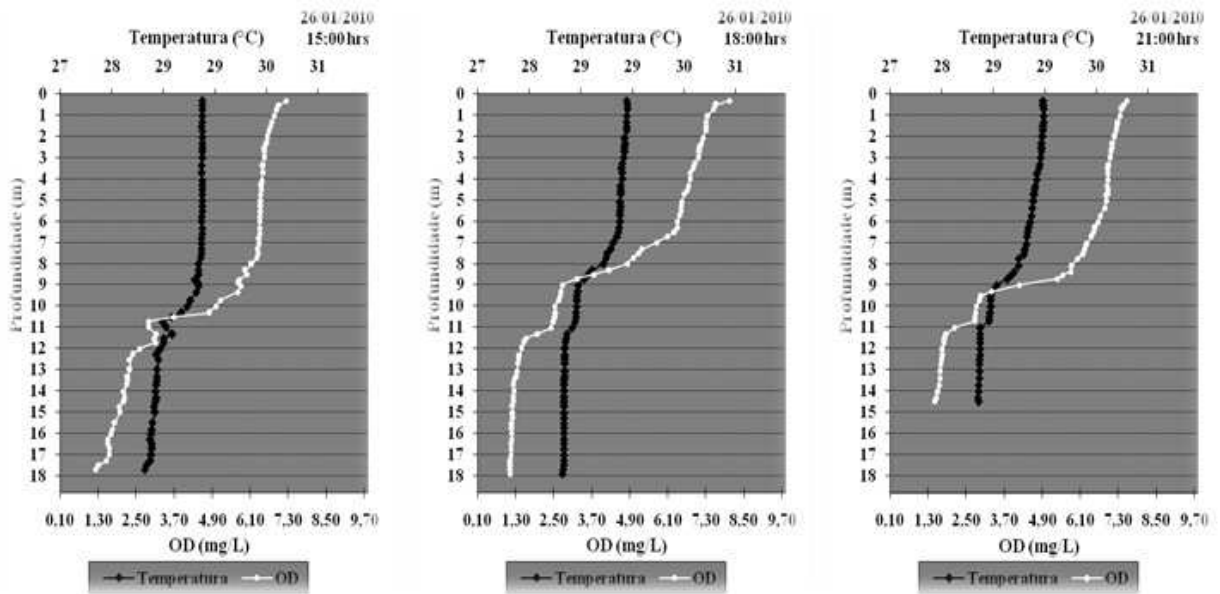


Figura 6-15. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 26 Jan. 2010, às 15h00min, 18h00min e 21h00min.

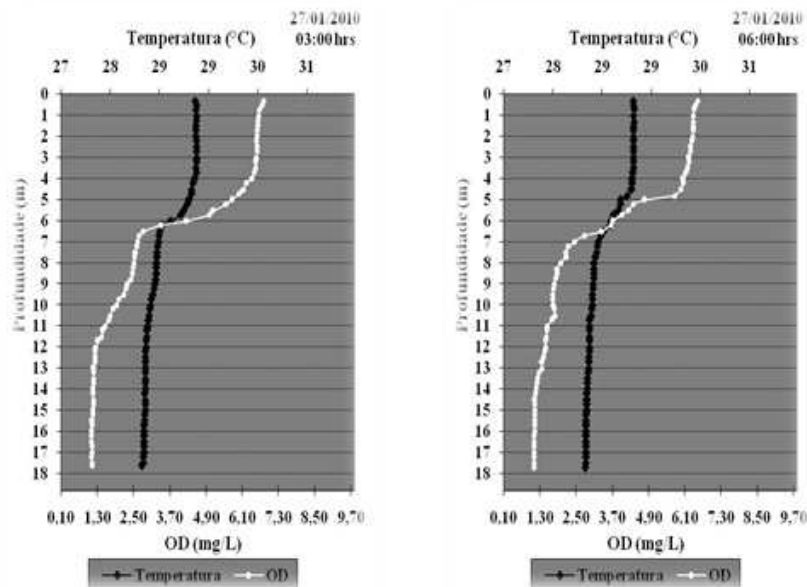


Figura 6-16. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 27 Jan. 2010, às 03h00min e 06h00min.

Os perfis térmicos muitas vezes mostram o epilímnio variando ao longo do dia, com a mistura das camadas modificando sua profundidade. É comum ocorrer em reservatórios tropicais uma mistura superficial, com o hipolímnio mantendo-se inalterado. O aparecimento de termoclinas secundárias no epilímnio e a tendência de misturar parcialmente pode ser uma variação do tipo de padrão polimítico, conhecido por atelomixia. A atelomixia possui como forçante principal as correntes advectivas, que no caso da polimixia são os ventos. A principal

importância ecológica da atelomixia está na dinâmica fitoplanctônica, que dependem da movimentação das águas para sua permanência no epilímnio (MARCELINO, 2005).

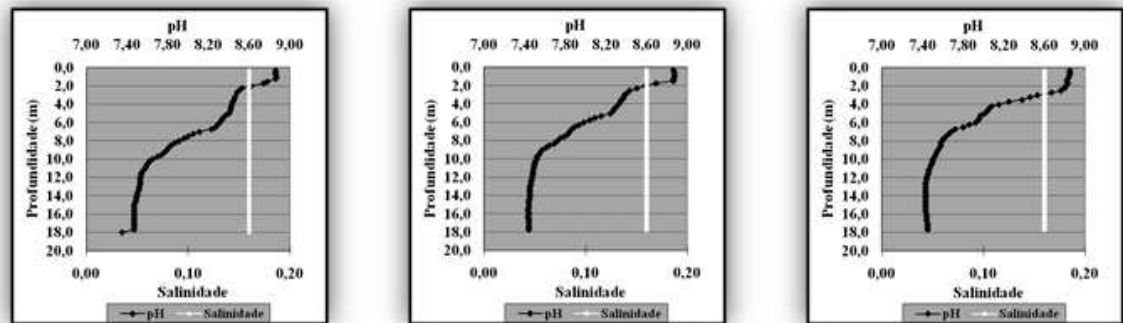


Figura 6-17. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 26 Jan. 2010, às 06h00min, 09h00min e 12h00min

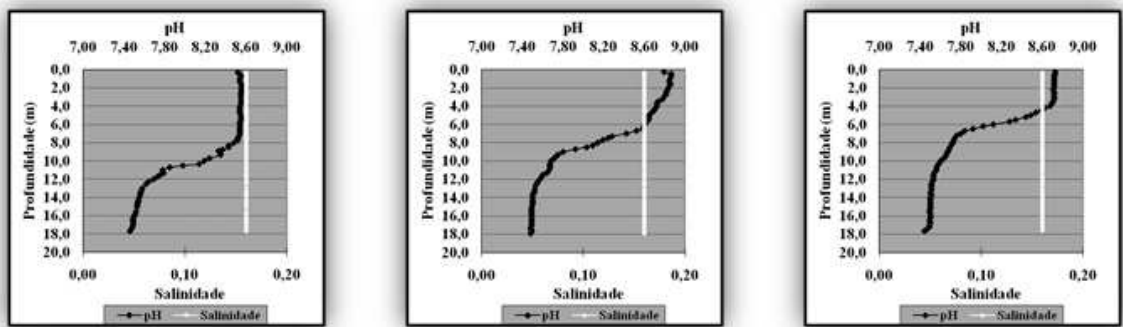


Figura 6-18. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 26 Jan. 2010, às 15h00min, 18h00min e 21h00min.

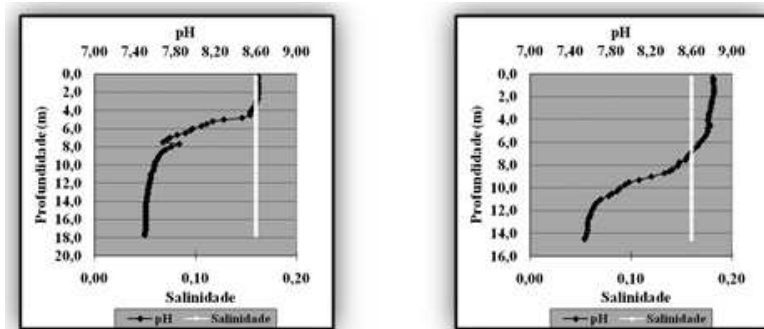


Figura 6-19. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 27 Jan. 2010, às 03h00min e às 06h00min.

O mês de março foi onde se encontrou o maior gradiente de temperatura, no valor de 2,21 °C. Uma variação desta magnitude pode ser pequena e ter pequeno impacto em ambientes frios, mas para nossos reservatórios esta é uma variação considerável. O início do mês de março (Tabela 6-8) apresentou uma termoclina mais superficial no período noturno, quando comparadas as outras perfilagens. Analisando apenas os ventos, observou-se um

padrão geral formado, com picos bem localizados, embora sem informações sobre a duração de tal evento.

Tabela 6-8. Coeficiente de correlação (r) entre os parâmetros de qualidade da água perfilados por sonda em 2 e 23 Mar. 2010.

Março	Profundidade (m)	Temperatura (°C)	OD (mg L ⁻¹)	Salinidade (ppt)	pH
Profundidade (m)	1				
Temperatura (°C)	-0,8262	1			
OD (mg L ⁻¹)	-0,9324	0,9304	1		
Salinidade (ppt)	0,5725	-0,6482	-0,6225	1	
pH	-0,8973	0,9595	0,9818	-0,6356	1

Os perfis registrados no mês de março seguiram o padrão de fortes estratificações no final da tarde (Figuras 6-19 a 6-21). Uma forte rajada de vento às 16h00min forçou o epilímnio misturado a descer e deslocar a termoclina que estava localizada aproximadamente a 3,5 metros, às 15h00min para 8,5 metros de profundidade, às 18h00min.

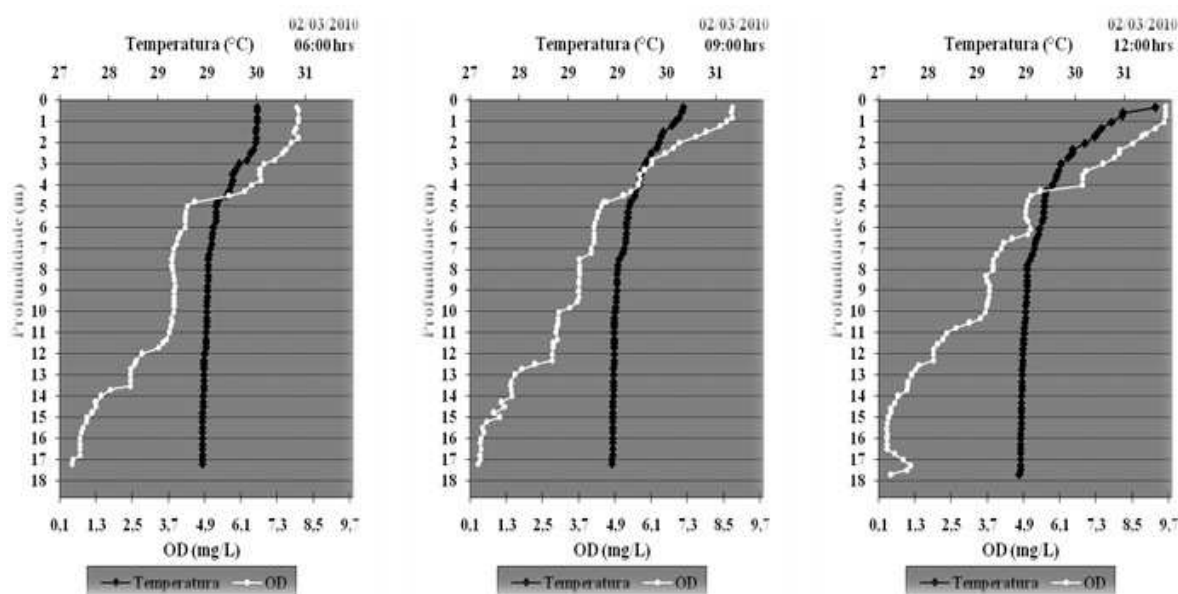


Figura 6-20. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 2 Mar. 2010, às 06h00min, 09h00min e 12h00min.

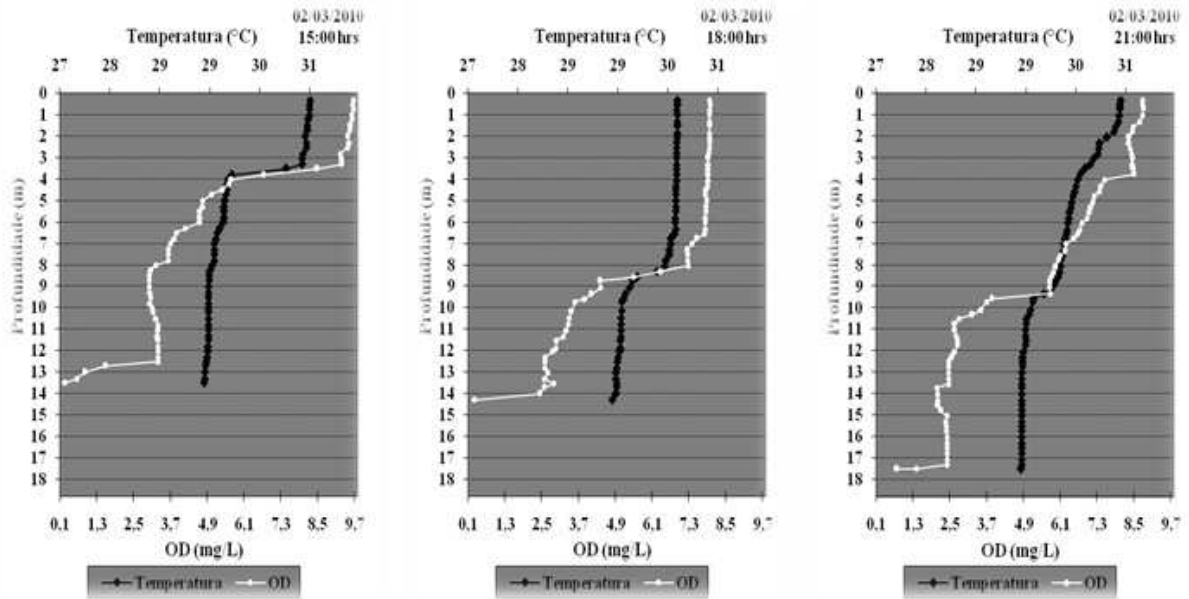


Figura 6-21. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 2 Mar. 2010, às 15h00min, 18h00min e 21h00min.

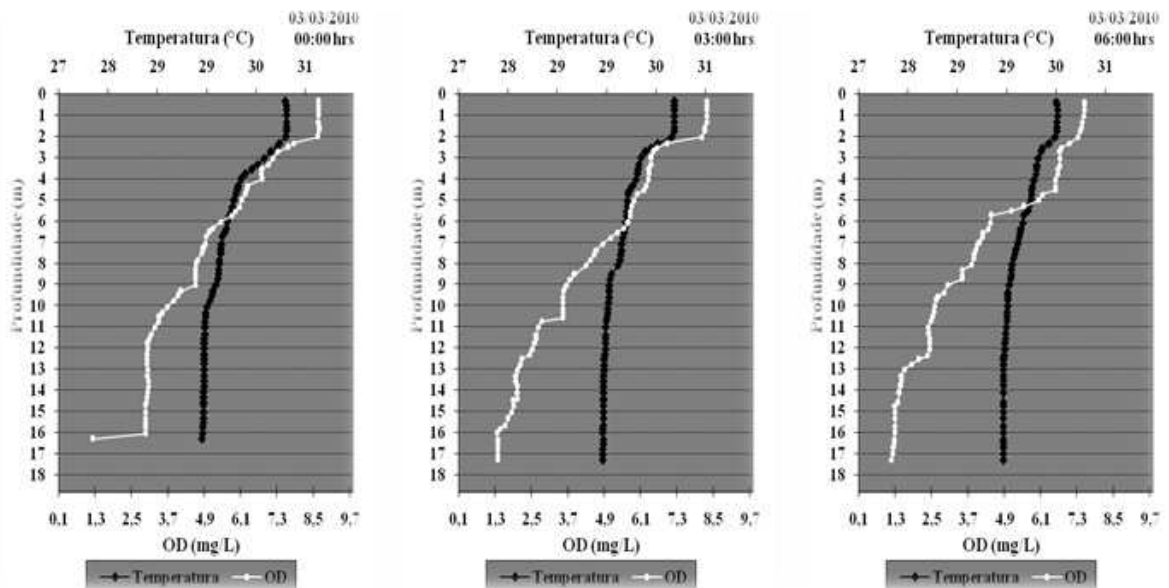


Figura 6-22. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 2 Mar. 2010, às 00h00min, 03h00min e 06h00min.

O pH da água também manteve o padrão que acompanhou a queda da temperatura. O coeficiente de correlação entre a temperatura da água e o pH foi de 0,96, o que comprova a ligação entre os dois parâmetros. As Figuras 6-22, 6-23 e 6-24 mostram os perfis de pH da água para o mês de Março de 2010.

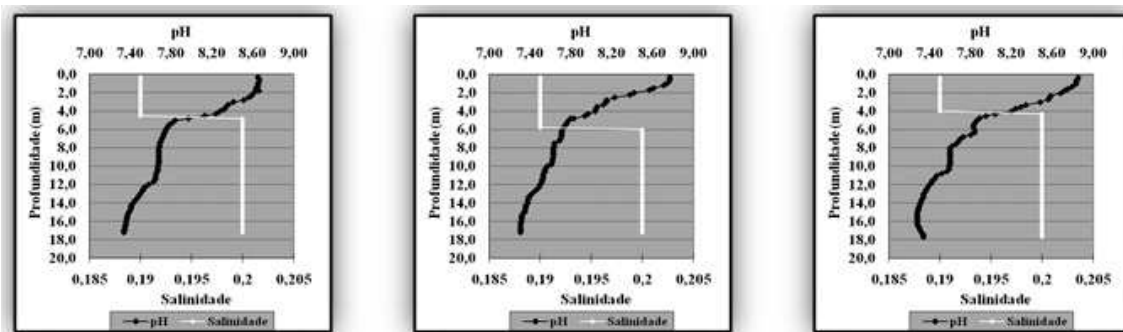


Figura 6-23. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 2 Mar. 2010, às 06h00min, 09h00min e 12h00min.

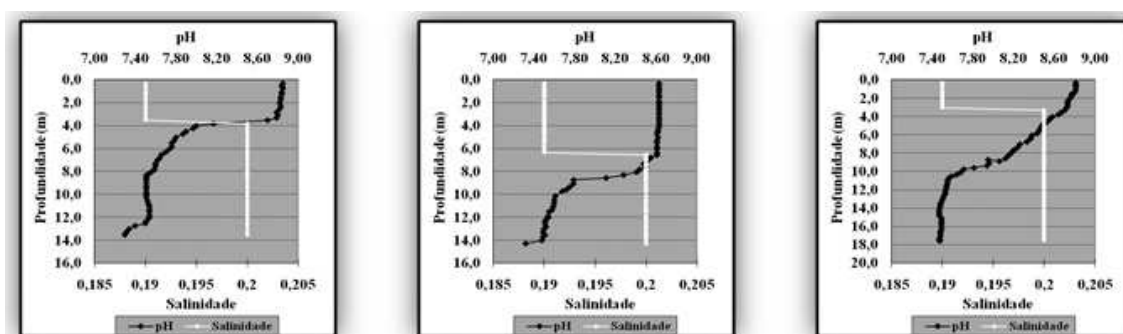


Figura 6-24. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 2 Mar. 2010, às 15h00min, 18h00min e 21h00min.

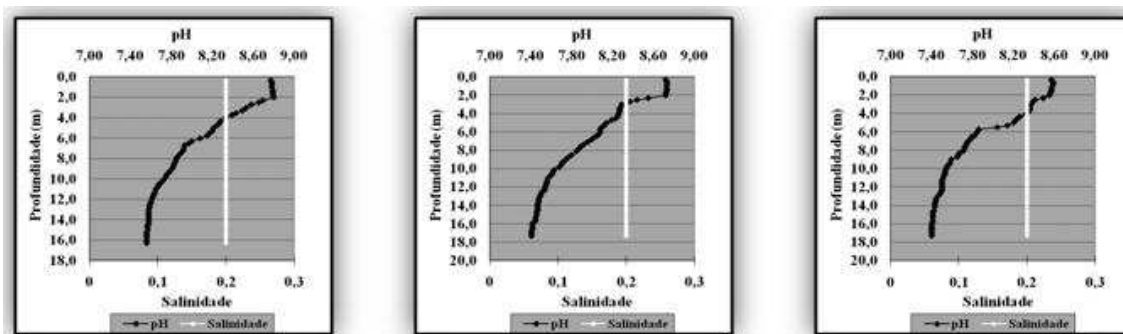


Figura 6-25. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 3 Mar. 2010, às 00h00min, 03h00min e 06h00min.

As variáveis climáticas impactam significativamente no ambiente aquático, e a elas deve ser dada uma atenção especial, principalmente por essas variáveis modificarem o perfil hidrodinâmico do reservatório. O ano de 2010 foi um ano tipicamente seco, com baixa ou nenhuma precipitação pluviométrica, o que aumentou o tempo de residência do reservatório e culminou em aumento da concentração de cargas geradas e afluentes. A afluência hídrica ao reservatório sendo baixa modifica padrões de circulação internos, e impacta também nos padrões de mistura. Lewis (2000) comenta que a sazonalidade de um reservatório é altamente influenciada pelo ciclo hidrológico do rio ao qual ele está conectado.

Basicamente, em termos de classificação do corpo hídrico, o reservatório Pereira de Miranda variou entre algumas tendências, conforme indicado por Lewis (2000), citando os lagos tropicais como fundamentalmente monomíticos quentes, variando entre polimíticos, quando possuem profundidade relativa baixa, ou meromíticos, quando possuem profundidade relativa mais elevada. A análise do padrão de estratificação térmica aplicado ao ponto amostral escolhido no açude Pereira de Miranda permite classificá-lo como polimítico (espaço de tempo em que o reservatório esteve misturado com pequenas estratificações pouco duradouras), e com o aparecimento de quimioclinas.

A última perfilagem ocorreu no início de abril de 2010, com o reservatório mostrando uma estratificação térmica mais consistente, aparecendo uma termoclina próxima a profundidade de 5m e que permaneceu até o fim das medições (Figuras 6-26, 6-27 e 6-28). Era de se esperar que alguma afluência hídrica ao reservatório já estivesse ocorrendo, dada às precipitações de início de ano. A Tabela 6-9 apresenta os coeficientes de correlação linear para os parâmetros perfilados por sonda multiparamétrica no mês de Abril de 2010.

Tabela 6-9. Coeficiente de correlação (r) entre os parâmetros de qualidade da água perfilados por sonda em 6 e 7 Abr. 2010.

Abril	Profundidade (m)	Temperatura (°C)	OD (mg L⁻¹)	Salinidade (ppt)	pH
Profundidade (m)	1				
Temperatura (°C)	-0,8904	1			
OD (mg L⁻¹)	-0,9062	0,9910	1		
Salinidade (ppt)	0,7192	-0,7912	-0,7937	1	
pH	-0,9003	0,9887	0,9939	-0,8073	1

A qualidade da água dentro do reservatório varia de acordo com a quantidade da água que chega, e também com a sua qualidade. Mas neste ano de 2010 não houve chuva alguma, e, portanto, não foi possível quantificar impactos desta natureza. Com isso, explicações acerca da estratificação térmica do reservatório Pereira de Miranda neste espaço de tempo nos remete a analisar o fenômeno como função principalmente da radiação solar e dos ventos.

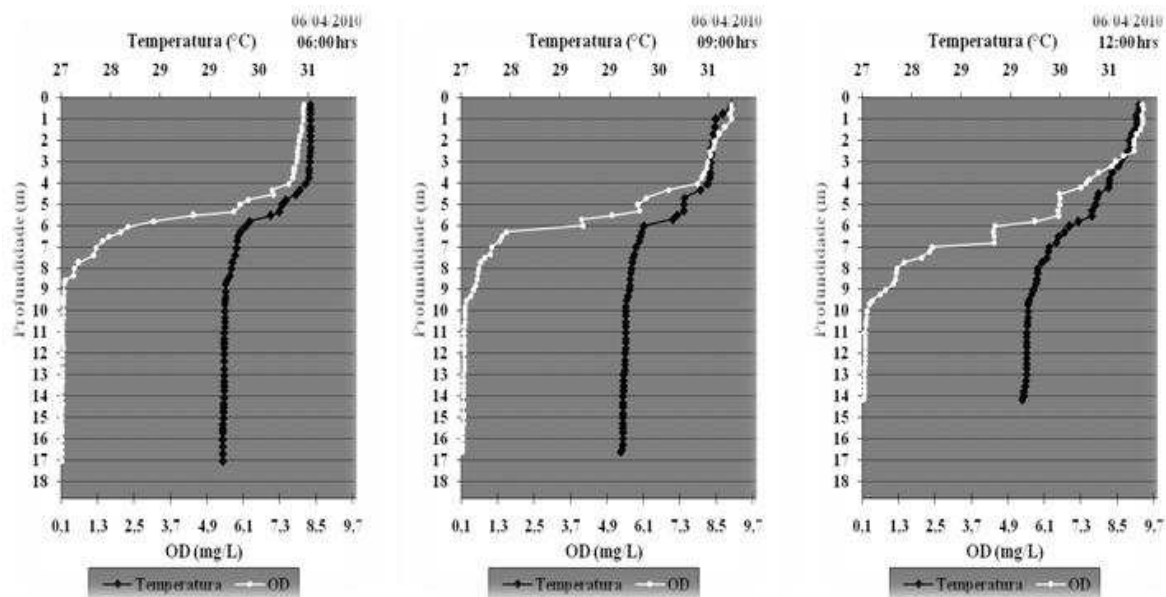


Figura 6-26. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 6 Abr. 2010, às 06h00min, 09h00min e 12h00min.

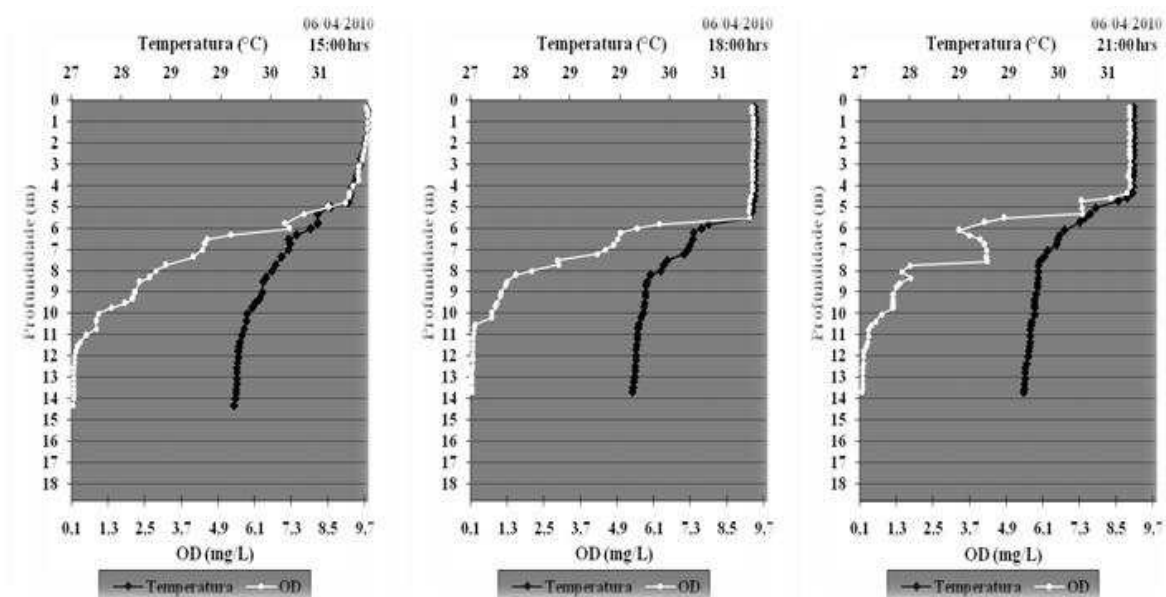


Figura 6-27. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 6 Abr. 2010, às 15h00min, 18h00min e 21h00min.

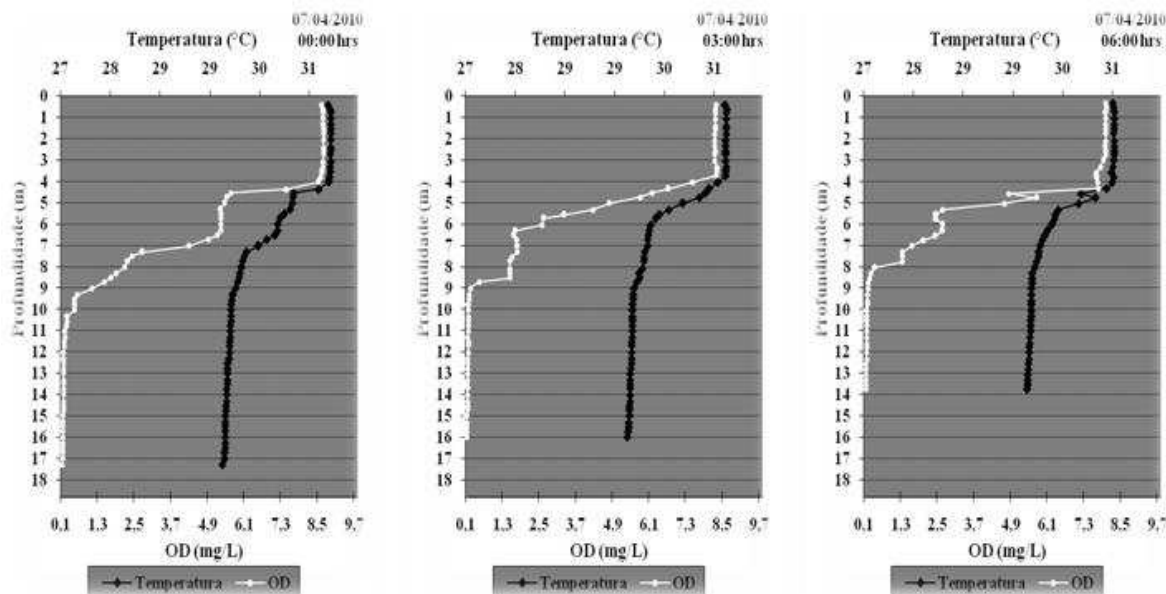


Figura 6-28. Perfis de OD e Temperatura da água do reservatório Pereira de Miranda em 7 Abr. 2010, às 00h00min, 03h00min e 06h00min.

Os valores de pH mantiveram altas correlações com a temperatura da água, no valor de 0,99, e seguiram o perfil da estratificação térmica, com uma quebra na curva próximo aos 5 metros de profundidade. Os valores registrados permaneceram dentro da normalidade e com uma variação pequena. Amplas variações diárias do pH são características de ambientes pouco tamponados (ESTEVES *et al.*, 1988). As Figuras 6-29, 6-30 e 6-31 apresentam os perfis de pH e salinidade da água para o mês de Abril de 2010.

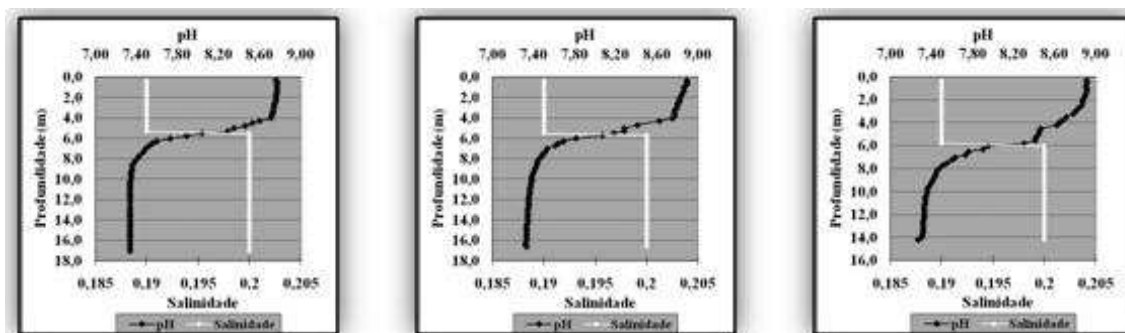


Figura 6-29. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 6 Abr. 2010, às 06h00min, 09h00min e 12h00min.

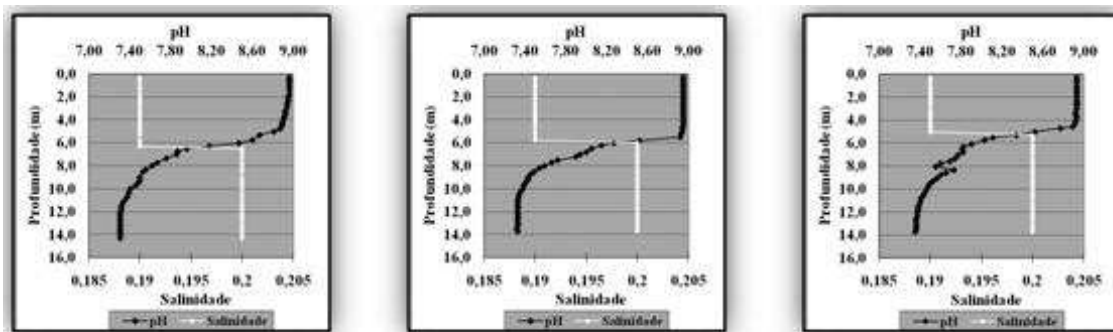


Figura 6-30. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 6 Abr. 2010, às 15h00min, 18h00min e 21h00min.

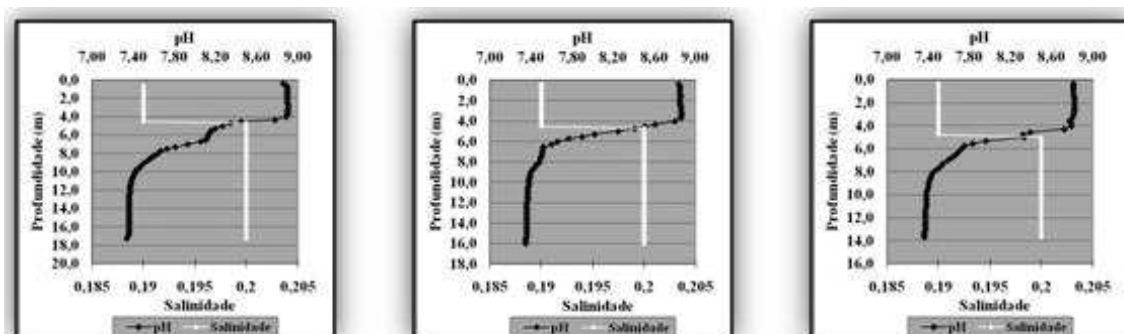


Figura 6-31. Perfis de pH e Salinidade da água do reservatório Pereira de Miranda em 7 Abr. 2010, às 00h00min, 03h00min e 06h00min.

6.1.1.2 Variáveis da qualidade da água analisadas em laboratório

Foram realizadas análises laboratoriais para alguns parâmetros qualidade da água: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Clorofila *a* (Clra), Fósforo Total (PT), Ortofosfato (Orto-P), Nitrogênio Total (NT), Amônia, Nitrito e Nitrato, Sólidos Totais (ST) e Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) e Coliformes Termotolerantes (Colif.). A tabela 6-10 apresenta a matriz de correlação entre todos estes parâmetros analisados durante o período de amostragem.

Altas correlações ocorreram entre os níveis do reservatório e a variação sazonal apresentadas pelas variáveis. A Tabela 6-11 mostra a data e hora das medições dos parâmetros de qualidade da água durante o período de amostragem.

Tabela 6-10. Coeficientes de correlação (r) entre os parâmetros de qualidade da água analisados em laboratório no período de amostragem.

	<i>SDT</i>	<i>ST</i>	<i>NT</i>	<i>PT</i>	<i>Orto-P</i>	<i>Clor. a</i>	<i>Amônia</i>	<i>Nitrito</i>	<i>Nitrato</i>	<i>DBO</i>	<i>Colif.</i>
<i>SDT</i>	1										
<i>ST</i>	0,6683	1									
<i>NT</i>	0,6107	0,7472	1								
<i>PT</i>	0,6509	0,2740	0,4307	1							
<i>Orto-P</i>	-0,4513	-0,1918	-0,5451	-0,4938	1						
<i>Clor. a</i>	-0,5561	-0,2510	-0,4347	-0,6467	0,5663	1					
<i>Amônia</i>	-0,5757	-0,4199	-0,5707	-0,3944	0,7239	0,4971	1				
<i>Nitrito</i>	-0,4932	-0,5361	-0,6480	-0,2269	0,3498	0,0164	0,5595	1			
<i>Nitrato</i>	-0,3968	-0,2082	0,1939	0,1154	-0,1883	-0,2371	-0,1123	0,0569	1		
<i>DBO</i>	-0,7707	-0,6530	-0,7335	-0,3950	0,4941	0,5137	0,7516	0,5106	0,1463	1	
<i>Colif.</i>	-0,1675	0,0904	-0,0133	-0,2148	0,0707	0,0245	-0,1583	-0,3049	0,1386	0,0577	1

A Tabela 6-12 apresenta todos os níveis calculados para os períodos em que foram realizadas as análises, e a Tabela 6-13 mostra os coeficientes de correlação calculados entre os parâmetros de qualidade da água e os níveis do reservatório. A numeração 1, 2 e 3 dos coeficientes indicam a variação sazonal (entre os meses de amostragem) e a numeração 4, 5 e 6 representa a variação diária (no período de 24 horas).

Tabela 6-11. Data e hora das medições durante o período de amostragem.

1	2	3	4	5	6
9 Dez. 2009 08:00h	9 Dez. 2009 14:00h	9 Dez. 2009 20:00h	8 Dez. 2009 08:00h	2 Mar. 2010 09:00h	6 Abr. 2010 09:00h
2 Mar. 2010 09:00h	2 Mar. 2010 15:00h	2 Mar. 2010 21:00h	8 Dez. 2009 14:00h	2 Mar. 2010 15:00h	6 Abr. 2010 15:00h
6 Abr. 2010 09:00h	6 Abr. 2010 15:00h	6 Abr. 2010 21:00h	8 Dez. 2009 20:00h	2 Mar. 2010 21:00h	6 Abr. 2010 21:00h
-	-	-	9 Dez. 2009 08:00h	3 Mar. 2010 03:00h	7 Abr. 2010 03:00h
-	-	-	9 Dez. 2009 14:00h	-	-
-	-	-	9 Dez. 2009 20:00h	-	-

Tabela 6-12. Níveis calculados (hm³) do reservatório Pereira de Miranda no período de amostragem.

1	2	3	4	5	6
282,9236	282,9236	282,9236	283,3843	248,5207	238,9450
248,5207	248,5207	248,5207	283,3843	248,5207	238,9450
238,9450	238,9450	238,9450	283,3843	248,5207	238,9450
-	-	-	282,9236	248,0991	238,1244
-	-	-	282,9236	-	-
-	-	-	282,9236	-	-

A correlação entre a variação sazonal dos sólidos dissolvidos totais e os níveis do reservatório, no horário das 09h00min, foi de -0,9385; no horário de 15h00min foi de -0,9477 e para o horário de 21h00min, foi de -0,9900. Tal correlação forte e negativa indica a influência inversamente proporcional que o volume do reservatório exerce sobre os sólidos dissolvidos. A medida que o volume foi diminuindo devido à falta de chuva, o processo de evaporação ajudou a concentrar os sólidos, indicado forte correlação. O mesmo ocorreu com os outros parâmetros, com algumas exceções.

Tabela 6-13. Coeficiente de correlação (r) entre os parâmetros de qualidade da água analisados em laboratório e os níveis do reservatório Pereira de Miranda no período de amostragem.

r - Pearson	SDT	ST	NT	PT
r ₁	-0,9385	-0,8698	-0,9930	-0,8839
r ₂	-0,9477	-0,9998	-0,9984	0,8968
r ₃	-0,9900	-0,9526	-0,9923	-0,8376
r ₄	0,5261	0,5695	0,6629	0,5922
r ₅	-0,6794	-0,1601	-0,2081	0,2540
r ₆	-0,0676	0,4651	-0,8558	-0,2807
r - Pearson	Orto-P	Clr. a	Amônia	Nitrito
r ₁	0,7822	-0,0501	0,9999	0,9783
r ₂	0,4301	0,9400	0,5480	0,6863
r ₃	0,4702	0,7986	0,9696	-0,0184
r ₄	0,6667	0,6202	0,6247	-0,1043
r ₅	-0,2511	0,1930	-0,5839	-1
r ₆	0,5222	-0,2001	0,3333	0,5556
r - Pearson	Nitrato	DBO	Coliformes	
r ₁	0,1121	0,9849	-0,5752	
r ₂	0,7822	0,9956	-1	
r ₃	-0,1389	0,9575	0,9016	
r ₄	-0,1334	0,3046	-0,6718	
r ₅	0,2143	0,6831	0,5713	
r ₆	-0,9812	-0,1951	0,8838	

O fósforo total, por exemplo, apresentou uma correlação sazonal forte e positiva no horário das 15h00min. Isto se deve em parte pelo fósforo apresentar um ciclo complexo e que não depende apenas do volume do reservatório. Parte do fósforo disponível na coluna da água está preso e fazendo parte dos organismos vivos, e outra parte é constantemente mineralizada e utilizada pelos seres produtores.

As correlações seguintes, que dizem respeito às variações diárias entre os parâmetros de qualidade da água e os níveis do reservatório, não puderam ser interpretadas assim como foram as sazonais, dado a pequena ou inexistente variação no nível do reservatório na escala de tempo de um dia.

6.1.1.2.1 Análise das componentes principais

A primeira componente principal extraída representa uma combinação linear com variância máxima existente entre os dados originais. Já a segunda componente principal representa uma combinação linear com a máxima variância remanescente e assim sucessivamente, até a componente final. Componentes sucessivas explicam porções progressivamente menores da variância da amostra total, sem apresentar correlação com as componentes anteriores (ANDRADE *et al.*, 2007). As componentes expressam a relação entre fatores e as variáveis e permitem uma identificação das variáveis com maiores inter-relações em cada componente. Os valores dos pesos fatoriais sugerem uma significação das variáveis em cada fator. A Tabela 6-14 apresenta os pesos fatoriais das variáveis e a variância acumulada explicada pelas componentes geradas.

Tabela 6-14. Peso fatorial das variáveis nas componentes principais geradas.

Variáveis	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. 4	Comp. 5	Comp. 6	Comp. 7	Comp. 8	Comp. 9	Comp. 10	Comp. 11
SSD	-0,379	0,169	-0,294	0,243		0,101			-0,253	-0,683	-0,358
ST	-0,312	0,371		-0,141	-0,434	-0,204	-0,301	-0,556	-0,117	0,255	-0,190
NT	-0,374		0,149	-0,396	-0,286		-0,216	0,299	0,253	-0,321	0,542
PT	-0,288	-0,299	-0,222	0,281	-0,281	0,590	0,217	-0,256	0,334	0,180	0,124
ORTO	0,311	0,331		0,104	-0,504	-0,122	0,613		-0,210		0,298
CLOR	0,288	0,420	0,115	-0,363	0,206	0,350	0,159	-0,338	0,419	-0,303	-0,154
AMONIA	0,358		-0,207		-0,463	0,195	-0,333	0,482	0,215	0,125	-0,404
NITRI	0,281	-0,330	-0,387		-0,125	-0,503	-0,120	-0,322	0,378	-0,341	
NITRA		-0,550	0,465	-0,330	-0,321		0,253		-0,128	-0,180	-0,385
DBO	0,386	-0,128				0,404	-0,445	-0,260	-0,487	-0,236	0,309
COLIF		0,144	0,643	0,647	-0,101		-0,153		0,291	-0,137	
Variância acumulada	0,468	0,619	0,747	0,823	0,890	0,940	0,965	0,983	0,993	0,997	1,000

Pode-se notar pelos valores dos pesos que existe uma paridade relacional entre as variáveis de qualidade da água. Na primeira componente os valores encontrados expressam certa igualdade entre as variáveis, identificando todos os parâmetros como relevante ao processo qualitativo da água. Na Figura 6-32 nota-se que todas as variáveis são decisivas na qualidade da água, sendo necessárias pelo menos as cinco primeiras componentes para explicar a variabilidade dos parâmetros (Figura 6-33). Este fato impede a diminuição de variáveis, visto que até o quinto componente todas as variáveis já foram correlacionadas.

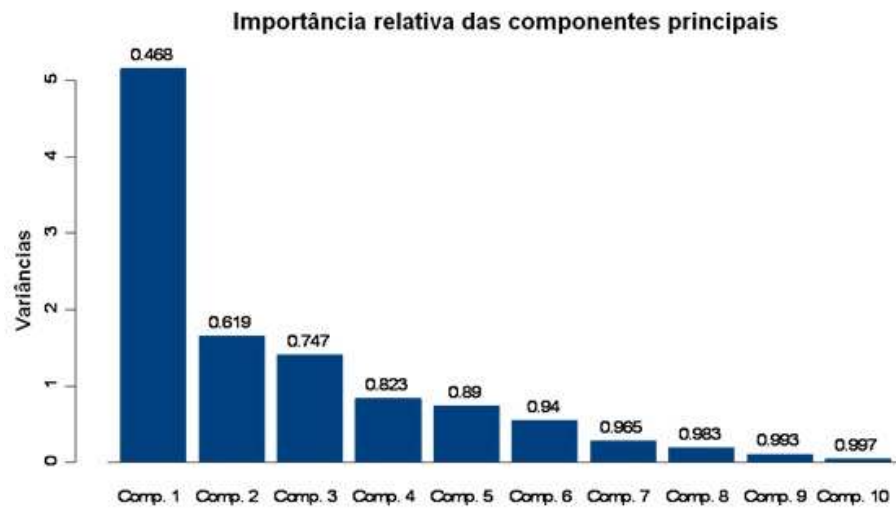


Figura 6-32. Gráfico com as variâncias calculadas para as componentes principais

A análise das componentes principais mostrou a importância numérica de todos os parâmetros de qualidade da água, onde ficou claro que uma redução no número de parâmetros amostrados (objetivo da PCA) não deve ser praticada.

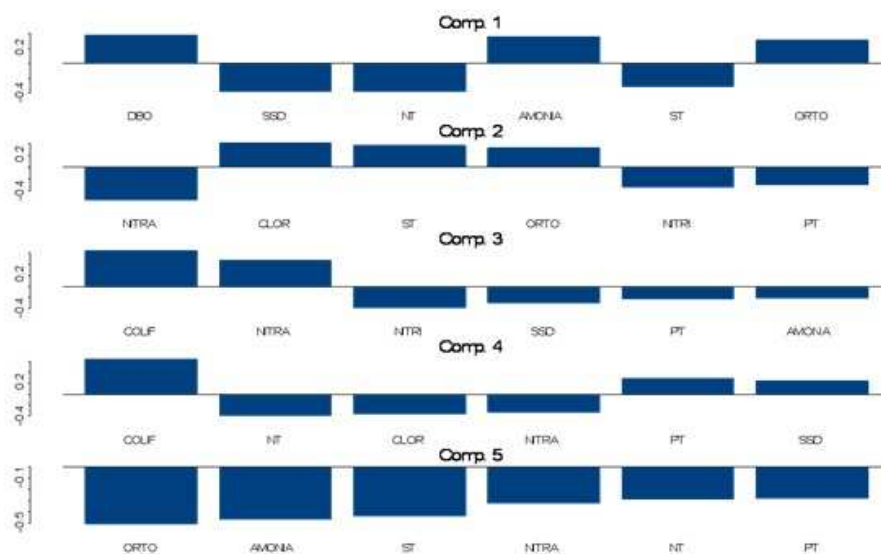


Figura 6-33. Variáveis em cada componente principal calculada.

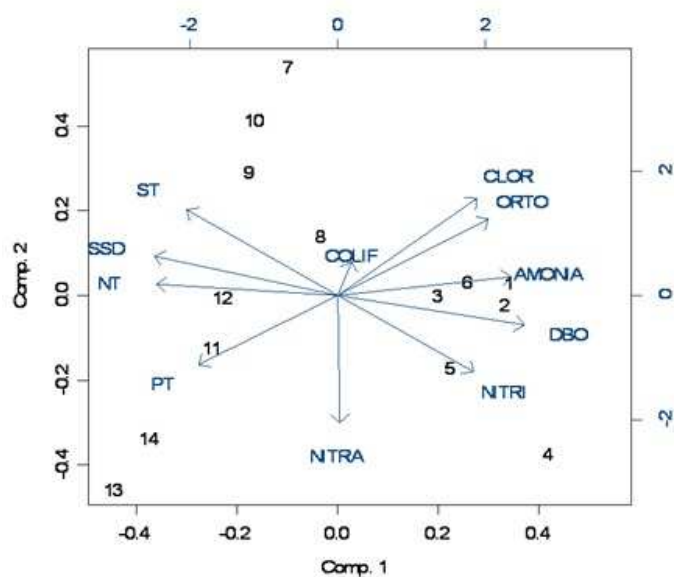


Figura 6-34. Gráfico Biplot gerado para as duas primeiras componentes principais

A decisão em monitorar parâmetros específicos da qualidade da água passa pela definição das variáveis mais significativas para determinado problema ambiental. A Análise das Componentes Principais reúne em componentes as principais variáveis através da correlação significativa existente entre as muitas variáveis, e com isso, ajuda na redução e na otimização dos sistemas de monitoramento.

6.1.1.3 Sólidos Totais e Sólidos Dissolvidos Totais

Em todo o Estado do Ceará os reservatórios sofrem com a elevada taxa de evaporação e os baixos índices pluviométricos que contribuem para o aumento da concentração das partículas presentes, principalmente em determinadas épocas do ano. Este processo acaba comprometendo a qualidade da água dos reservatórios, acarretando em fenômenos eutrofizantes e indícios de salinização. A Tabela 6-15 apresenta os dados descritivos básicos para os valores medidos de Sólidos Totais.

O valor mínimo registrado foi de 227 mg L⁻¹ em Dezembro de 2009 e o máximo foi de 249 mg L⁻¹, em Abril de 2010.

Tabela 6-15. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para os Sólidos Totais.

Sólidos Totais (mg L⁻¹)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	227	245	236,50	6,09	2,57
Janeiro	-	-	-	-	-
Março	246,8	248,3	247,65	0,625	0,25
Abril	241,7	249	244,88	3,40	1,39

De acordo com as correlações com o nível do reservatório, pode-se afirmar que os Sólidos Totais estão concentrando ao longo do tempo, em concordância com a diminuição do volume total armazenado. A Tabela 6-16 apresenta os valores descritivos básicos para os Sólidos Dissolvidos Totais.

Tabela 6-16. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para os Sólidos Dissolvidos Totais.

Sólidos Dissolvidos Totais (mg L⁻¹)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	208	215	211,5	2,43	1,15
Janeiro	-	-	-	-	-
Março	215,80	244,20	232,10	11,87	5,15
Abril	221,80	244,00	232,57	9,13	3,93

O valor mínimo registrado foi de 208,0 mg L⁻¹ em Dezembro de 2009 e o máximo foi de 244,2 mg L⁻¹, em Março de 2010. De acordo com as correlações com o nível do reservatório e os valores médios encontrados, pode-se afirmar que os Sólidos Totais estão concentrando ao longo do tempo. A Figura 6-35 mostra os gráficos da variabilidade diária em Dezembro de 2009 e Março de 2010; a Figura 6-36 mostra os gráficos da variação diária em Abril de 2010 e sua variação sazonal e Figura 6-37 apresentam os gráficos para a variação sazonal para os Sólidos Dissolvidos Totais e os Sólidos Totais.

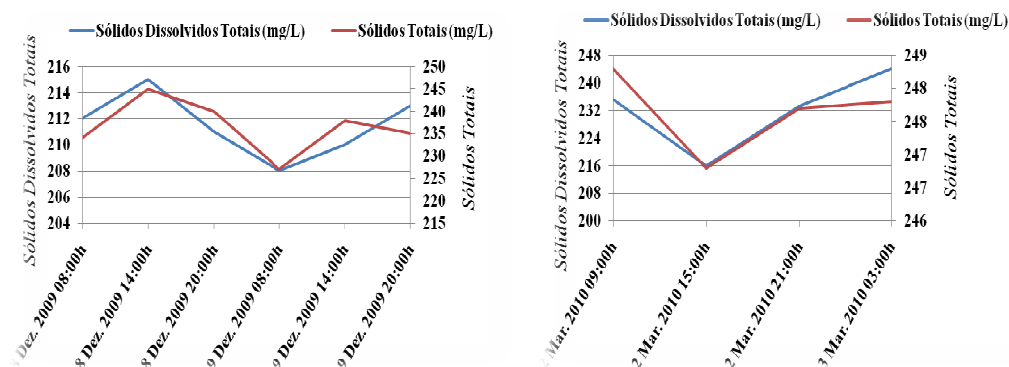


Figura 6-35. Variação diária (8 e 9 Dez. 2009; 2 e 3 Mar. 2010) para os Sólidos Dissolvidos Totais e os Sólidos Totais.

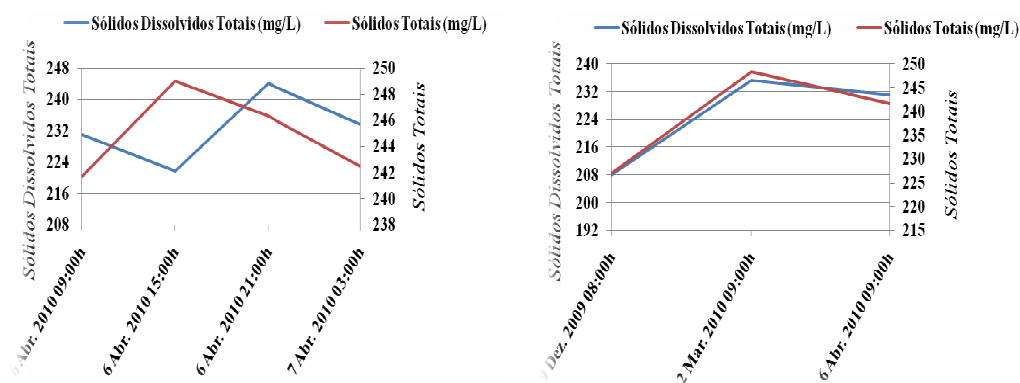


Figura 6-36. Variação diária (6 e 7 Abr. 2010) e sazonal (entre meses às 9h00min) para os Sólidos Dissolvidos Totais e os Sólidos Totais.

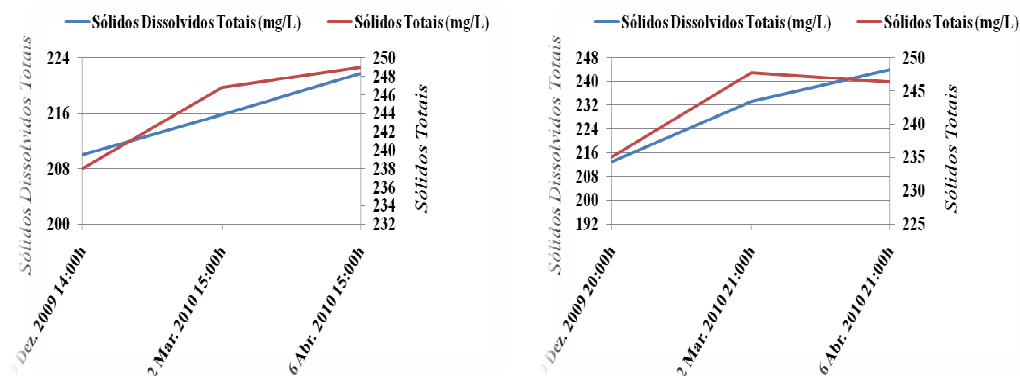


Figura 6-37. Variação sazonal (entre meses às 15h00min e 21h00min) para os Sólidos Dissolvidos Totais e os Sólidos Totais.

6.1.1.4 Nitrogênio Total e Fósforo Total

O Nitrogênio Total e o Fósforo Total atuam como os principais fatores limitantes na produção primária dos ecossistemas aquáticos, podendo conduzir a eutrofização, que gera modificações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do meio, com perdas da produtividade e na biodiversidade. Existe uma grande dúvida quanto ao papel do nutriente limitante no meio científico. Alguns limnologistas chamam a atenção para o fato de o Nitrogênio apenas determinar qual grupo algal de desenvolverá mais. Portanto, para a grande maioria, o nutriente que realmente limita o crescimento e a produtividade primária em ambientes aquáticos é o fósforo (WETZEL, 1983). A Tabela 6-17 apresenta os dados descritivos básicos para o Nitrogênio Total.

Tabela 6-17. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para o Nitrogênio Total.

Nitrogênio Total (mg N/L)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	0,58	1,13	0,9265	0,1942	20,9568
Janeiro	-	-	-	-	-
Março	1,09	1,45	1,3025	0,1522	11,6836
Abril	1,34	1,75	1,5015	0,1936	12,8929

O valor mínimo de Nitrogênio Total registrado foi de 0,58 mg N/L, em Dezembro de 2009, e o valor máximo encontrado foi de 1,75 mg N/L, em Abril de 2010. Os valores indicam a concentração do Nitrogênio ao longo dos meses, fato comprovado pelos coeficientes de correlação com os níveis do reservatório. A Tabela 6-18 apresenta os dados descritivos básicos para o Fósforo Total.

Tabela 6-18. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para o Fósforo Total.

Fósforo Total (mg P/L)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	0,0690	0,1380	0,0957	0,0234	24,4936
Janeiro	-	-	-	-	-
Março	0,0950	0,1350	0,1145	0,0171	14,8984
Abril	0,0900	0,2600	0,1675	0,0772	46,0837

O valor mínimo de Fósforo Total registrado foi de 0,0690 mg P/L, em Dezembro de 2009, e o valor máximo encontrado foi de 0,2600 mg P/L, em Abril de 2010. Os valores

indicam a concentração do Fósforo Total ao longo dos meses, fato comprovado pelos coeficientes de correlação com os níveis do reservatório.

A Figura 6-38 apresenta a variação diária do Nitrogênio Total e do Fósforo Total em Dezembro de 2009 e Março de 2010. A Figura 6-39 mostra a variação diária destes parâmetros em Abril de 2010 e sua variabilidade sazonal no período da manhã. Na Figura 6-40, a variabilidade sazonal nos períodos da tarde e da noite.

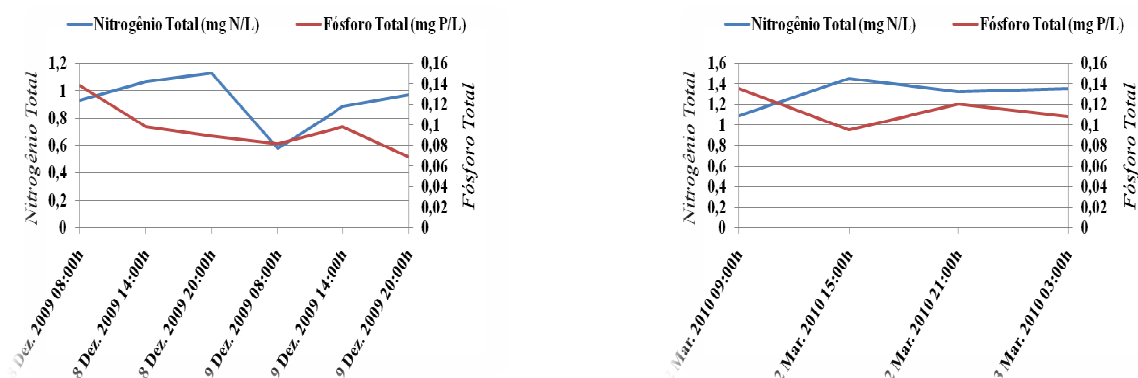


Figura 6-38. Variação diária (8 e 9 Dez. 2009; 2 e 3 Mar. 2010) para o Nitrogênio Total e o Fósforo Total.

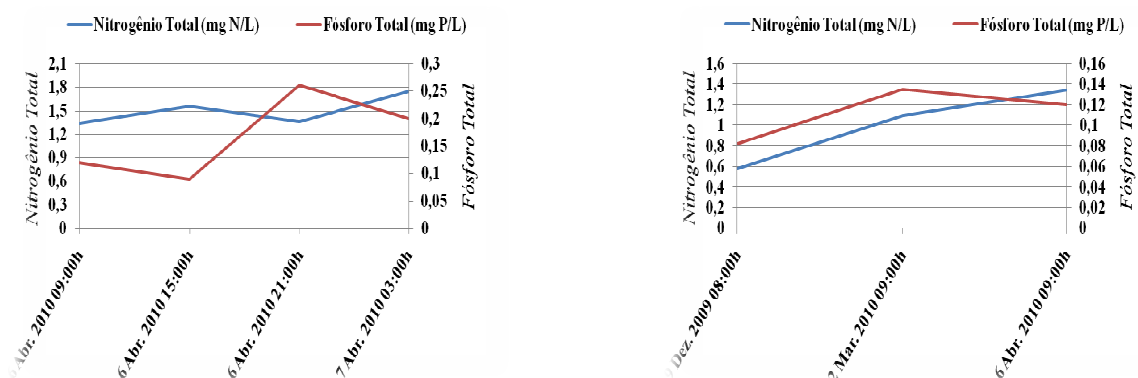


Figura 6-39. Variação diária (6 e 7 Abr. 2010) e sazonal (entre meses às 9h00min) para o Nitrogênio Total e o Fósforo Total.

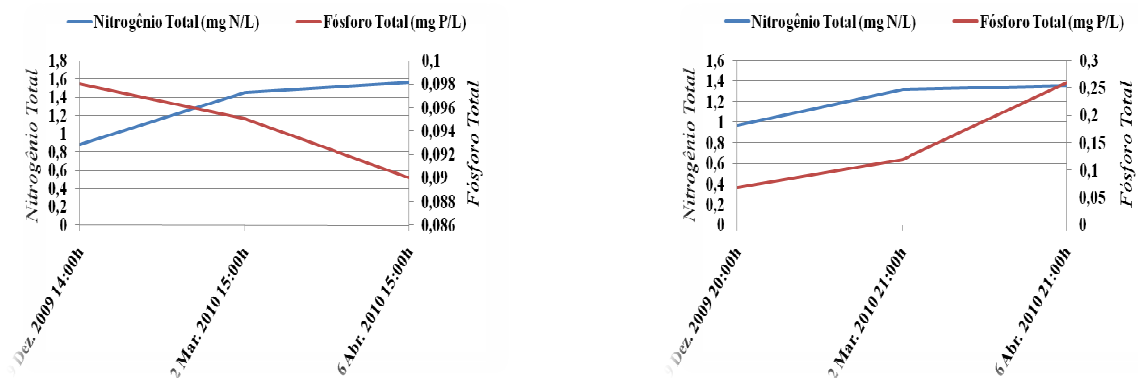


Figura 6-40. Variação sazonal (entre meses às 15h00min e 21h00min) para o Nitrogênio Total e o Fósforo Total.

6.1.1.5 Ortofosfato e Clorofila *a*

Os valores quantificados de Ortofosfato e Clorofila *a* apresentaram uma correlação média positiva de 0,5663. As algas retiram o ortofosfato diretamente da coluna d'água, fato que implica em uma clara relação entre os dois parâmetros. A Clorofila *a* é extensamente utilizada como preditor da biomassa fitoplanctônica, mas tal utilização deve ser realizada com cautela. Sabe-se que a concentração de Clorofila *a* varia com o tamanho da célula algal, e que células menores tendem a apresentar quantidade proporcional maior de Clorofila *a*. Kasprzaka *et al.* (2008) demonstraram que a proporção de Clorofila *a* pode decrescer significativamente com um incremento na biomassa fitoplanctônica.

O valor mínimo de Ortofosfato observado foi de 0,01 mg N/L, em Dezembro de 2009, e o valor máximo encontrado foi de 0,0340 mg N/L, em Dezembro e Março de 2010 (Tabela 6-19).

Tabela 6-19. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para o Ortofosfato.

Ortofosfato (mg PO₄³⁻/L)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	0,0210	0,0340	0,0280	0,0044	15,6492
Janeiro	-	-	-	-	-
Março	0,0240	0,0340	0,0283	0,0046	16,4453
Abril	0,0100	0,0120	0,0108	0,0010	8,9063

Para a Clorofila *a* o valor mínimo observado foi de 5,6 µg L⁻¹, em Abril de 2010, e o valor máximo foi de 15,5 µg L⁻¹, em Março de 2010 (Tabela 6-20).

Tabela 6-20. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para a Clorofila *a*.

Clorofila <i>a</i> (µg L⁻¹)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	12	16	13,83	1,47	10,64
Janeiro	-	-	-	-	-
Março	11,5	15,5	12,82	1,81	14,14
Abril	5,6	12,3	9,82	2,92	29,68

A Figura 6-41 apresenta a variação diária da Clorofila *a* e do Ortofosfato em Dezembro de 2009 e Março de 2010. Na Figura 6-42, a variação diária destes parâmetros em

Abril de 2010 e a variabilidade sazonal no início da manhã. Na Figura 6-43, a variabilidade sazonal nos períodos da tarde e da noite.

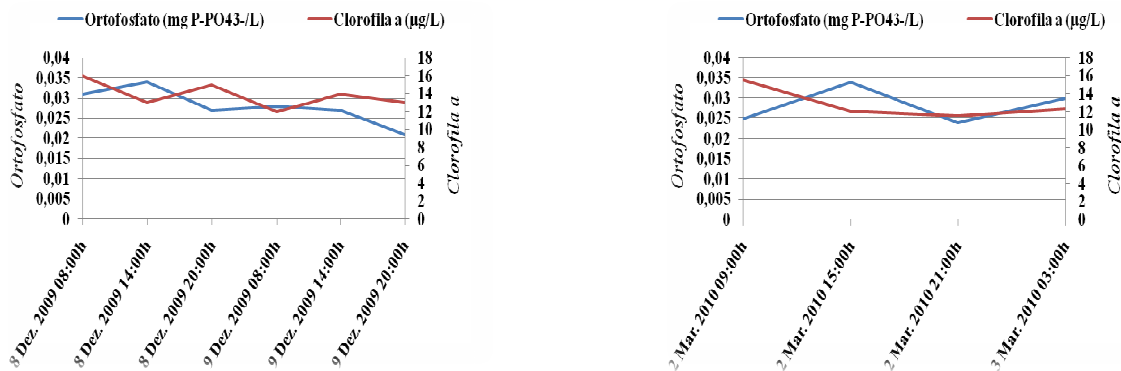


Figura 6-41. Variação diária (8 e 9 Dez. 2009; 2 e 3 Mar. 2010) para o ortofosfato e a clorofila *a*.

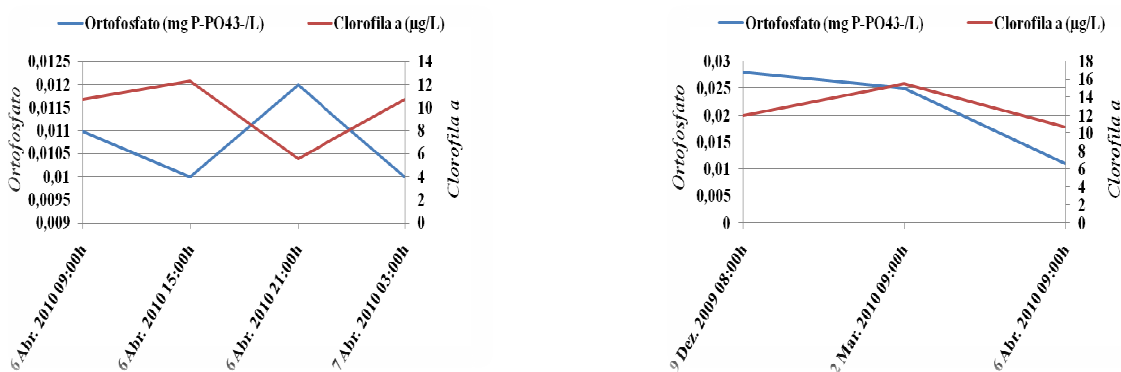


Figura 6-42. Variação diária (6 e 7 Abr. 2010) e sazonal (entre meses às 9h00min) para o ortofosfato e a clorofila *a*.

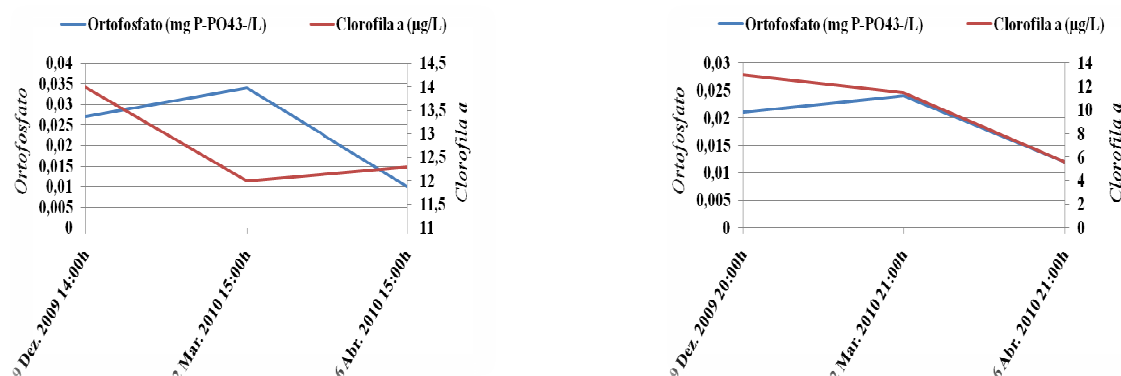


Figura 6-43. Variação sazonal (entre meses às 15h00min e 21h00min) para o ortofosfato e a clorofila *a*.

6.1.1.6 Nitrogênio Amoniacal

A amônia ou nitrogênio amoniacal é tóxico para os peixes mesmo em baixas concentrações na água. Em sistemas com grande fluxo de água, a retirada desses compostos é efetuada rapidamente, impedindo que os níveis aumentem (MARTINEZ, 2006). Em reservatórios, esses compostos tendem a se acumular, produzindo às vezes grandes malefícios aos biota aquáticos. Durante o período de amostragem a concentração de nitrogênio amoniacal na água superficial do reservatório Pereira de Miranda variou de 0,098 a 0,562 mg L⁻¹ (Tabela 6-21). A resolução 357 do CONAMA limita as concentrações máximas para as águas doces classe 1 em 3,7mg L⁻¹ N, para pH menor ou igual a 7,5; 2,0 mg L⁻¹ N, para pH entre 7,5 e 8,0; 1,0 mg L⁻¹ N, para pH entre 8,0 e 8,5 e 0,5 mg L⁻¹N, para pH maior que 8,5.

Tabela 6-21. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para o Nitrogênio Amoniacal.

Nitrogênio Amoniacal (mg L⁻¹)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	0,210	0,562	0,3707	0,1415	38,1619
Janeiro	-	-	-	-	-
Março	0,150	0,248	0,2085	0,0451	21,6289
Abril	0,098	0,108	0,1005	0,0050	4,9751

Por ser função do pH da água, a concentração da amônia deve ser analisada juntamente aos dados de pH, que para os meses analisados, variaram entre 7,27 e 8,96. Estes dados indicam que os valores estão dentro da faixa preconizada pela referida legislação.

Pelos gráficos a seguir (Figuras 6-44, 6-45 e 6-46) nota-se a variabilidade diária e sazonal sofrida. A sazonalidade observada mostra os níveis de amônia diminuindo ao longo do tempo. Este fato pode ser associado ao aumento relativo nos valores médios de OD na superfície, indicando um processo oxidante mais efetivo. Os valores de pH tenderam a permanecer constantes, como pouca variabilidade entre os meses, o que acabou por não influenciar muito a variabilidade da amônia.

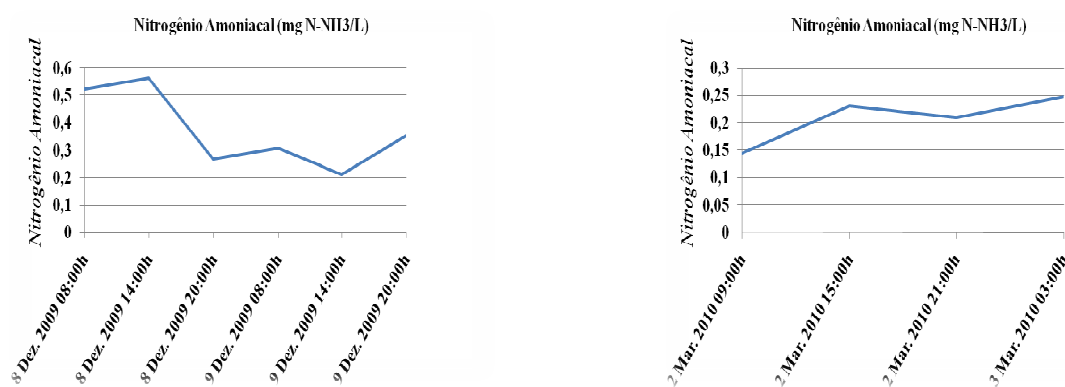


Figura 6-44. Variação diária (8 e 9 Dez. 2009; 2 e 3 Mar. 2010) para o Nitrogênio Amoniacal.

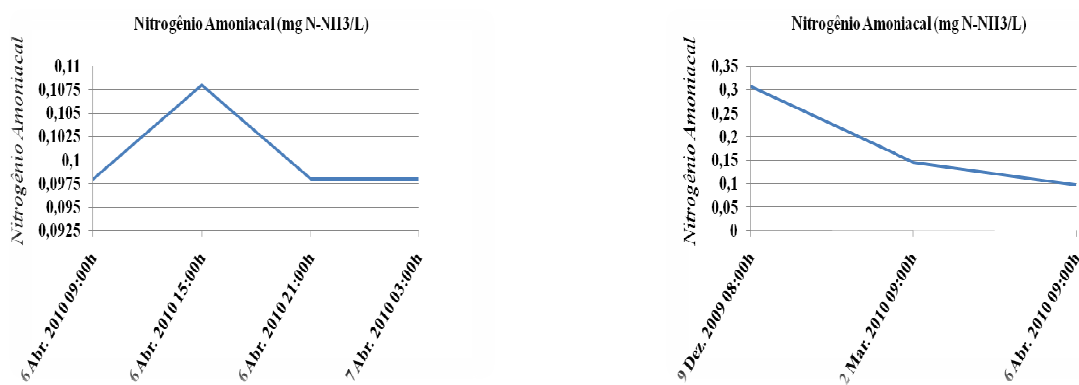


Figura 6-45. Variação diária (6 e 7 Abr. 2010) e sazonal (entre meses às 9h00min) para o Nitrogênio Amoniacal.

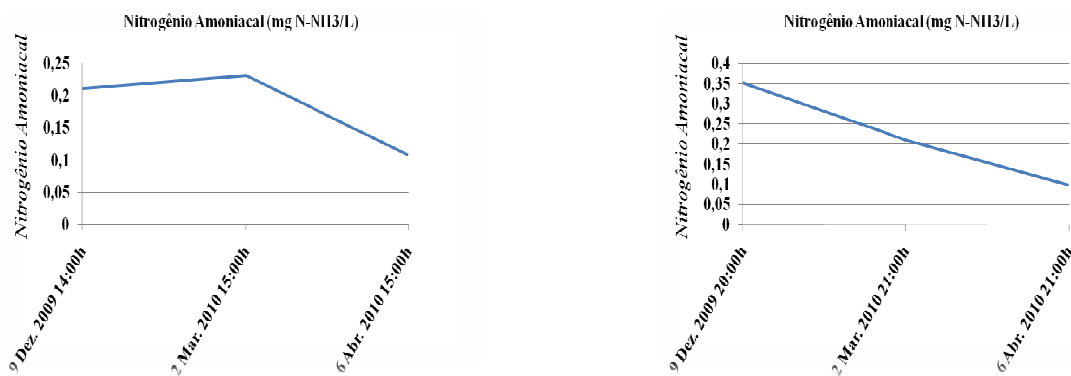


Figura 6-46. Variação sazonal (entre meses às 15h00min e 21h00min) para o Nitrogênio Amoniacal.

6.1.1.7 Nitrito e Nitrato

O Nitrito (NO_2^-) e o Nitrato (NO_3^-) são subprodutos da oxidação da amônia (NH_3) pelas bactérias aeróbias nitrificantes. Inicialmente, as bactérias do gênero *Nitrossomonas* transformam amônia a nitrito. Esse, em seguida, é convertido a nitrato pelas bactérias do gênero *Nitrobacter*. Em situações de escassez de oxigênio, esse processo pode não se completar, havendo o acúmulo de nitrito no meio, podendo ser absorvido pelos peixes.

O Nitrito reage com a hemoglobina para formar meta-hemoglobina. A meta-hemoglobina é incapaz de transportar oxigênio, e a absorção continuada de nitrito pelo peixe pode o levar à cianose. O sangue que contém quantidades apreciáveis de meta-hemoglobina é marrom. Por isso, o envenenamento de peixes por nitrito é frequentemente referido como a “doença do sangue marrom”. Peixes mais sensíveis podem ser severamente afetados por concentrações de nitrito tão baixas quanto $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ (BOYD, 1998).

Tabela 6-22. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para o Nitrito.

Nitrito (NO_2^-/L)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	0,005	0,029	0,0137	0,0105	76,8351
Janeiro	-	-	-	-	-
Março	0,002	0,003	0,0023	0,0005	22,2222
Abril	0,002	0,008	0,0045	0,0030	66,6667

Os valores registrados de Nitrato na água do reservatório Pereira de Miranda variaram entre $0,01 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$, em Março de 2010 e $0,056 \text{ mg NO}_3^-/\text{L}$, em Dezembro de 2009 (Tabela 6-23).

Tabela 6-23. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para o Nitrato.

Nitrato (NO_3^-/L)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	0,034	0,059	0,0418	0,0096	22,8992
Janeiro	-	-	-	-	-
Março	0,010	0,056	0,0265	0,0202	76,3160
Abril	0,042	0,056	0,0465	0,0065	13,8817

Muitas algas preferem absorver o íon amônio ao Nitrato, visto a necessidade de gasto energético para a sua oxidação. Porém, muitas vezes o Nitrato representa a forma mais utilizada pelos organismos produtores. Pelos gráficos das Figuras 6-47, 6-48 e 6-49 é possível

notar a variabilidade diária e sazonal sofrida pelos compostos nitrogenados ao longo das medições.

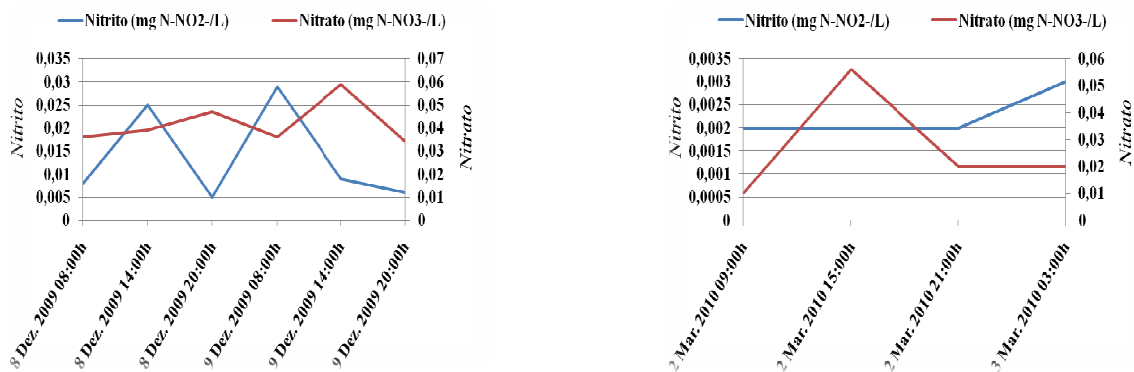


Figura 6-47. Variação diária (8 e 9 Dez. 2009; 2 e 3 Mar. 2010) para o Nitrito e o Nitrato.

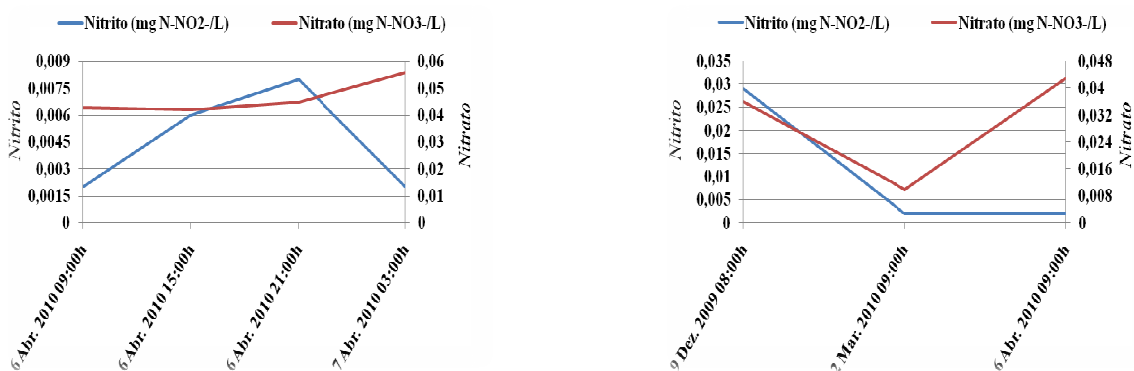


Figura 6-48. Variação diária (6 e 7 Abr. 2010) e sazonal (entre meses às 9h00min) para o Nitrito e o Nitrato.

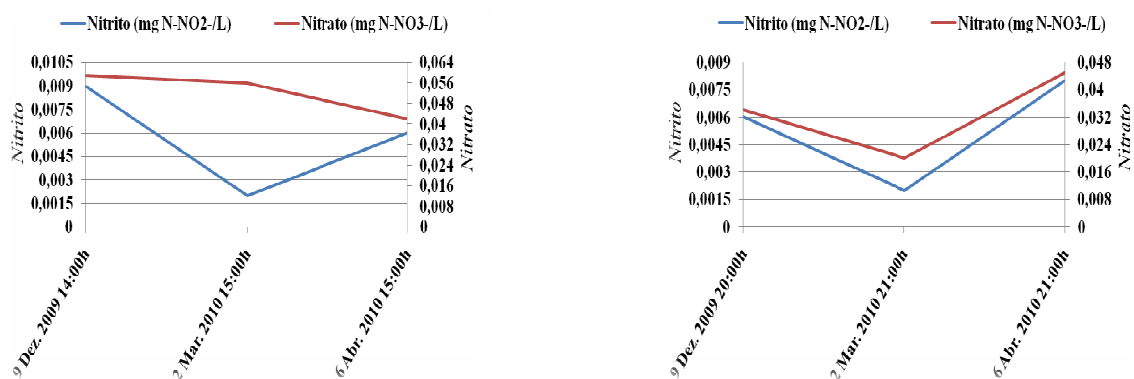


Figura 6-49. Variação sazonal (entre meses às 15h00min e 21h00min) para o Nitrito e o Nitrato.

6.1.1.8 DBO e Coliformes Termotolerantes

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é utilizada na determinação de níveis de poluição por matéria orgânica em reservatórios. A resolução CONAMA 357 restringe sua concentração em até 3 mg L⁻¹ O₂, para águas Classe 1; até 5 mg L⁻¹ O₂, para águas Classe 3 e de até 10 mg L⁻¹ O₂ para águas Classe 3. De acordo com os dados observados para a DBO da água do reservatório Pereira de Miranda, o valor mínimo registrado foi de 2,4 mg L⁻¹ O₂, em Abril de 2010 e o máximo foi de 13,2 mg L⁻¹ O₂, em Dezembro de 2009 (Tabela 6-24). Com base nestes valores, a água do reservatório variou entre as três classes de qualidade.

Tabela 6-24. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para a DBO.

DBO (mg O ₂ /L)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	9,30	13,20	11,53	1,32	11,43
Janeiro	-	-	-	-	-
Março	3	5	3,87	0,85	22,04
Abril	2,40	4,40	3,35	0,85	25,50

Os Coliformes Termotolerantes são utilizados para limitar o uso da água para a recreação de contato primário, que deverá obedecer a Resolução CONAMA N° 274. Esta resolução, de 29 de novembro 2000, determina que as águas doces, salobras e salinas destinadas à balneabilidade terão sua condição avaliada nas categorias própria ou imprópria. As águas consideradas próprias poderão ser subdivididas em categorias:

i) Excelente: quando em 80% ou mais de um conjunto de amostras obtidas em cada uma das cinco semanas anteriores, colhidas no mesmo local, houver, no máximo, 250 coliformes fecais (termotolerantes) ou 200 *Escherichia coli* ou 25 enterococos por 100 mililitros;

ii) Muito Boa: 500 coliformes fecais (termotolerantes) ou 400 *Escherichia coli* ou 50 enterococos por 100 mililitros;

iii) Satisfatória: 1.000 coliformes fecais (termotolerantes) ou 800 *Escherichia coli* ou 100 enterococos por 100 mililitros.

Os valores encontrados na superfície do reservatório Pereira de Miranda para os Coliformes Termotolerantes variaram entre 2 NMP/100ml, em Dezembro e 1600 NMP/100ml, em Dezembro de 2009 e Março de 2010 (Tabela 6-25).

Tabela 6-25. Valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação para os Coliformes Termotolerantes.

Coliformes (NMP/100ml)	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Dezembro	2	1600	421,17	679,11	161,24
Janeiro	-	-	-	-	-
Março	50	1600	672,50	726,42	108,02
Abril	30	500	270	235,16	87,10

A variação dos valores foi alta e apresentaram elevados coeficientes de variação durante as amostragens, sugerindo o enquadramento da água em imprópria para o banho (valores que excedem a categoria satisfatória). Este é um fato não muito agradável para o município de Pentecoste, visto a intensa procura pela região principalmente durante as épocas festivas. O reservatório Pereira de Miranda, além de fornecer alimento para a população local, serve como diversão, através dos balneários que recebem turistas o ano todo.

Os gráficos das Figuras 6-50, 6-51 e 6-52 apresentam a variabilidade diária e sazonal sofrida pela Demanda Bioquímica de Oxigênio e pelos Coliformes Termotolerantes durante o período de amostragem.

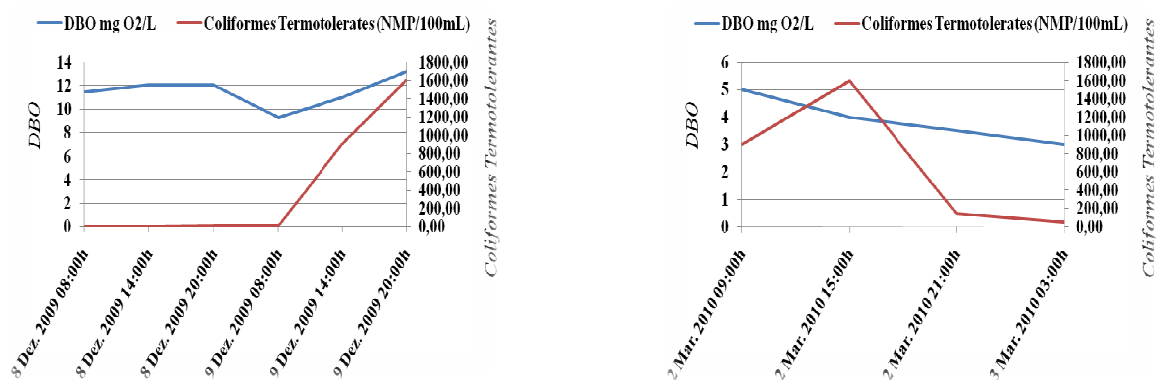


Figura 6-50. Variação diária (8 e 9 Dez. 2009; 2 e 3 Mar. 2010) para a DBO e os Coliformes Termotolerantes.

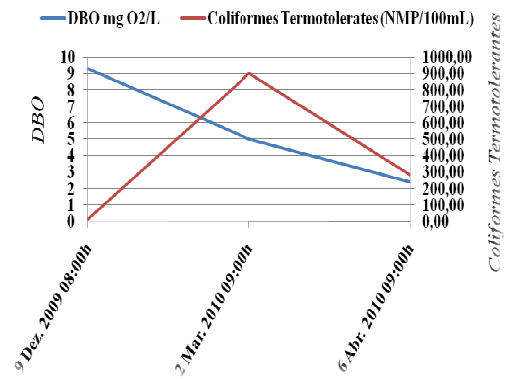
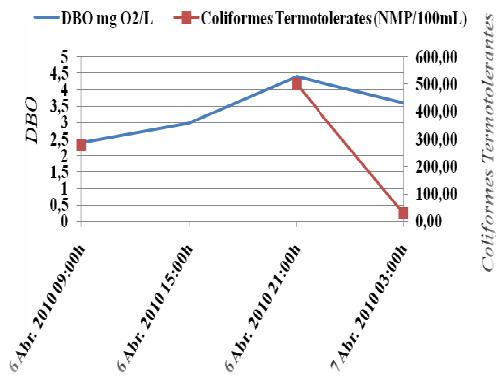


Figura 6-51. Variação diária (6 e 7 Abr. 2010) e sazonal (entre meses às 9h00min) para a DBO e os Coliformes Termotolerantes.

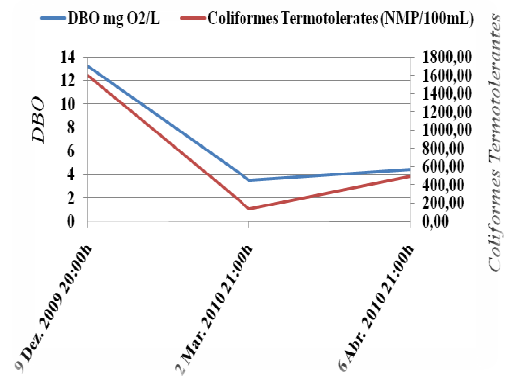
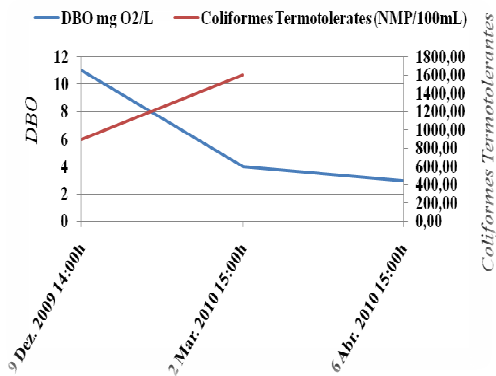


Figura 6-52. Variação sazonal (entre meses às 15h00min e 21h00min) para a DBO e os Coliformes Termotolerantes.

6.1.2 Densidade da água do reservatório Pereira de Miranda

Diferenças próximas a 2°C na temperatura da água entre a superfície e fundo de reservatórios em regiões tropicais são suficientes para produzir um gradiente de densidade capaz de induzir uma estratificação térmica. A Tabela 6-26 mostra os gradientes apresentados no reservatório Pereira de Miranda durante o período de amostragem, e uma aproximação com valores observados em regiões frias do globo.

Tabela 6-26. Comparação entre a variação da densidade da água em função apenas da temperatura.

Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Diferença(°C)	Mínimo (ρ)	Máximo (ρ)	Diferença
27,03	28,56	1,53	996,5355	996,1037	0,4318
28,24	29,65	1,41	996,1958	995,7834	0,4124
29,29	31,50	2,21	995,8903	995,2159	0,6744
29,58	31,77	2,19	995,8043	995,1306	0,6736

Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Diferença(°C)	Mínimo (ρ)	Máximo (ρ)	Diferença
6,00	11,91	5,91	999,9683	999,5363	0,4320
6,00	11,73	5,73	999,9683	999,5564	0,4119
6,00	13,85	7,85	999,9683	999,2939	0,6744
6,00	13,84	7,84	999,9683	999,2953	0,6730

Pode-se notar que diferenças de 2°C para reservatórios do semiárido brasileiro equivalem, em termos de densidade, a variações de quase 8°C, que é possível notar em regiões temperadas. As Figuras 6-53 e 6-54 mostram todas as densidades calculadas durante o período de amostragem, onde se observa as diferenças entre as camadas estratificadas.

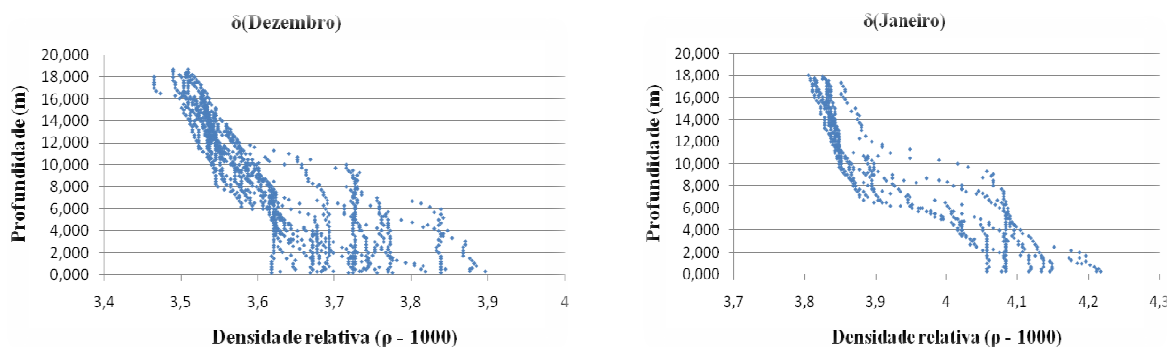


Figura 6-53. Densidades calculadas para a água do reservatório Pereira de Miranda em 8 e 9 Dez. 2009; 26 e 27 Jan. 2010.

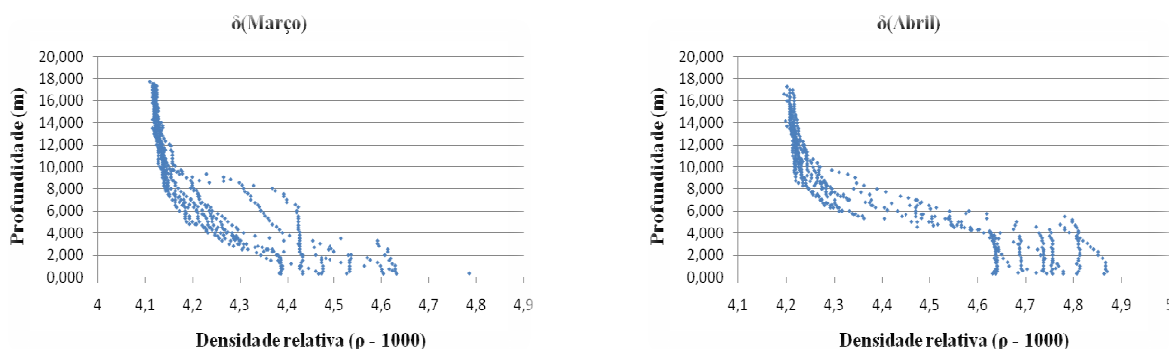


Figura 6-54. Densidades calculadas para a água do reservatório Pereira de Miranda em 2 e 3 Mar. 2010; 6 e 7 Abr. 2010.

Mesmo diferenças de apenas $0,3^{\circ}\text{C}$ em regiões quentes podem levar a separação térmica das massas de água, conhecida como micro-estratificações (HENRY *et al.*, 1997 *apud* BRANCO *et al.*, 2009).

6.1.3 Contornos de temperatura e oxigênio dissolvido

O reservatório Pereira de Miranda apresentou-se estratificado termicamente em alguns momentos. Nota-se a partir dos gráficos dos perfis verticais e dos contornos de temperatura uma clara formação de termoclinas diárias, e sua destruição ao longo do dia. A dinâmica de misturas e estratificação influencia muito a qualidade da água. Grande parte da matéria orgânica sedimenta e passa por processos de mineralização que libera nutrientes na água. Quando o reservatório encontra-se estratificado, estes nutrientes não conseguem ultrapassar a fronteira formada. A qualidade da água no hipolímnio é baixa devido à falta de oxigênio dissolvido, que prejudica as reações químicas que dele dependem, passando a prevalecer reações anaeróbias, que produzem mau cheiro e compostos tóxicos aos seres vivos que ali se encontram.

A estratificação térmica da coluna d'água influenciou os perfis de oxigênio dissolvido, que apresentaram perfis de variação próximos ao da temperatura da água (Figura 6-56). A variabilidade do perfil térmico diário do reservatório Pereira de Miranda foi uma característica marcante e pôde ser presenciada em todos os meses em que ocorreram medições. Através da Figura 6-55 pode-se observar períodos distintos de estratificação e desestratificação diário e o deslocamento da termoclina, entre 14h00min e 18h00min.

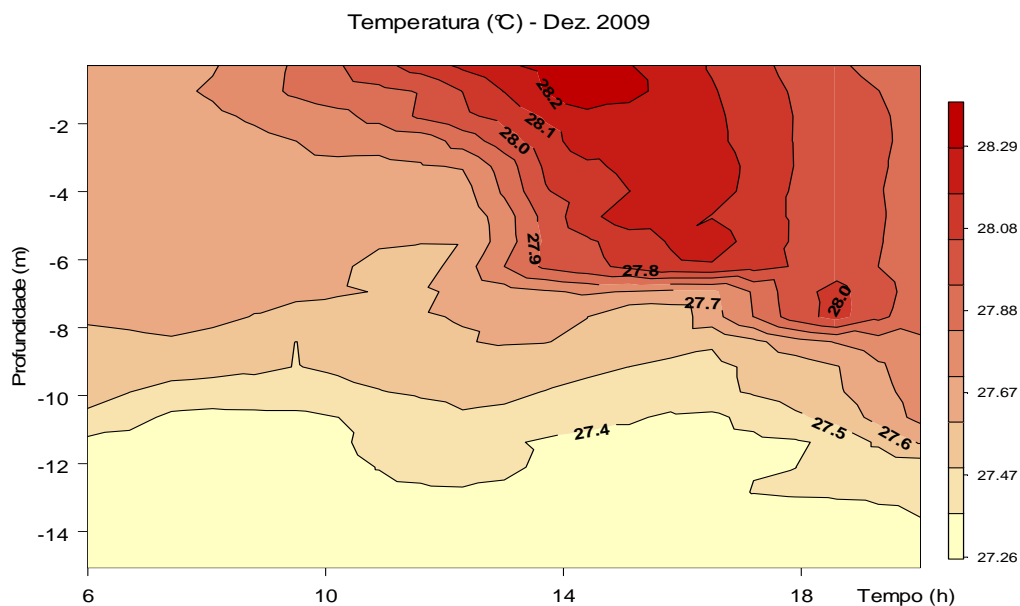


Figura 6-55. Mapa de contorno das temperaturas registradas no reservatório Pereira de Miranda, em 8 Dez. 2009.

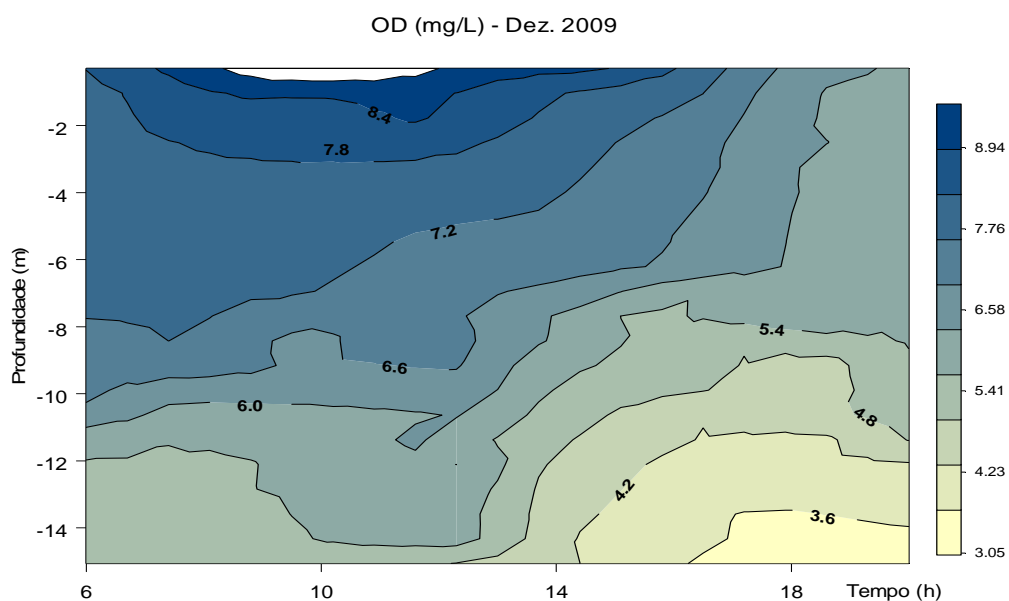


Figura 6-56. Mapa de contorno do Oxigênio Dissolvido registrado no reservatório Pereira de Miranda, em 8 Dez. 2009.

Na Figura 6-57 observa-se o deslocamento da termoclina e sua localização pode ser visualizada pelo gradiente de calor, entre as 10h00min e 15h00min. Os gráficos mostram que no mês de Dezembro de 2009 o aquecimento das camadas superiores ocorreu próximo às 14h00min, ocorrendo um atraso de umas 3 horas no mês seguinte. Os dois meses seguintes, Março e Abril de 2010, apresentaram aquecimento mais substancial novamente ocorrendo no período do início da tarde.

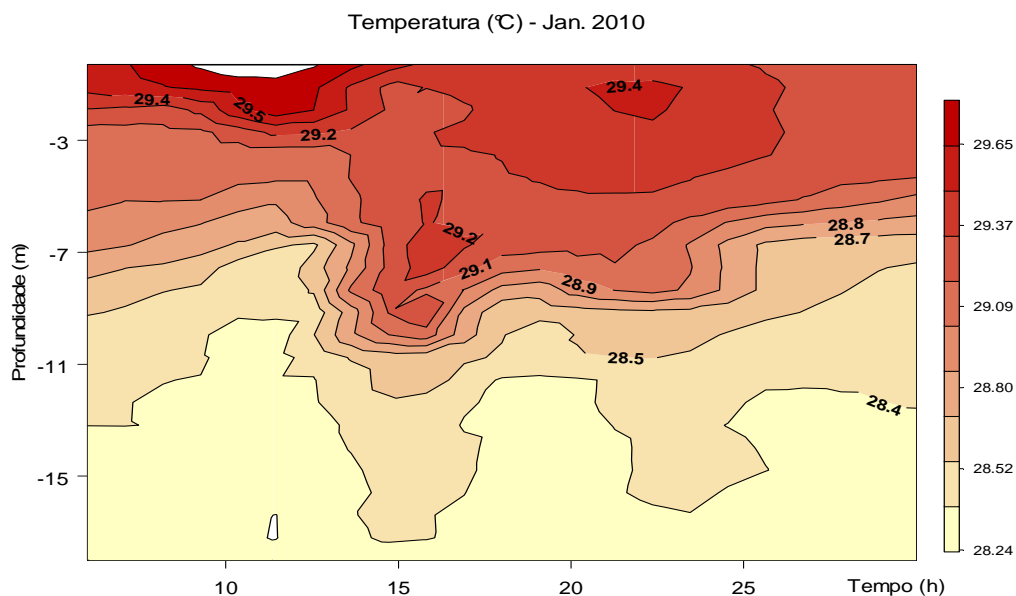


Figura 6-57. Mapa de contorno das temperaturas registradas no reservatório Pereira de Miranda, em 26 Jan. 2010.

As temperaturas atingiram seu máximo no período da manhã, e ao longo do dia ocorreu seu deslocamento, aquecendo outros compartimentos do reservatório. Na Figura 6-58 observa-se o mesmo comportamento apresentado para o oxigênio dissolvido.

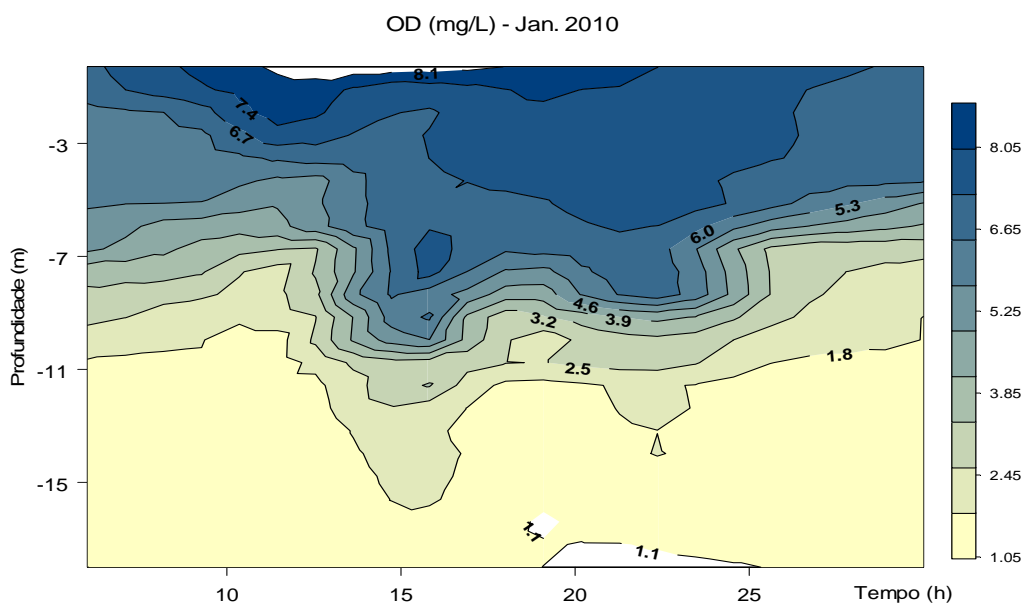


Figura 6-58. Mapa de contorno do Oxigênio Dissolvido registrado no reservatório Pereira de Miranda, em 26 Jan. 2010.

Esta variação no horário de aquecimento máximo também pode estar relacionada aos ventos que atingem o reservatório. Como foi sondado apenas um ponto, a quantificação das massas d'água que vem de outro ponto lateralmente ao medido é impossibilitada, sobrando apenas hipóteses relativas à temperatura da água e à dinâmica dos ventos.

No mês de Março (Figura 6-59) observou-se um primeiro aquecimento às 15h00min, período diurno, e um segundo aquecimento às 21h00min, no período noturno. Este segundo aquecimento pode ser explicado pelas correntes aquáticas, que trouxeram águas aquecidas de outros pontos do reservatório, visto a ausência de radiação solar neste horário.

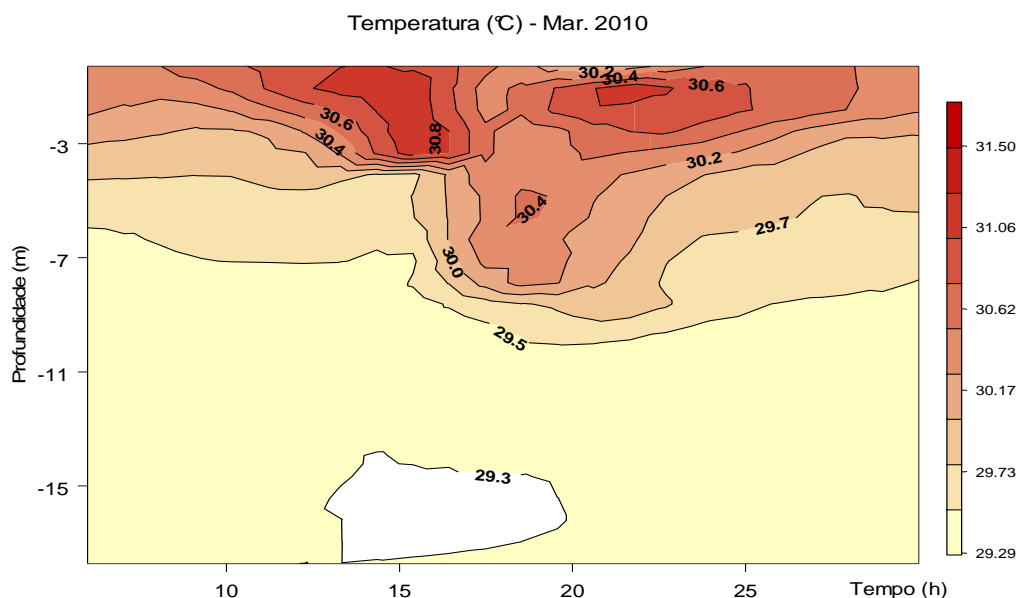


Figura 6-59. Mapa de contorno das temperaturas registradas no reservatório Pereira de Miranda, em 3 Mar. 2010.

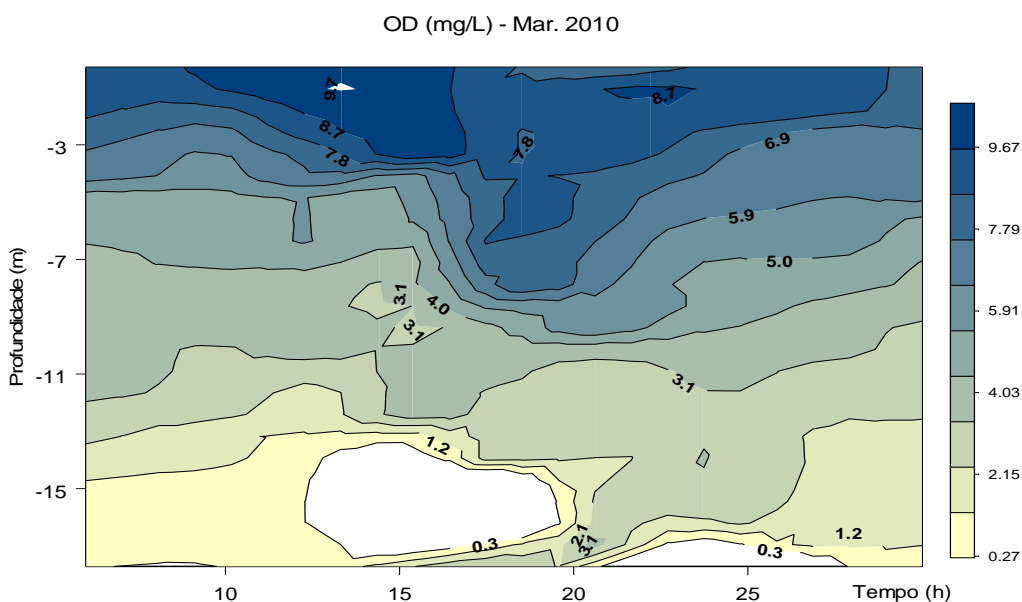


Figura 6-60. Mapa de contorno do Oxigênio Dissolvido registrado no Reservatório Pereira de Miranda, em 3 Mar. 2010.

Outra importante observação foi a marcante estratificação às 15h00min, horário onde prevaleceu o aquecimento das massas d'água e a posterior quebra da estratificação, promovida pelos fortes ventos do final da tarde. Com exceção do mês de Abril de 2010

(Figura 6-61), onde se observou um comportamento mais estável das camadas e uma pequena estratificação formada no início da noite, as outras isolinhas mostraram estratificações formadas durante o dia e a noite uma tendência à homogeneização das camadas.

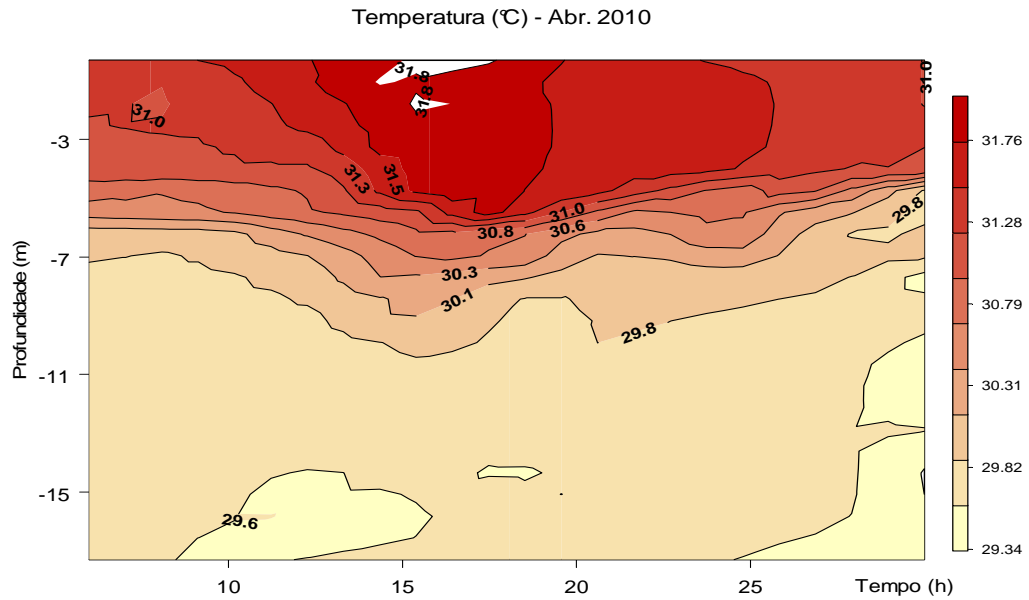


Figura 6-61. Mapa de contorno das temperaturas registradas no Reservatório Pereira de Miranda, em 6 Abr. 2010.

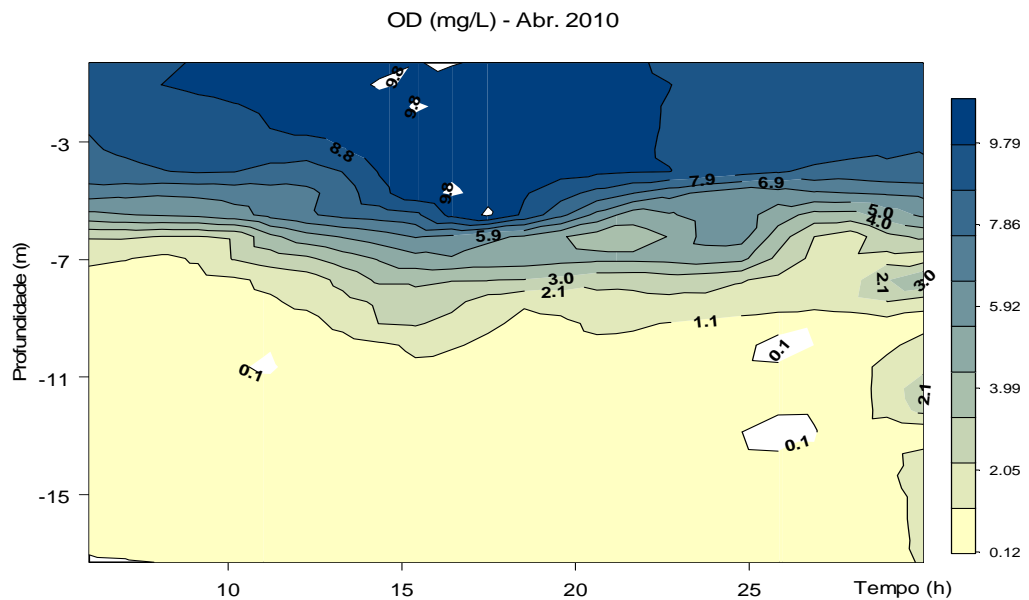


Figura 6-62. Mapa de contorno do Oxigênio Dissolvido registrado no Reservatório Pereira de Miranda, em 6 Abr. 2010.

6.1.4 Balanço térmico

Neste modelo unidirecional adotado considerou-se apenas a transferência vertical de calor, em função do aquecimento das camadas superficiais. Mas sabe-se que na realidade os processos de trocas caloríficas ocorrem em todos os sentidos, e isso pôde ser notado com os valores negativos encontrados.

Pontos específicos no reservatório possuem uma tendência em aquecer mais rapidamente e atingir maiores temperaturas. Por exemplo, as margens e a parede da barragem aquecem mais do que a água e esta energia é transferida, deixando alguns pontos do açude com valores térmicos mais elevados. Como consequência direta, correntes convectivas são formadas e são forçadas pela força dos ventos, distribuindo-se em todo o reservatório e criando dinâmicas particulares para cada corpo d'água. Camadas misturadas teoricamente possuem a mesma quantidade de calor, e por isso, não existe fluxo. Fluxos de calor ocorrem mostrando onde está a termoclina e o limite entre as zonas de diferentes densidades.

Os gráficos indicam a transferência térmica no sentido superfície-fundo e valores negativos, como o valor mínimo para o mês de março significam ganho de calor pela camada mais abaixo, promovida por correntes laterais. Na Figura 6-63 observa-se o gráfico gerado pelo software MATLAB[®], mostrando os contornos de temperaturas, a variação da energia calorífica por camada no tempo e o fluxo vertical do calor entre as camadas.

Os gradientes térmicos no epilímnio do reservatório Pereira de Miranda foram evidentes em alguns momentos. Na Figura 6-63 pode-se notar a formação da termoclina próximo aos seis metros de profundidade, às 14h00min. O hipolímnio permaneceu com trocas menos intensas e limitadas devido ao bloqueio formado pela termoclina. No último gráfico da série da Figura 6-63 é possível observar um fluxo de calor notável às 14h00min e outro às 18h00min. O primeiro aquecimento foi proporcionado pela radiação solar intensa deste horário. No segundo momento, o fluxo localizado próximo aos seis metros de profundidade indica o deslocamento da termoclina e o leve aumento da camada misturada, o epilímnio.

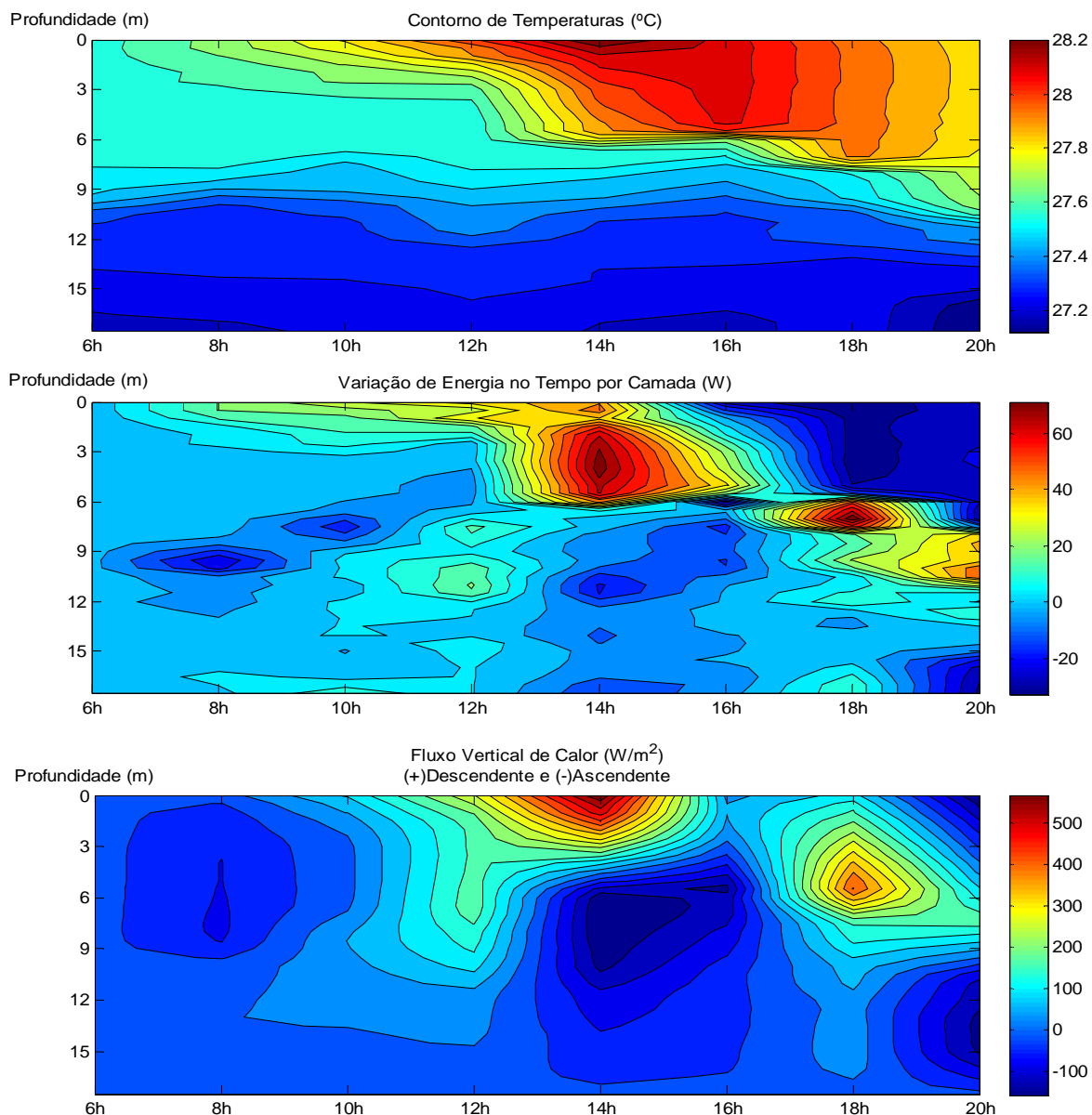


Figura 6-63. Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais de calor em 8 Dez. 2009, utilizando modelo em MATLAB®.

Na Figura 6-64 nota-se que o maior aquecimento do reservatório ocorreu durante o período da manhã, com o deslocamento da termoclina em função provavelmente dos fortes ventos. No segundo gráfico da série da Figura 6-64 nota-se que a variação de temperatura foi mais efetiva às 15h00min, com um aquecimento localizado entre seis e doze metros de profundidade, em função da transferência de calor da camada superficial. No último gráfico desta série observa-se o fluxo positivo (no sentido superfície-fundo) ocorrendo às 15h00min e um resfriamento da coluna d'água às 18h00min.

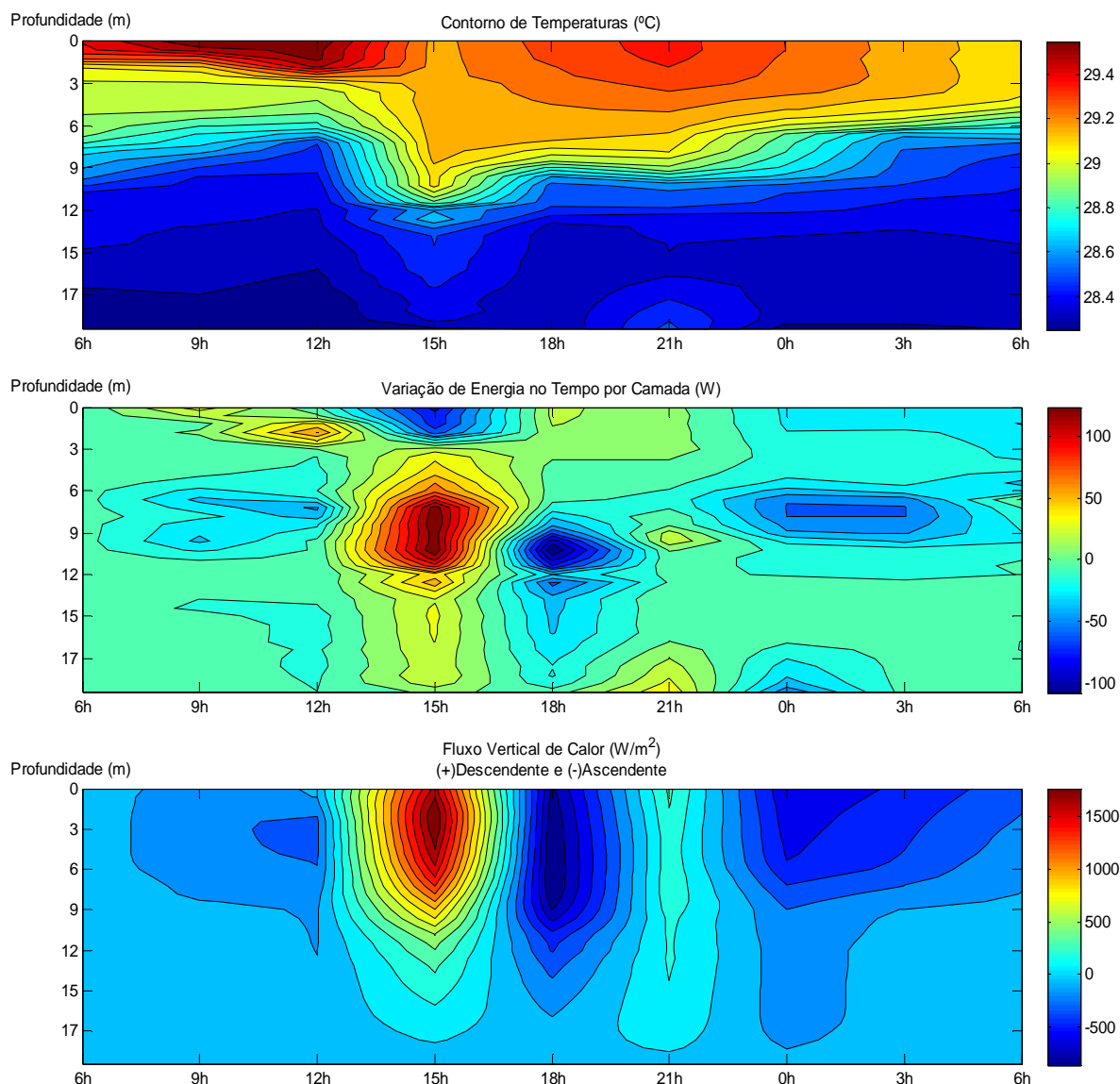


Figura 6-64. Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais de calor em 26 Jan. 2010, utilizando modelo em MATLAB®.

Os ciclos diurnos de estratificação estão ligados ao balanço de energia do reservatório. No período de análise não houve 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 de diurno/noturno compatível com a estratificação e com a mistura no final do período diurno (Figura 6-65). 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.

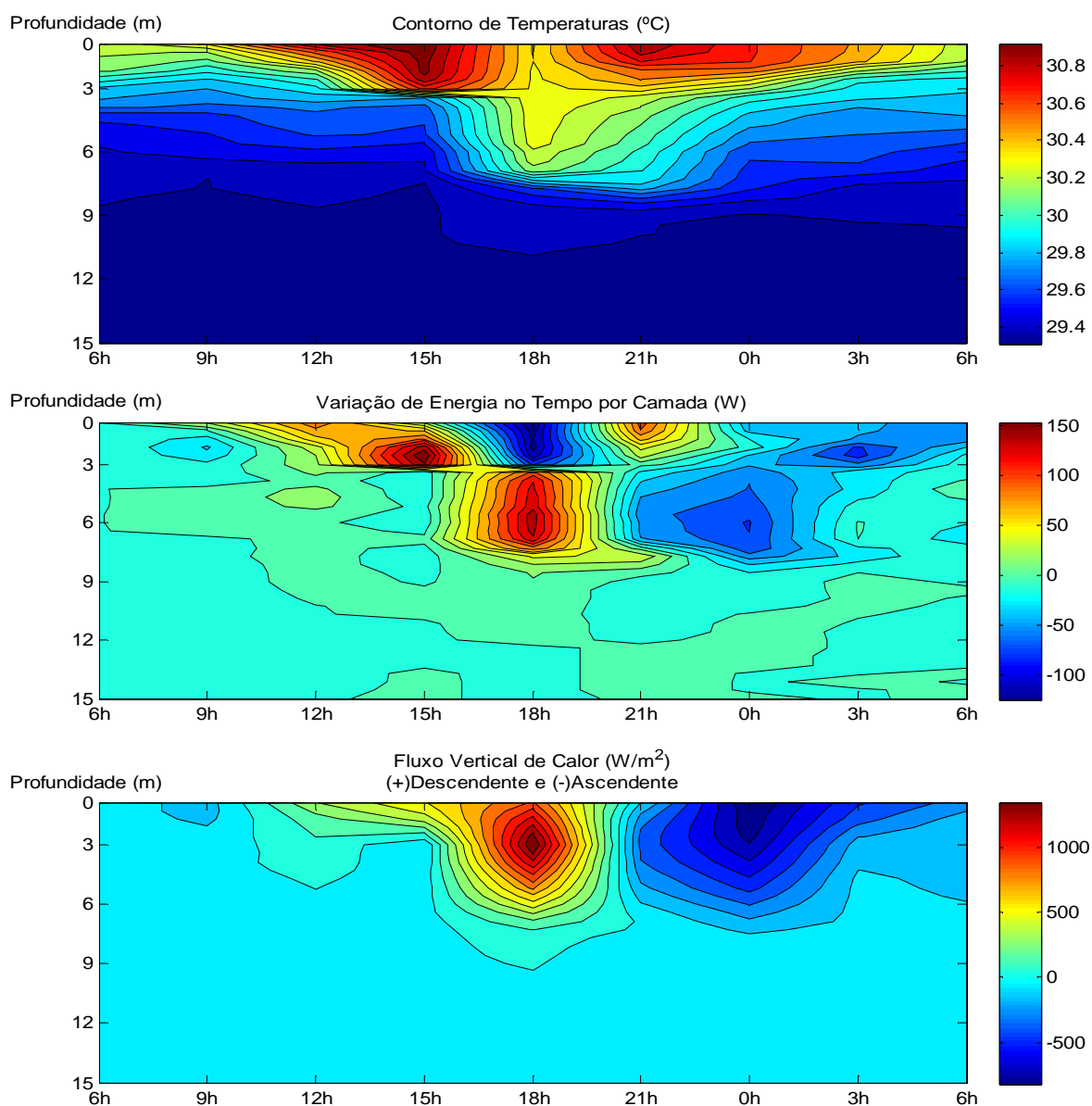


Figura 6-65. Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais em 2 e 3 Mar. 2010, utilizando modelo em MATLAB®.

Os fluxos de calor mostraram uma tendência de trocas térmicas mais intensas em determinadas camadas ou profundidades. Na Figura 6-66 observa-se uma maior homogeneidade das camadas, com uma termoclina fixa próxima aos seis metros de profundidade. Após o aquecimento, às 21h00min, a camada localizada na termoclina passa a perder calor para as camadas limites, formando zonas de resfriamento.

Nota-se que o período noturno representado pelos horários de 21h00min, 00h00min e 03h00min diferem quanto à variação de energia. Isso provavelmente pode ter ocorrido em função da variabilidade dos ventos, que impactaram mais às 00h00min,

provocando uma leve mistura que gerou um impacto no fluxo de calor nas camadas, como mostrado no último gráfico da série de gráficos da Figura 6-66.

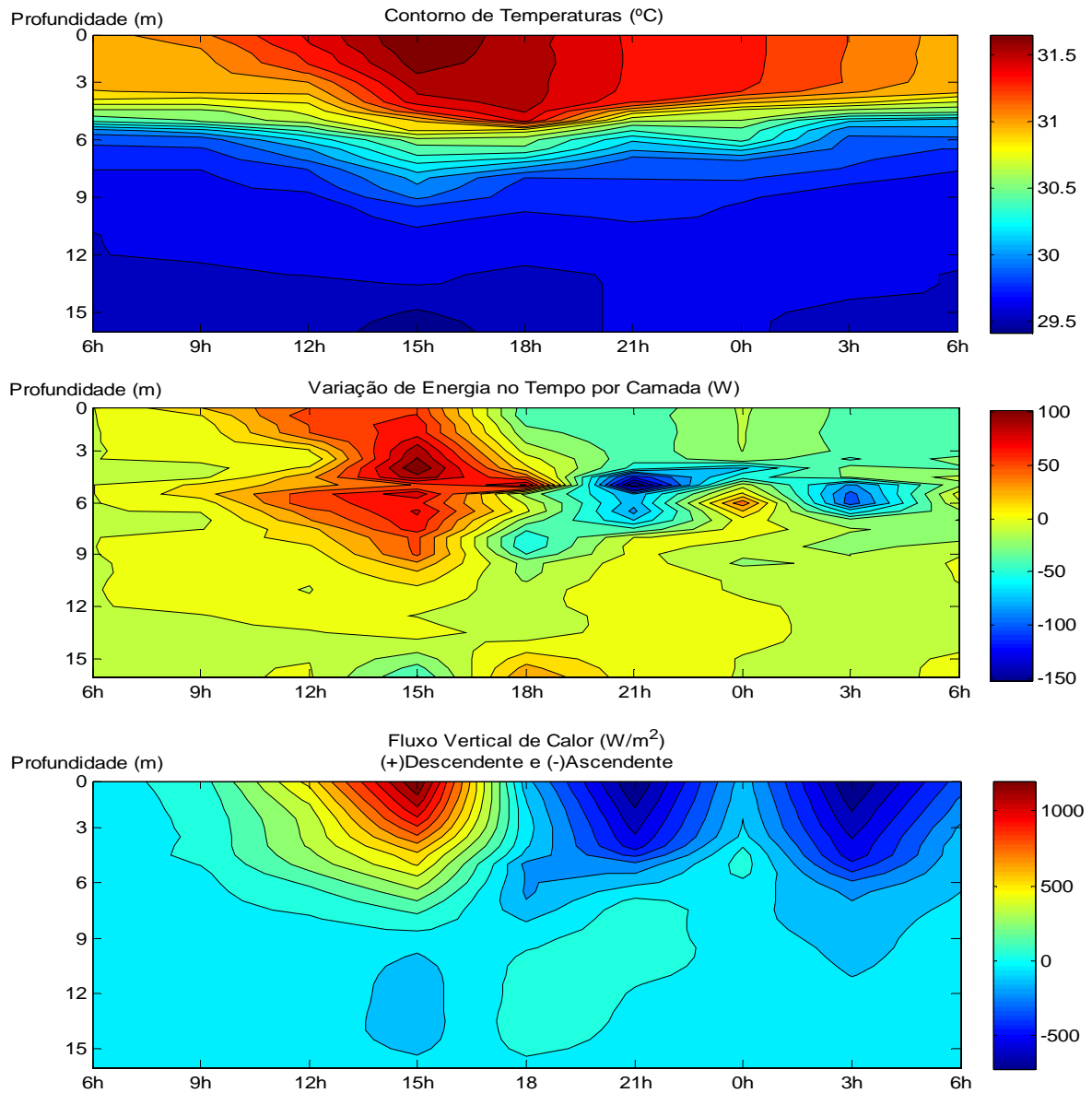


Figura 6-66. Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais em 6 e 7 Abr. 2010, utilizando modelo em MATLAB®.

6.1.5 Estabilidade da estratificação

O número adimensional de Richardson foi utilizado para uma estimativa sobre a estabilidade do processo de estratificação térmico observado. Na Tabela 6-27 é possível observar pelos valores calculados que em todos os momentos o reservatório esteve estável, com um processo de estratificação forte e resistente à mistura.

Tabela 6-27. Valores calculados para o número de Richardson nos meses em que ocorreu medição nictemeral da temperatura da água.

Número de Richardson			
Hora	Janeiro	Março	Abril
6,00	26751,750	68720,944	53859,645
9,00	8291,511	13125,154	13598,889
12,00	1067,821	2262,775	1593,412
15,00	465,706	902,596	1055,432
18,00	1559,822	312,702	783,243
21,00	178002,118	2017,416	1327,257
0,00	...	4899,423	6672,674
3,00	52843,356	25574,074	29195,033
6,00	87723,051	18623,360	78431,635

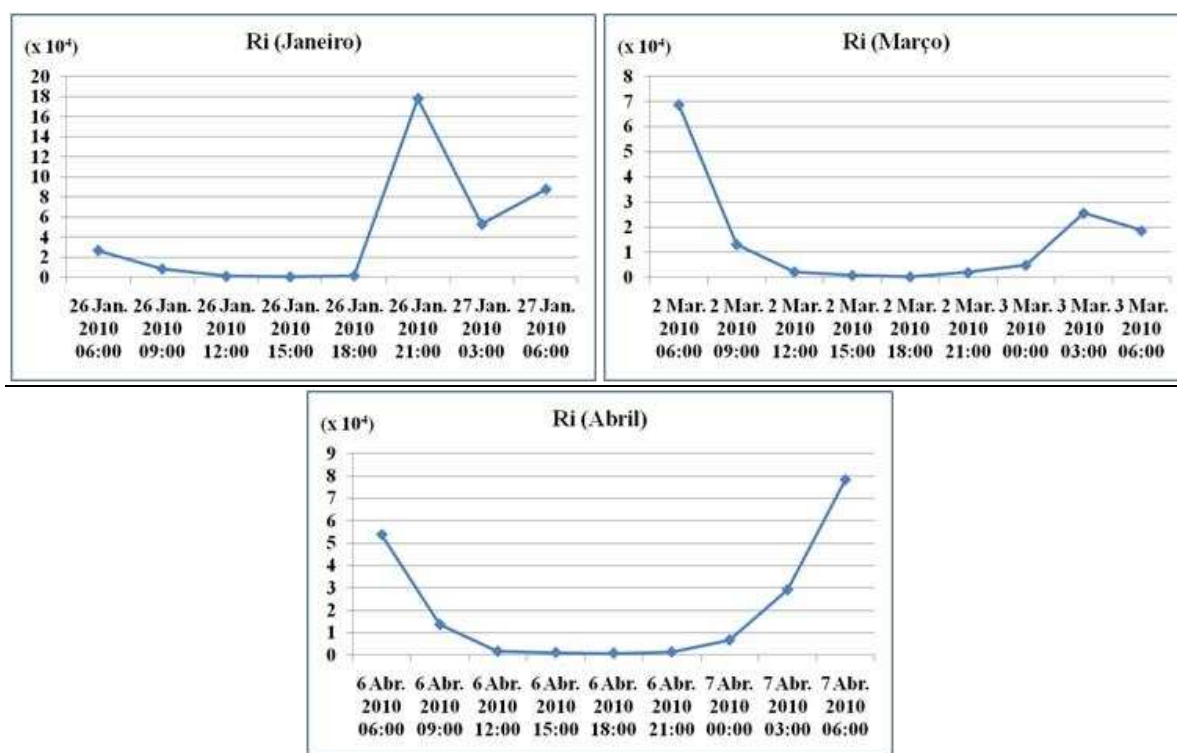


Figura 6-67. Número de Richardson calculado para o reservatório Pereira de Miranda durante o período de amostragem nictemeral.

Os altos valores encontrados mostraram que a força dos ventos não foi suficiente para forçar uma mistura entre as camadas estratificadas. Aliados aos ventos, a profundidade elevada do ponto onde ocorreram as medições e a ausência de afluições favoreceram o processo de estratificação térmica. A Figura 6-67 apresenta todos os valores calculados para o adimensional de Richardson durante o período de amostragem em que ocorreram medições nictemeraias.

Ciclos do número de Richardson caracterizam a estratificação e desestratificação dos lagos. Isto é, para números de Richardson mais elevados os reservatórios estão estratificados e números de Richardson baixos os reservatórios encontram-se misturados.

7 SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

7.1 Monitoramento da qualidade da água

O monitoramento da qualidade e da quantidade de água é importante para descrever seu estado e tendências, além de identificar a existência e o desenvolvimento das questões relacionadas, averiguando a adequação com a legislação (PETERS & WARD, 2003). Monitoramento é conceituado pela Organização Internacional para Padronização (ISO) como o processo programado de amostragem, medições e posterior registro, das várias características da água, objetivando freqüentemente a avaliação da conformidade com objetivos definidos (MILES, 2009) ou ainda segundo a resolução CONAMA 357/2005 que define monitoramento como a medição ou verificação de parâmetros de qualidade e quantidade de água, que pode ser contínua ou periódica, utilizada para acompanhamento da condição e controle da qualidade do corpo de água.

A falta de um padrão sistemático regional causa sérios prejuízos ao monitoramento, movidos pelas diferenças com que cada ambiente se apresenta. Ward *et al.*, (2003) cita que um grande problema enfrentado pelos responsáveis do monitoramento da qualidade hídrica reside no fato da falta de consenso entre eles, seja pelas agências gestoras ou pelos órgãos de pesquisa. Deve-se levar em consideração também variabilidades regionais, fator determinante no sucesso do sistema de monitoramento. O mesmo modelo aplicado em uma região temperada, por exemplo, pode não funcionar corretamente dentro dos nossos regimes climáticos.

Dentre os objetivos de um programa de monitoramento, é comum a citação de quatro itens muito importantes como aqueles definidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA): caracterizar as águas e identificar mudanças ou tendências na qualidade da água ao longo do tempo; identificar problemas específicos ou emergentes; reunir informações para projetar programas de remediação ou prevenção da poluição e determinar se as metas do programa de monitoramento estão sendo atendidas, no que diz respeito à legislação vigente e a execução das ações de controle da poluição (MILES, 2009).

Os dados obtidos devem transmitir informação clara à comunidade gestora. Informação desorganizada é inútil nos dias de hoje, principalmente com a tecnologia a disposição. As informações sobre o sistema precisam ser definidas de forma a permitir uma melhor organização dos dados para auxiliar o processo de tomada de decisão. Por isso a

necessidade de implantar uma estrutura de monitoramento que siga uma ordem de ser estabelecida, aceita e implantada para apoiar a operação e ajudar a reduzir perdas de informação (PETERS; WARD, 2003).

O Conselho Nacional de Monitoramento da Qualidade da Água dos Estados Unidos define o sistema de monitoramento como o fluxo de informação através de séries de atividades seqüenciais, construída cuidadosamente em etapas anteriores para finalmente produzir e transmitir informação (PETERS; WARD, 2003). O objetivo do Conselho é proporcionar um fórum nacional para a coordenação de estratégias e métodos cientificamente defensáveis, que melhorem o monitoramento, a avaliação e a análise da qualidade da água. Dentre suas ações, promovem parcerias para promover a colaboração, o avanço da ciência e a melhoria da gestão dentro de todos os elementos do monitoramento da qualidade da água, bem como o aumento do envolvimento e a sensibilidade pública na administração dos recursos hídricos. Agências governamentais, indústrias, universidades e organizações privadas dedicam tempo e dinheiro no monitoramento, proteção, gestão e recuperação de bacias hidrográficas e recursos hídricos. Diferenças na estratégia de projetos de sistemas de monitoramento, métodos laboratoriais e de amostragem, procedimentos de análise de dados e tecnologia de gerenciamento dos dados tem causado grandes dificuldades nas informações e resultados e seu compartilhamento e uso com todos. A restauração e proteção da qualidade das águas são dependentes de um maior entendimento dos dados e das informações.

Antes de iniciar o fluxo de informação em um nível operacional, a estratégia de monitoramento montada deve definir metas, visando atingi-las. Finalmente, o projeto de monitoramento deve ser completo para auxiliar nas operações envolvidas na obtenção da informação desejada. A Figura 7-1 mostra o esquema da abordagem sistemática dos 3C – colaborar, coordenar e comunicar.

A restauração e proteção sustentável dos recursos hídricos exigem a definição de um sistema de monitoramento como componente chave da proteção ambiental. Uma importante estratégia é a abordagem sistemática dos 3C – colaborar, coordenar e comunicar – que incluem a pesquisa e o compartilhamento da informação, melhora e ampliação da aplicabilidade das ferramentas de avaliação, aumento na quantidade e na qualidade dos dados e informação com potenciais baixos custos e consistência nos relatórios, que promovem informação de confiança (MARKOWITZ *et al.*, 2003).



Figura 7-1. Abordagem sistemática dos 3C. Adaptado de Robert C. Ward & Charles A. Peters (2003).

A comunicação é o processo de transmissão de informações, que pode ser um caminho ou uma troca de idéias, pensamentos ou mensagens. A coordenação é o processo em que dois ou mais participantes ligam, harmonizam ou sincronizam interações e atividades. A colaboração é o processo em que dois ou mais participantes trabalham coletivamente para lidar com questões que eles não podem resolver individualmente, formando parcerias, alianças ou equipes de trabalho. A comunicação inicia quando alguém decide compartilhar ou procurar alguma informação de alguém. Um esforço geral no sentido de avaliar o estado do recurso hídrico beneficia o esforço coordenado de vários participantes. Cada grupo participante decide qual tipo de papel no processo se adapta melhor a suas habilidades e metas.

Integrando a abordagem sistemática dos 3C em um ciclo de atividades, pode-se otimizar o sistema de monitoramento tornando-o mais eficiente. O ciclo PDCA, também conhecido como Ciclo de Shewhart, Ciclo da Qualidade ou Ciclo de Deming, tem como objetivo exercer o controle dos processos, podendo ser utilizado de forma contínua para o gerenciamento dos recursos hídricos, por meio do estabelecimento de uma diretriz de controle (planejamento da qualidade), do monitoramento do nível de controle a partir de padrões e da manutenção da diretriz atualizada, resguardando as necessidades do público alvo (PACHECO *et al.*, 2010).

Idealizado por Walter A. Shewhart na década de 30 teve William Edwards Deming como o responsável pelo seu desenvolvimento e utilização prática. Trata-se, portanto, de um método para análise e solução de problemas que pode ajudar a organização a solucionar problemas através de análises, planejamentos e ações corretivas ou preventivas que

formarão uma filosofia de melhoria contínua necessária para o alcance das metas (VENDRAME, 2007). O ciclo PDCA divide-se em quatro fases ou passos principais:

i) Primeira fase: *Plan* (Planejar): Fase caracterizada pelo estabelecimento de um plano, com objetivos, procedimentos e metodologias necessárias para atingir os resultados;

ii) Segunda fase: *Do* (Executar): Realizar o que foi planejado anteriormente e executar as atividades propostas na primeira fase;

iii) Terceira fase: *Check* (Verificar): Monitorar e avaliar periodicamente todos os processos e resultados, analisando a situação atual e comparando com a situação anterior, verificando se o que foi planejado realmente foi realizado através do confronto das situações e;

iv) Quarta fase: *Act* (Agir): Nesta fase uma ação deve ser tomada com base no passo anterior, agindo de acordo com o verificado de forma a melhorar a qualidade e a eficiência, aprimorando a execução e corrigindo eventuais falhas.

O ciclo PDCA consiste no planejamento de uma ação que facilita na hora de tomar decisões, tendo por finalidade básica o alcance de metas necessárias para a solução dos problemas. Quando implementado de maneira correta esse ciclo se transforma num processo de melhoria contínua, ajustando, com o passar do tempo, tudo o que foi planejado e replanejado. A tomada de decisões parte então de uma longa análise, onde todas as ações tomadas ao longo do ciclo são colocadas em cheque a cada passo de tempo, com a inclusão de novas metodologias e tecnologias aditivas.

7.2 Diretrizes gerais para um modelo de gestão da qualidade da água

7.2.1 Diagnóstico inicial do Problema

Existem várias razões para monitorar a qualidade da água em um reservatório. Dentre todos os motivos, questões específicas para cada problema deverão ser respondidas com base no monitoramento de parâmetros chave para aquele processo. Além disso, características básicas ao entendimento dos processos devem ser levadas em consideração, tais como a tipologia do reservatório; quais são as principais forçantes climáticas atuantes e condicionantes da qualidade da água; por quais processos físicos o reservatório em questão está submetido (tal como a estratificação por densidades) e quais os impactos decorrentes na qualidade da água.

De posse de todas estas informações, deve-se então identificar os objetivos do monitoramento. A avaliação da qualidade da água pode servir para informar sobre o “status” daquele corpo d’água, através de uma descrição de suas características físicas, concentração de algumas substâncias químicas relevantes ou uma avaliação dos biota aquáticos. Outro objetivo importante seria identificar as tendências de evolução dos dados ao longo do tempo. Características naturais provocadas por afluições em épocas de estiagem e chuvosas formam um padrão de variação que muitas vezes pode ser detectado por análise de tendência. Um terceiro objetivo seria uma possível avaliação de fontes pontuais de poluição dentro do reservatório. Objetivos deste porte carecem de um conhecimento mais abrangente não somente das características da água, como também outros fatores que a influenciam (uso e ocupação do solo dentro da bacia hidrográfica). Finalmente, um último objetivo importante seria o fornecimento de dados para um sistema de modelagem numérica, que trabalharia em parceria com o monitoramento em prognósticos e simulações de diferentes cenários hipotéticos.

7.2.2 Projeto básico de monitoramento

O projeto inicial ou esboço do que será o projeto final de monitoramento é somente uma parte do sistema completo. Ele inclui o número, onde e como estarão distribuídas as estações de monitoramento; qual será a frequência das amostragens e quais os parâmetros serão monitorados. Esta fase é de extrema importância e é a fase onde todas as características físicas locais devem ser analisadas com cautela, de maneira a abrangê-las com

a maior confiabilidade possível. Deve ser flexível às mudanças, visto necessidade futura de ajustes segundo for apropriado e de acordo com o ciclo de melhoria constante que foi proposto. A tabela 7-1 apresenta as principais atividades que compõe um sistema de monitoramento da qualidade da água.

Tabela 7-1. Atividades envolvidas no monitoramento da qualidade da água.

Atividade Principal	Atividades Específicas
1. Projeto do sistema de monitoramento	Seleção das estações de monitoramento, seleção das variáveis e frequência da amostragem;
2. Coleta de amostras	Técnicas de amostragem, coletas de dados em campo, preservação e transporte das amostras;
3. Análise laboratorial	Técnicas de análise, procedimentos operacionais, controle de qualidade e armazenamento dos dados;
4. Manuseio de dados	Recepção, ajuste e verificação dos dados; armazenamento e distribuição;
5. Análise dos dados	Sumário estatístico básico, interpretação e análise temporal dos dados; modelos de qualidade da água;
6. Utilização da informação	Procedimentos operacionais, relatórios técnicos.

Fonte: Adaptado de Sanders *et al.* (1983) *apud* Strobl & Robillard (2008).

Um ponto importante no planejamento sistemático do monitoramento é a representatividade das amostras coletadas. Elas devem representar um padrão que é normalmente encontrado em outros pontos do reservatório e não devem estar expostas a condições que causem grandes variações ou interferências. Os pontos escolhidos precisam representar bem locais críticos como, por exemplo, fontes pontuais de poluição. O monitoramento destas fontes contribuirá para resultados mais pessimistas que serão melhores aproveitados, uma vez que a legislação poderá controlar àqueles valores, servindo ao restante do ambiente. A quantidade de pontos amostrais e de variáveis monitoradas será função do nível de detalhamento que se deseja obter, que também está ligado ao custo do processo final.

A frequência que as amostras serão coletadas é uma questão chave no monitoramento. Muitos projetos são realizados com base em manuais técnicos preexistentes,

ou de acordo com sistemas de monitoramento que foram produzidos em regiões de clima temperado. O regime climático presente no semiárido possui um padrão próprio, e a ele deve ser feita as adequações dos métodos. Amostragens nictemerais são indispensáveis visto que contemplam o principal ciclo de mudanças térmicas de corpos d'água tropicais, que é a variabilidade diária.

Uma simples amostragem em uma determinada hora do dia muitas vezes não será capaz de diagnosticar com segurança as mudanças sofridas. Épocas chuvosas e secas são períodos distintos e que devem estar englobados no sistema de monitoramento. A afluência em reservatórios é um dos processos mais impactantes na qualidade da água dos reservatórios no semiárido, pois além das cargas extras que entram no meio solubilizadas pela água das chuvas, as correntes que entram à montante modificam a velocidade e alteram o tempo de residência da água. Strobl & Robillard (2008) comentam que a frequência das amostragens deve ser ajustada de maneira a produzir o máximo de informação com o mínimo de esforço amostral.

As variáveis que farão parte do sistema de monitoramento deverão ser escolhidas de acordo com a necessidade da informação desejada. A escolha deve ser feita com muita cautela, visto que o aumento no número de variáveis encarecerá muito o projeto final, seja por custos laboratoriais ou pelas técnicas de preservação mais especializadas. No final, o número de variáveis monitoradas deverá ser capaz de responder às principais questões, sem que apresente perda de informação.

7.2.3 Aplicação do Ciclo PDCA no monitoramento da qualidade da água

Dado o conhecimento científico atual disponível, é traçado um diagnóstico geral sobre o problema específico pelo qual o reservatório está sendo estudado. Após um cauteloso reconhecimento das características do problema, hipóteses gerais devem ser criadas para as possíveis causas. Tais hipóteses são criadas tendo como base as prováveis causas do problema. Um plano de ação é elaborado de acordo com as características do reservatório. Nesta fase é feita uma definição dos critérios de avaliação da qualidade da água, a escolha das principais variáveis atuantes e indicadoras do processo em função da geomorfologia e da climatologia atuante no reservatório. Com isso tem-se a finalização da etapa nº1 "*Plan*".

De posse do plano de ação elaborado, atua-se em campo de acordo com o planejado, organizando os dados a medida que forem sendo coletados. Nesta fase também é feita uma análise preliminar dos processos principais. Um cuidado especial deverá ser tomado

na manipulação dos dados e no seu armazenamento. Qualquer problema nesta fase inviabiliza todo o procedimento. Os modelos numéricos possibilitam a construção de cenários com a definição de pontos críticos e o estabelecimento da estratégia de monitoramento e modelagem. A partir daí, os dados já processados e corrigidos serão encaminhados e comporão a base de calibração do modelo numérico escolhido previamente. Assim, modelos numéricos e conceituais poderão ser desenvolvidos com base na observação de campo e a análise dos processos. Assim, está concluída a etapa nº2 “Do”.

O próximo ponto é a checagem de tudo o que foi realizado, verificando se o que foi planejado foi colocado em prática ou teve algum desvio. Esta etapa chama-se “Check”, e é a fase onde tudo o que apareceu de novo ou que incrementará o modelo será anotado e encaminhado ao último passo.

A quarta e última etapa, “Act”, é a ação a ser tomada diante do resultado obtido e testado. Caso o efeito tenha sido negativo e o problema persistir, inicia-se um novo ciclo. Se o efeito ao final destes passos foi positivo e o problema tiver sido solucionado, o sistema agora poderá ser padronizado, avaliando-se a situação atual e as mudanças que proporcionaram o alcance das metas para que seja feita uma padronização do sistema utilizado.

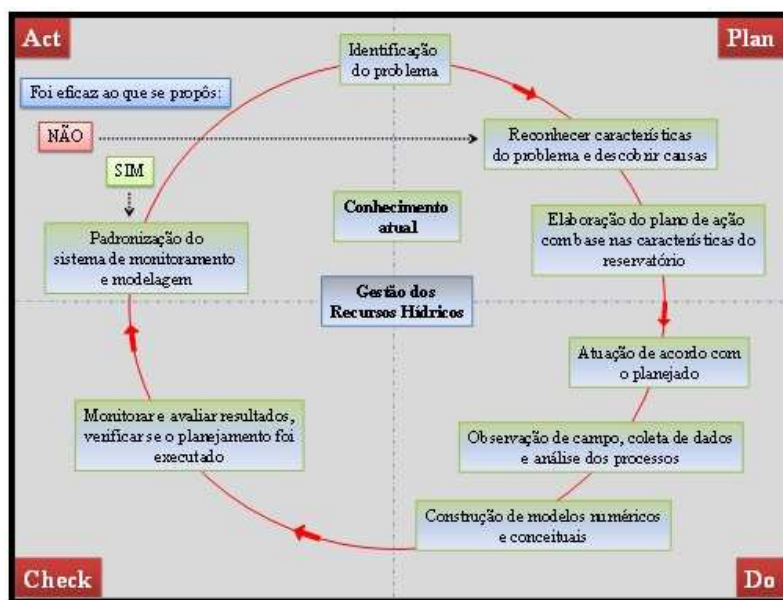


Figura 7-2. Ciclo PDCA aplicado à gestão dos recursos hídricos com base no monitoramento e modelagem da qualidade da água.

O projeto inicial se torna então um processo interativo, onde novas informações serão adicionadas ao sistema a cada “loop” no ciclo. Sem este retorno, falhas decorrentes de decisões iniciais não poderiam ser solucionadas.

7.2.4 Sistema de monitoramento acoplado à modelagem numérica

O sistema de monitoramento dos recursos hídricos acoplado à modelagem consiste na integração entre as ferramentas do monitoramento e da modelagem visando um maior suporte aos gestores da água. Esta acoplagem fornece respostas mais acuradas e é útil na avaliação de fenômenos que ocorrem em reservatórios, análises das condições de operação hidráulica, otimização do projeto de monitoramento utilizado e sua aplicação eficiente.

Um modelo hidrodinâmico e de qualidade da água acoplado a um programa de monitoramento torna possível a investigação dos impactos das forçantes físicas nos diversos processos dos reservatórios através de sua quantificação em um processo interativo. Sabe-se que alguns grandes reservatórios possuem vários tipos de processos que estão fortemente correlacionados com os fatores físicos, mais ainda que por fontes de poluição. Muitas vezes a qualidade da água em um reservatório varia mais em função da disposição geométrica do que das próprias afluentes poluidoras, sendo necessárias ferramentas que analisem tais variações a curto, médio e longo prazo.

Um modelo matemático pode ser utilizado como ferramenta para entender melhor o comportamento do sistema e a representação de um fenômeno ou de um conjunto de fenômenos do mundo real, quantificando possíveis impactos gerados por certas atividades humanas (CHAPRA, 1997; FRAGOSO Jr., 2009). A escolha do modelo deve ser adequada às necessidades existentes e às características do reservatório em estudo. Os modelos dividem-se em seis grupos: zero dimensional; unidimensionais horizontais; unidimensionais verticais; duas dimensões no plano horizontal; duas dimensões no plano vertical e três dimensões. Cada um deles possui sua aplicabilidade e suas restrições de uso.

Os modelos aplicáveis a lagos e reservatórios envolvem dois componentes importantes: (i) um balanço hídrico ou equação de continuidade que descreve a quantidade de água presente em um determinado momento, e (ii) uma série de balanços de massa ou equações advectivas-dispersivas, que descrevem a variação da quantidade de um determinado contaminante ou constituinte da qualidade da água presente no meio e a maneira como a sua massa é transportada e transformada; onde é resolvida uma equação de balanço de massa para cada constituinte de interesse (MARTIN; McCUTCHEON, 1998).

Em reservatórios profundos onde o processo da estratificação por densidades é mais efetivo geralmente utilizam-se modelos de duas dimensões no plano vertical. Tais modelos, como é o caso do CE-QUAL-W2, consideram o reservatório bem misturado lateralmente, e são utilizados na simulação de padrões de vazão e temperatura da água, descrevendo o movimento e a entrada de alguns constituintes da qualidade da água (COLE; WELLS, 2008).

Assim, para um perfeito casamento entre o programa de monitoramento e a modelagem numérica, todas as medições em campo devem ser orientadas visando fornecer dados ao sistema de modelagem. Um exemplo disso são as medições de temperatura da água. Neste trabalho foram tomadas medições a cada 30 cm ao longo de toda a extensão da coluna d'água. Existe uma necessidade real de várias medições de temperatura para uma correta visualização do processo de estratificação térmica. Em alguns casos, dependendo da disponibilidade de tempo, pode-se diminuir este espaçamento, realizando medições na superfície e algumas próximo ao fundo do reservatório. Os locais próximos à barragem do reservatório tendem a ter uma profundidade mais elevada, exigindo que mais medições sejam tomadas.

Em regiões tropicais, dois aspectos principais conduzem a frequência de amostragem: variação sazonal impulsionada pelo rio à montante e a operação do reservatório. Assim, a amostragem deve ser realizada no mínimo a cada três meses, ou quatro vezes ao ano. Dados meteorológicos e hidrológicos devem ser tomados juntamente aos dados de qualidade da água, que também servirão de base de dados ao modelo matemático. Dados meteorológicos como velocidade, duração e sentido dos ventos, temperatura do ar, umidade relativa e radiação solar são imprescindíveis para a modelagem.

7.2.5 Programa de Produção do Conhecimento

O processo de inovação intelectual prende-se às referências com o cotidiano, orientadas ora para as demandas mais imediatas, ora para a busca de respostas a questões universais (GOLDANI *et al.*, 2010). A produção do conhecimento científico, muitas vezes com base formada sob os pilares das universidades, entrega à própria ciência o papel de objeto de estudo, ficando passível de agregação de valores e novos conceitos. Este modelo de produção tem um caráter multidisciplinar e atrela a produção científica às necessidades sociais.

Por definição, todo conhecimento tem suas raízes em situações específicas e envolve previsões verificáveis sobre as possíveis conseqüências de ações tomadas (PACHECO *et al.*, 2010). A produção de conhecimento de forma sistematizada, no país, deu-se com a institucionalização da pesquisa e pós-graduação, em meados de 1960, que anos seguintes foram estimuladas a investir na criação e fortalecimento dos programas *stricto sensu* nas mais diversas áreas do conhecimento recebendo, para tanto, recursos para montar infraestrutura física e formar profissionais qualificados (MENEGHEL *et al.*, 2010).

Cientificamente, a solução de um problema de acordo com Choo (2004) *apud* Pacheco *et al.*, (2010) está ligada à: (i) percepção de um resultado indesejado ou uma necessidade não satisfeita; (ii) identificação de suas prováveis causas e (iii) testes para verificação das relações postuladas. Estes três processos, se repetidos ciclicamente até que uma solução satisfatória seja encontrada, correspondem às quatro primeiras etapas do Ciclo de Deming. Planejar, desenvolver e checar, seguidos então de uma nova abordagem correspondente ao estudo dos resultados com foco na aprendizagem por eles possibilitada, representa uma nova etapa do planejamento, fechando-se o ciclo com um novo desenvolvimento possibilitado por este novo conhecimento adquirido. Os últimos estágios do modelo apresentam a pausa e reflexões necessárias antes de se iniciar um novo ciclo, a partir dos novos conhecimentos gerados. Estes passos remetem à representação do que seria um diagrama para a melhoria e aprendizado organizacional sobre um determinado processo (PACHECO *et al.*, 2010).

Em recursos hídricos, semelhante abordagem pode ser aplicada, inclusive em órgãos gestores que apóiam a pesquisa científica e a geração de conhecimento, como é o caso da COGERH. Parceiras entre essas companhias, que detém uma boa infraestrutura operacional, com universidades que têm no seu dia-a-dia o papel de gerar e disseminar o conhecimento facilita a resolução de problemas e atualizam a abordagem costumeiramente aplicada aos seus principais focos de trabalho.

O Ciclo PDCA adaptado às questões referentes aos recursos hídricos poderá oferecer uma ferramenta importante tanto na geração de novos roteiros e abordagens, como na padronização de sistemas de monitoramento ambiental. Esse novo sistema, acoplado a um sistema de modelagem numérica, criará uma forma mais atualizada e que representa o estado da arte em sistemas de monitoramento ambiental e da qualidade da água no mundo.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados mostraram a influência dos fatores climatológicos e morfológicos sobre as características físicas, químicas e biológicas do reservatório Pereira de Miranda. A temperatura da água é de extrema importância em um ambiente aquático, e representou um dos parâmetros da qualidade da água mais importantes e decisivos na proposição de um sistema de monitoramento. A caracterização dos perfis verticais de temperatura no reservatório Pereira de Miranda, com base nos dados de campo capturados, forneceu uma base sólida para o entendimento das mudanças provocadas pelo aquecimento da água e a identificação do processo de estratificação térmica. Os perfis de temperatura da água mostraram que o reservatório apresentou-se estratificado em períodos mais ou menos constantes, mostrando certo padrão de mistura e estratificação ao longo do dia. Este padrão de mistura e estratificação pôde ser explicado em grande parte pelo aquecimento do epilímnio durante as horas de influência da luz solar no reservatório, e a tendência de poucos ventos nas primeiras horas do dia.

A estratificação térmica que foi observada na coluna d'água influenciou vários parâmetros da qualidade da água, como pôde ser percebido pelos perfis de pH e salinidade, além dos outros parâmetros sondados. A amostragem realizada em dezembro de 2009 no reservatório Pereira de Miranda revelou um padrão governado pela variabilidade diurna dos ventos. Notou-se uma tendência dos picos na intensidade dos ventos ocorrerem entre as 15h00min e 20h00min. Este acréscimo na intensidade dos ventos refletiu diretamente na coluna da água, deslocado a profundidade média da termoclina.

A partir da primeira campanha de monitoramento do reservatório o volume começou a decair em virtude da falta de chuvas no período, da intensa evaporação potencial e da contínua liberação de água pela tomada d'água. Houve uma redução de 15,6 %, que foi decisiva não só para o aumento na temperatura média do reservatório, como também para uma série de outros impactos advindos da diminuição do volume. Pôde-se notar que alguns nutrientes tiveram sua concentração aumentada, em virtude da diminuição do volume total.

Os resultados mostraram também a clara relação do oxigênio dissolvido e a temperatura da água, e a influência que o processo de estratificação provoca. Em lagos e reservatórios tropicais, como é o caso do reservatório Pereira de Miranda, o consumo de oxigênio é bastante elevado e o efeito da estratificação térmica aumenta os déficits de oxigênio dissolvido a grandes profundidades. A variabilidade do perfil térmico diário do

reservatório Pereira de Miranda foi uma característica marcante e pôde ser presenciada em todos os meses em que ocorreram medições, caracterizando-o ora como polimítico (espaço de tempo em que o reservatório esteve misturado com pequenas estratificações pouco duradouras), ora como meromítico (espaço de tempo onde o reservatório permaneceu com uma camada inferior estagnada e com a circulação comprometida), com o aparecimento de quimioclinas.

Com base no cálculo das densidades da água no plano vertical, pôde-se notar que diferenças de 2°C são relevantes, equivalendo, em termos de densidade, a variações de quase 8°C em regiões de clima temperado. Até mesmo em pequenas variações de apenas 0,3°C em regiões quentes podem levar a separação térmica das massas de água.

Os fluxos de calor mostraram uma tendência de trocas térmicas mais intensas em determinadas camadas ou profundidades, onde foi possível a identificação da termoclina e o limite entre as zonas de diferentes densidades. Os resultados mostraram que o modelo unidirecional adotado não foi suficiente para explicar a completa transferência vertical de calor; e que os valores negativos encontrados para os fluxos indicaram a importância das correntes aquáticas e a variação lateral. Com base no adimensional de Richardson, observou-se o comportamento das camadas estratificadas e que este se manteve estável, com um processo de estratificação forte e resistente à mistura.

A proposição de um sistema de monitoramento com base em tudo o que foi visto e que atenda a qualidade dos recursos hídricos e o bem estar das comunidades foi discutida. A decisão em monitorar parâmetros específicos da qualidade da água passa pela definição das variáveis mais significativas para determinado problema ambiental. Uma importante estratégia discutida foi a abordagem sistemática dos 3C que incluem a pesquisa e o compartilhamento da informação. Este sistema, acoplado à modelagem da qualidade da água e dentro de ciclo de otimização, pode torná-lo mais eficiente. Para isso, foi utilizado o Ciclo de Deming o conhecido Ciclo PDCA, que tem por objetivo exercer o controle dos processos por meio do estabelecimento de uma diretriz de controle (planejamento da qualidade), do monitoramento do nível de controle a partir de padrões e da manutenção da diretriz atualizada.

Dado o conhecimento científico disponível, é traçado um diagnóstico geral sobre determinado problema. Com isso, hipóteses são criadas e um plano de ação é elaborado, iniciando-se o ciclo. Ao final de todos os passos propostos e se o resultado foi positivo e o problema tiver sido solucionado, o sistema agora poderá ser padronizado, avaliando-se a situação atual e as mudanças que proporcionaram o alcance das metas para que seja feita uma

padronização do sistema utilizado. A aplicação desta abordagem pode ser aplicada aos recursos hídricos, em parcerias com os órgãos gestores e universidades, que têm no seu dia-a-dia o papel de gerar e disseminar o conhecimento.

Tal abordagem facilitará a resolução de problemas e atualizará os modelos costumeiramente aplicados. O Ciclo PDCA, adaptado às questões referentes aos recursos hídricos, poderá oferecer assim uma ferramenta importante na geração de novos roteiros na padronização de novos sistemas de monitoramento ambiental. Em pesquisas futuras, a utilização de dados climatológicos, hidrológicos e morfométricos devem ser rotineiras no planejamento de sistemas de monitoramento, visto sua importância na qualidade da água. Com isso, a evolução da modelagem da qualidade da água tornar-se-á ferramenta imprescindível na utilização dos dados obtidos no monitoramento acoplado, com vistas à construção de relatórios que indiquem as reais condições de uso e suporte para a vida e o uso sustentável dos corpos d'água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Águas (ANA). **Panorama da qualidade das águas superficiais no Brasil**. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Brasília: ANA/SPR, 2005. 179 p.
- ALMEIDA, José Herbert Medeiros. **O Processo de Eutrofização Cultural: Análise Comparativa dos Reservatórios Pereira de Miranda e Araras**. 66 f. Monografia (Curso de engenharia civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE. 2010.
- ANDRADE, Eunice Maia de; ARAÚJO, Lúcia de Fátima Pereira; ROSA, Morsyleide de Freitas; GOMES, Raimundo Benvindo; LOBATO, Francisco Antonio de Oliveira. Fatores determinantes da qualidade das águas superficiais na bacia do Alto Acaraú, Ceará, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 6, p. 1791-1797, nov-dez 2007.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; LEAL, C. M.; SILVA, Ê. F. F.; FRANCO, L. D. Calibração de Sonda Multiparâmetros para Estudos de Qualidade de Água. Teresina - PI: **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA**. 2007.
- APHA – **American Public Health Association, Standard methods for the examination of water and waste water**. 20th ed. Washington: APHA, 1999.
- AYOADE, J. **Introdução à climatologia para os trópicos**. São Paulo, Ed. Bertrand do Brasil, 2ª edição. 1988. 332p.
- BARTRAM, Jamie; BALLANCE, Richard. **Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes**. UNEP/WHO, 1996. 348p.
- BERRYMAN, A. A. On principles, laws and theories in population ecology. **Oikos** 103: 695-701. 2003.
- BEZERRA-NETO, J. F.; PINTO-COELHO, R. M. O déficit de oxigênio em um reservatório urbano: Lagoa do Nado, Belo Horizonte - MG. **Acta. Limnol. Bras.**, 13{1}: 107-116. 2001.
- BRANCO, Christina W.C.; KOZLOWSKY-SUZUKI, Betina; SOUSA-FILHO, Izidro F.; GUARINO, Alcides W.S.; ROCHA, Rinaldo J. Impact of climate on the vertical water column structure of Lajes Reservoir (Brazil): A tropical reservoir case. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**, 14: 175–191. 2009.
- BRIAN D.; RICHTER, Ruth Mathews,; DAVID, L. Harrison,; ROBERT, Wigington. ECOLOGICALLY SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT: MANAGING RIVER FLOWS FOR ECOLOGICAL INTEGRITY. **Ecological Applications** 13:1.206-224, Fev. 2003.
- BOYD, C. E.; TUCKER, C. S. **Pond Aquaculture Water Quality Management**. Norwell: Kluwer, 1998.

CAMPOS, Nilson; STUDART, Ticiania (Editores). **Gestão das Águas: princípios e práticas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. 242p.

CARLSON, R. E. **A Trophic State Index for Lakes**. Contribution n. 141, Limnological Research Center, University of Minnesota, Minneapolis. 1974. 17 pp.

COGERH - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. Plano de gerenciamento da bacia do Acaraú. **Relatório de tarefas 1 – RT1**. Fortaleza, 299 p. 2010.

CHAPRA, S. C. **Surface water-quality modeling**. McGraw-Hill, New York. 1997. 844 p.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Proposta de Índices de Qualidade de Água para o Estado de São Paulo**. Coletânea de Textos da CETESB. 2002.

CHIN, David A. **Water-quality engineering in natural systems**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2006. 610p.

COLE, T. M.; WELLS, S. A. **CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.6**. Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, OR, 2008.

COGERH - Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Relatório de visita realizada em 3 Mar. 2010**. 2010. 16 p.

CROSSETTI, L. O.; BICUDO, C. E. D. Phytoplankton as a monitoring tool in a tropical urban shallow reservoir (Garças Pond): the assemblage index application. **Hydrobiologia**, v. 610, p. 161-173. 2008.

DODDS, W.K. **Freshwater ecology: concepts & environmental applications**. **Aquatic ecology**. New York: Academic Press, 2002.

DOWNING, J. A.; PRAIRIE, Y. T.; COLE, J. J.; DUARTE, C. M.; TRANVIK, L. J.; STRIEGL, R. G.; McDOWELL, W. H.; KORTELAJINEN; P.; CARACO, N. F.; MELACK, J. M.; MIDDELBURG, J. J. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. **Limnology and Oceanography** 51:2388–2397. 2006.

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1988 (a). 574p.

ESTEVEES, F. A.; BOZZELI, R. L.; CAMARGO, A. F. M.; ROLAND, F.; TOMAZ, S. M. Variação diária (24 horas) de Temperatura, O₂ Dissolvido, pH e Alcalinidade em duas lagoas costeiras do Estado do Rio de Janeiro e suas implicações no metabolismo destes ecossistemas. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 11, 99-127. 1988.

FAO. **Summary of World Food and Agricultural Statistics**. Statistics Division. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2009. 147 p.

FORD, D. E.; JOHNSON, L. S. An Assessment of reservoir Mixing Processes. **Technical Report E-86-7**. Prepared by Ford, Thornton, Norton and Associates, Ltd., for the US Army Engineer waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss. 1986.

FRAGOSO Jr., Carlos Ruberto; MARQUES, David de Motta; FERREIRA, Tiago Finkler. **Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 304p.

FREIRE, R. H. F. **Contribuição ao conhecimento limnológico de reservatórios do semiárido brasileiro que abastecem a Região Metropolitana de Fortaleza: Açudes Pacajus e Gavião (Ceará, Brasil)**. São Carlos. 2007. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FUNCEME - SRH/FUNCEME/PROURB-RH. Projeto Estudo da Qualidade das Águas em Reservatórios Superficiais da Bacia Metropolitana. **Relatório Final**. Fortaleza, 2002. 580 p.

GARCIA, S. M.; ZERBI, A.; ALIAUME, C.; Do Chi, T.; LASSERRE, G. **The ecosystem approach to fisheries. Issues, terminology, principles, institutional foundations, implementation and outlook**. FAO Fisheries Technical Paper. n. 443. Rome, FAO. 2003. 71 p.

GEORGE, G.; HURLEY M.; HEWITT D. The impact of climate change on the physical characteristics of the larger lakes in the English Lake District. **Freshwater Biology** 52: 1647–1666, 2007.

GOLDANI, Marcelo Zubarán; SILVA, Clécio Homrich da, NASCIMENTO, Luís Felipe Machado do; BLANK, Danilo. A questão da produção do conhecimento: desafios na gestão dos programas de pós-graduação. **RBPG**, Brasília, v. 7, n. 12, p. 104 - 116. Jul. 2010.

HAMBREY, J.; EDWARDS, P.; BELTON, B. **An ecosystem approach to freshwater aquaculture: a global review**. In D. Soto, J. Aguilar-Manjarrez, and N. Hishamunda (eds). Building an Ecosystem Approach to Aquaculture. FAO/Universitat de les Illes Balears Experts Workshop. 7–11 May 2007, Mallorca Spain. FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings. n. 14. FAO, Rome. 2008. p. 117–221.

JI, Z.-G. **Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries**. USA: Wiley-Interscience, Hoboken, 2007. 676p.

JØRGENSEN, S. E.; VOLLENWEIDER, R. A. **Princípios para o Gerenciamento de Lagos**. São Carlos: ILEC, IIE. 84 p. 2000.

KASPRZAKA, Peter; PADISAKC, Judit; KOSCHEL, Rainer; KRIENITZ, Lothar; GERVAIS, Frank. Chlorophyll *a* concentration across a trophic gradient of lakes: An estimator of phytoplankton biomass? **Limnologia** 38, 327–338. 2008.

KIRILOVA, E.; HEIRI, O.; ENTERS, D.; CREMER, H.; LOTTER, A. F.; ZOLITSCHKA, B.; HÜBENER, T. Climate-induced changes in the trophic status of a Central European lake. **Journal of Limnology** 68: 71-82, 2009.

KREUS, Carlos Leomar; LANZER, Edgar Augusto; PARIS, Quirino. Funções de produção von Liebig com rendimentos decrescentes. **Pesq. Agropec. Bras., Brasília**, v.30, n.1, p.95-106, jan. 1995.

LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. 2004. 235 f. Tese (Doutorado Ecossistemas Aquáticos e Terrestres) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LAMPERT, W.; SOMMER, U. **LIMNOECOLOGY: The ecology of Lakes and Streams**. New York: Oxford University Press. 382p. 1997.

Lei 9.433. **Política nacional de recursos hídricos**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, 1997.

LEWIS, M. E. **Dissolved Oxygen (version 2.1)**. U.S.: Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, book 9, chap. A6, section 6.2, 48 p. 2006.

LEWIS Jr, W. M. Basis for the protection and management of tropical lakes. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**. v. 5. p. 35-48, 2000.

LEWIS, W. M. Jr. Tropical Lakes: how latitude makes a difference. In: SCHIEMER, F.; BOLAND, K. (Eds.) **Perspectives in Tropical Limnology**. Amsterdam: SPB Academic Publishers, 1996. p 43-64.

MARCELINO, Rosano Ramos. **Variações de Curto Prazo de Parâmetros Físicos e Químicos, Associadas às Estratificações de um Lago da Planície de Inundação do Rio Acre, Rio Branco, Acre, Brasil**. 2004. 235 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Manejo dos Recursos Naturais) - Universidade Federal do Acre, Rio Branco - AC, 103f. 2005.

MARTIN, James Lenial; McCUTCHEON, Steve C. **Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling**. CRC Press: Boca Raton, Florida. 1998. 794p.

MARGULIS, S.; HUGHES, G.; GAMBRILL, M.; AZEVEDO, L.G.T. **Brasil: A Gestão da Qualidade da Água** - Inserção de Temas Ambientais na Agenda do Setor Hídrico. Banco Mundial, Brasil, 2002. 72p.

MARTINEZ, C. B. R.; AZEVEDO, Fábio de; WINKALER, Elissandra Ulbricht. Toxicidade e efeitos da amônia em peixes neotropicais. In: José Eurico Possebon Cyrino; Elisabeth Criscuolo Urbinati. (Org.). **Tópicos Especiais em Biologia Aquática e Aqüicultura**. Jaboticabal - SP: Sociedade Brasileira de Aqüicultura e Biologia Aquática, p. 81-95. 2006.

MENEGHEL, Stela Maria; ROBL, Fabiane; WASSEM, Joyce. **DESAFIOS DA PRODUÇÃO DE CONHECIMENTO EM EDUCAÇÃO – PERSPECTIVAS INSTITUCIONAIS E DE PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO**. Disponível em: <<http://www.anped.org.br/reunioes/30ra/trabalhos/GT11-3572--Int.pdf>>. Acesso em: 28 Nov. 2010.

MERCANTE, C. T. J.; TUCCI-MOURA, A. Comparação Entre os Índices de Carlson e de Carlson Modificado Aplicados a dois Ambientes Aquáticos Subtropicais, São Paulo, SP. **Acta Limnologica Brasiliensia**. 11(1): 1-14. 1999.

MILLER Jr, G. Tyler. **CIÊNCIA AMBIENTAL**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada. Uma abordagem aplicada**. Editora UFMG, Belo Horizonte. 2005. 292p.

MONTE-LUNA, Pablo del; BROOK, Barry W.; ZETINA-REJÓN, Manuel J.; CRUZ-ESCALONA, Victor H. The carrying capacity of ecosystems. **Global Ecology and Biogeography**. 13, p. 485–495. 2004.

NASELLI-FLORES, Luigi. Man-made lakes in Mediterranean semi-arid climate: the strange case of Dr Deep Lake and Mr Shallow Lake. **Hydrobiologia** 506–509: 13–21, 2003.

PACHECO; Ana Paula Reusing; SALLES, Bertholdo Werner; GARCIA, Marcos Antônio; POSSAMAI, Osmar. **O Ciclo PDCA na Gestão do Conhecimento: Uma Abordagem Sistêmica**. Disponível em: <<http://www.issbrasil.usp.br/pdfs2/ana.pdf>>. Acesso em: 25 Nov. 2010.

PEREIRA, L. P. F.; MERCANTE, C. T. J. A amônia nos sistemas de criação de peixes e seus efeitos sobre a qualidade da água: uma revisão. **Boletim Instituto de Pesca**, v. 31, p. 81-88, 2005.

PETERS, Charles A.; WARD, Robert C. A FRAMEWORK FOR ‘CONSTRUCTING’ WATER QUALITY MONITORING PROGRAMS. **Water Resources IMPACT**, September, v. 5, n. 5. p. 03-07. American Water Resource Association, 2003.

PENA NAVAL, Liliana; COUTO, Thaiza Clemente. Estudo da Remoção de Fósforo em Efluentes Provenientes de Sistemas Anaeróbios para Tratamento de Águas Residuárias Utilizando Cal. **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Saneamento ambiental Brasileiro: Utopia ou realidade? Rio de Janeiro: ABES, p.1-5 Ilus., 2005.

POMPÊO, M. L. M. O disco de Secchi. **Bioikos**, 13(1/2): 40-45, 1999.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos. EESC/US. 1998. 840 p.

RODRIGUES, S. L. **Comparação da atenuação da radiação solar e dos fatores que determinam o clima de radiação solar subaquática em lagos e reservatórios do Brasil**. 2006. São Carlos, 2003, 363f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2006.

SILVA, Gilberto Silvério da. JARDIM, Wilson de F. Um novo índice de qualidade das águas para proteção da vida aquática aplicado ao Rio Atibaia, região de Campinas/Paulínia-SP. **Quím. Nova [online]**. v. 29, n.4, pp. 689-694. 2006.

SPERLING, E. V. **Morfologia de lagoas e represas**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1999. 137p.

SOCOLOFSKY, Scott A.; JIRKA, Gerhard H. **Mixing in Lakes and Reservoirs**. Texas A & M University. Disponível em <<https://ceprofs.civil.tamu.edu/kchang/ocen689/ocen689ch9.pdf>>. Acesso em 27 Abr. 2010. 2004. 14p.

SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, Eduardo Sávio; PORTO, Mônica. Processo de Mistura em Reservatórios do Semi-Árido e sua Implicação na Qualidade da Água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, Out/Dez. 2006.

SOUZA FILHO, F. A.; PAULINO, Walt Disney; SOUZA, Andrea Becco de; PORTO, Mônica do Amaral. Breve Diagnóstico da Qualidade das Águas em Reservatórios no Estado do Ceará. In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1999. Belo Horizonte. Águas em quantidade e qualidade: o desafio do próximo milênio. 1999.

TUNDISI, José Galizia; MATSUMURA TUNDISI, Takako. **LIMNOLOGIA**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 631p.

VENDRAME, Maris de Cassia Ribeiro. O ciclo PDCA como ferramenta da Qualidade Total. In: I Encontro Científico e I Simpósio de Educação Unisalesiano. 2007. **Anais...** Lins, I Encontro Científico e I Simpósio de Educação Unisalesiano. 2007.

VON SPERLING, M. V. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. v. 2, 134 p.

WELCH, E. B.; LINDELL, T. **Ecological Effects of Wastewater: Applied Limnology and Pollutant Effects**. 2nd ed. Chapman and Hall, New York. 1992.

WETZEL, R G. **Limnology**. Philadelphia: Saunders, (1975) 1983. 860 p.

WILLIAMS, W. D. Salinisation: A major threat to water resources in the arid and semi-arid regions of the world. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**, 1999 4: p. 85–91.

YSI Incorporated. 6-Series - Multiparameter - Water Quality Sondes. **User Manual**, 2009.

YOKOYA, Fumio; CANHOS, Vanderlei; DURRANT, Lúcia Regina. **BACTÉRIAS DE INTERESSE INDUSTRIAL**. Disciplina - TA918, UNICAMP. Disponível em:< http://www.unicamp.br/fea/lsvm/cursos/ta918_1.html>. Acesso em 13 ago. 2010.

APÊNDICE A – Código do programa computacional em MATLAB® para a confecção dos gráficos de Contornos de temperatura, variação de energia e fluxos verticais de calor

```

clear all
clc
[fname,pname] = uigetfile('*.','Enter data file');
if (fname ~= 0)
    filename = sprintf('%s%s',pname,fname);
end

tic

num = xlsread(filename);
cota = round(100*num(1:end,1))/100;
area = round(100*num(:,2))/100;
vol = round(100*num(:,3))/100;
data = num(:,4);
nivel = round(100*num(:,5))/100;
prof = round(100*num(:,6))/100;
cotam = nivel-prof;
temp = num(:,7);
ox = num(:,8);
I = find(num(:,9)==1);

a = ceil(min(cotam));
b = max(cotam);
xivol = round(100*(a:0.01:b))/100;
yivol = spline(cota,vol,xivol);

volc = zeros;
tempc = zeros;
oxc = zeros;
for perfil = 1:length(I)

    %seleção dos dados relativos a um determinado perfil

    if perfil == length(I)
        teste = [cotam(I(perfil):end), temp(I(perfil):end),
ox(I(perfil):end)];
    else
        teste = [cotam(I(perfil):I(perfil+1)-1),
temp(I(perfil):I(perfil+1)-1), ox(I(perfil):I(perfil+1)-1)];
    end

    k = 0; %contador p/ camadas
    step = .5; %espessura da camada

    for i = a:step:b-step
        k = k + 1;
        if i<max(teste(:,1)) && i+step>max(teste(:,1))

            yitemp =
interp1((teste(:,1))',(teste(:,2))',xivol,'linear','extrap');
            inttemp = cumtrapz(xivol,yitemp);

```

```

        yiox =
interpl((teste(:,1))',(teste(:,3))',xivol,'linear','extrap');
        intox = cumtrapz(xivol,yiox);

        volc(k,perfil) = yivol(find(xivol==max(teste(:,1)))) -
yivol(find(xivol==i));
        tempc(k,perfil) = (inttemp(find(xivol==max(teste(:,1)))) -
inttemp(find(xivol==i)))/(max(teste(:,1))-i);
        oxc(k,perfil) = (intox(find(xivol==max(teste(:,1)))) -
intox(find(xivol==i)))/(max(teste(:,1))-i);
        else

        yitemp =
interpl((teste(:,1))',(teste(:,2))',xivol,'linear','extrap');
        inttemp = cumtrapz(xivol,yitemp);

        yiox =
interpl((teste(:,1))',(teste(:,3))',xivol,'linear','extrap');
        intox = cumtrapz(xivol,yiox);

        volc(k,perfil) = yivol(xivol==i+step) - yivol(xivol==i);
        tempc(k,perfil) = (inttemp(find(xivol==i+step)) -
inttemp(find(xivol==i)))/step;
        oxc(k,perfil) = (intox(find(xivol==i+step)) -
intox(find(xivol==i)))/step;

        if oxc(k,perfil) < 0
            oxc(k,perfil) = 0;
        end
        if volc(k,perfil) < 0
            volc(k,perfil) = 0;
        end

        end
    end
end

sm=size(volc);
dens = zeros; %matriz de densidades
energ = zeros; %matriz de energia
denenerg = zeros; %matriz de delta energia
fluxo = zeros; %matriz de fluxo vertical
dox = zeros;
fluxox = zeros;
for perfil=1:sm(1,2)
    for k=1:sm(1,1)
        dens(k,perfil)=((1)-((tempc(k,perfil)-
3.9863)^2/508929.2)*(tempc(k,perfil)+288.9414)/(tempc(k,perfil)+68.12963))*
1000;

energ(k,perfil)=dens(k,perfil)*4175*tempc(k,perfil);%*volc(k,perfil)
        end
    end
for perfil=1:sm(1,2)
    for k=1:sm(1,1)
        if perfil==1
            denenerg(k,perfil) = 0;
            dox(k,perfil) = 0;
        else
            denenerg(k,perfil) = (energ(k,perfil) - energ(k,perfil-1))/3;

```

```

        dox(k,perfil) = (oxc(k,perfil) - oxc(k,perfil-1))/3;
    end
end
end
for k=1:sm(1,1)
    for perfil=1:sm(1,2)
        if k==1
            fluxo(k,perfil) = 0;
            fluxox(k,perfil) = 0;
        else
            fluxo(k,perfil) = denerg(k-1,perfil) + fluxo(k-1,perfil);
            fluxox(k,perfil) = dox(k-1,perfil) + fluxox(k-1,perfil);
        end
    end
end
end

subplot(3,2,1)
contourf(tempc,20)
colorbar
title({'Contorno de Temperaturas (°C)'})

subplot(3,2,3)
contourf(denerg,20)
colorbar
title({'Variação de Energia no Tempo por Camada'})

subplot(3,2,5)
contourf(fluxo,20)
colorbar
title({'Fluxo Vertical de Calor','(+)Descendente e (-)Ascendente'})

subplot(3,2,2)
contourf(oxc,20)
colorbar
title({'OD (mg/l)'})

subplot(3,2,4)
contourf(dox,20)
colorbar
title({'Variação de OD no Tempo por Camada'})

subplot(3,2,6)
contourf(fluxox,20)
colorbar
title({'Fluxo Vertical de OD'})

xlswrite(filename, volc, 'Plan2', 'B3')
xlswrite(filename, tempc, 'Plan3', 'B3')
xlswrite(filename, energ, 'Plan4', 'B3')
xlswrite(filename, denerg, 'Plan5', 'B3')
xlswrite(filename, fluxo, 'Plan6', 'B3')
xlswrite(filename, oxc, 'Plan7', 'B3')
xlswrite(filename, dox, 'Plan8', 'B3')
toc

```


ANEXO A – Índice de Estado Trófico do Reservatório Pereira de Miranda durante o período de amostragem de acordo com Almeida (2010)

As concentrações dos nutrientes encontrados no açude Pentecoste após análise laboratorial estão apresentadas na Tabela A. Todas as amostras foram coletadas próximo ao meio dia.

Tabela A. Amostras colhidas quanto aos nutrientes – açude Pentecoste

AÇUDE PEREIRA DE MIRANDA – PENTECOSTE				
CONCENTRAÇÃO DOS NUTRIENTES				
Data	Nitrogênio Total (mg/m ³)	Fósforo Total (mg/m ³)	Ortofosfato (mg/m ³)	Clorofila a (mg/m ³)
08/12/09	1070	98	34	13
02/03/10	1450	95	34	12
06/04/10	1560	90	10	12,3

Os resultados para leitura do disco de Secchi estão dispostos na Tabela B e servem para medir o nível de transparência da água. Ao longo do tempo, pode-se perceber que a transparência da água permaneceu quase constante.

Tabela B- Profundidade do disco de Secchi – açude Pentecoste

AÇUDE PEREIRA DE MIRANDA – PENTECOSTE		
DISCO DE SECCHI		
Data	Hora	Profundidade (m)
08/12/09	12:00	1,10
02/03/10	12:00	1,00
06/04/10	12:00	1,00

A diminuição do valor da profundidade de Secchi pode ter sido afetada pela diminuição do volume do reservatório aumentando a densidade de sólidos em suspensão, o que tornou a água mais turva.

A relação fósforo/nitrogênio foi feita com a finalidade de saber qual nutriente é o limitante ao aumento da produção primária. A Tabela C apresenta as relações entre N/P.

Tabela C- Nutriente limitante – açude Pentecoste

AÇUDE PEREIRA DE MIRANDA – PENTECOSTE		
NUTRIENTE LIMITANTE		
Data	N/P	Limitante
08/12/09	10,92	Fósforo
02/03/10	15,26	Fósforo
06/04/10	17,33	Fósforo

O fósforo é geralmente o nutriente limitante tornando fácil o controle trófico dos ambientes lacustres, bastando controlar o aporte deste nutriente no corpo hídrico. Já o nitrogênio é fixado por bactérias nitrificantes que extraem nitrogênio da atmosfera, sendo este de controle mais difícil.

Através das equações de Carlson se obteve os valores tróficos para o disco de Secchi, Clorofila “a” e fósforo total, que são apresentados na Tabela D. A média calculada representa a média aritmética.

Tabela D- Índice de estado trófico de Carlson para disco de Secchi, Clorofila "a" e Fósforo total. (HE) - Hipereutrófico, (E) – Eutrófico – açude Pentecoste

AÇUDE PEREIRA DE MIRANDA – PENTECOSTE		
RESULTADOS CARLSON		
08/12/09	02/03/10	06/04/10
IET (SD) = 58,62 (E)	IET (SD) = 60 (E)	IET (SD) = 60 (E)
IET (CLHa) = 55,73 (E)	IET (CLHa) = 54,95 (E)	IET (CLHa) = 55,19 (E)
IET (PT) = 70,30 (HE)	IET (PT) = 69,85 (HE)	IET (PT) = 69,07 (HE)
MÉDIA = 61,55 (HE)	MÉDIA = 61,60 (HE)	MÉDIA = 61,42 (HE)

Nas três amostras colhidas os índices variaram entre eutrófico e hipereutrófico, com média em hipereutrófico nas três amostragens. Assim, nota-se pelos valores calculados que a água do açude Pentecoste há muito tempo esta comprometida para seus usos múltiplos. Isso implica em custos maiores para o tratamento da água segundo a metodologia de Carlson. Para as equações de Carlson modificado por Toledo se obteve os valores da Tabela E. A média calculada foi a média aritmética.

Tabela E- Índice de estado trófico de Carlson modificado por Toledo para disco de Secchi, Clorofila "a", Fósforo total e Fósforo reativo. (M) Mesotrófico, (E) – Eutrófico – açude Pentecoste

AÇUDE PEREIRA DE MIRANDA – PENTECOSTE		
RESULTADOS CARLSON MODIFICADO POR TOLEDO		
08/12/09	02/03/10	06/04/10
IET (SD) = 49,39 (M)	IET (SD) = 50,77 (M)	IET (SD) = 50,77 (M)
IET (CLHa) = 56,29 (E)	IET (CLHa) = 55,48 (E)	IET (CLHa) = 55,73 (E)
IET (PT) = 62,87 (E)	IET (PT) = 62,42 (E)	IET (PT) = 61,64 (E)
IET (PSR) = 66,50 (E)	IET (PSR) = 66,50 (E)	IET (PSR) = 48,84 (M)
MÉDIA = 58,76 (E)	MÉDIA = 58,79 (E)	MÉDIA = 54,25 (E)

Nas três amostras colhidas, os índices, individualmente, variaram entre mesotrófico, eutrófico, sendo a média eutrófico para cada amostra. Portanto, a água do açude Pentecoste também está comprometida, segundo a metodologia de Toledo modificada. A diferença entre as duas metodologias foi significativa neste caso, pois segundo Carlson o reservatório está classificado como hipereutrófico e segundo Toledo está classificado como eutrófico. De fato isso mostra que a qualidade da água deste reservatório está comprometida quanto aos seus usos múltiplos. As Figuras A e B apresentam os gráficos gerados devido às equações de Carlson e Carlson modificado por Toledo para o açude Pentecoste.

Após uma análise mais detalhada dos gráficos é possível perceber que as equações de Carlson superestimam os índices quando comparados com as equações de Toledo. Isso comprova que o modelo desenvolvido por Carlson é mais adequado para países de clima temperado, sendo as equações de Toledo mais voltada para a realidade de países de clima tropical. Após o enquadramento destes índices através de suas médias é possível perceber que o açude Pentecoste está enquadrado de acordo com a Tabela F.

Tabela F - Classificação trófica segundo IET médio – açude Pentecoste

AÇUDE PEREIRA DE MIRANDA – PENTECOSTE					
Carlson			Carlson modificado		
Data	IET _{médio}	Estado	Data	IET _{médio}	Estado
01/12/09	61,55	Hipereutrófico	01/12/09	58,76	Eutrófico
23/02/10	61,60	Hipereutrófico	23/02/10	58,79	Eutrófico
30/03/10	61,42	Hipereutrófico	30/03/10	54,25	Eutrófico

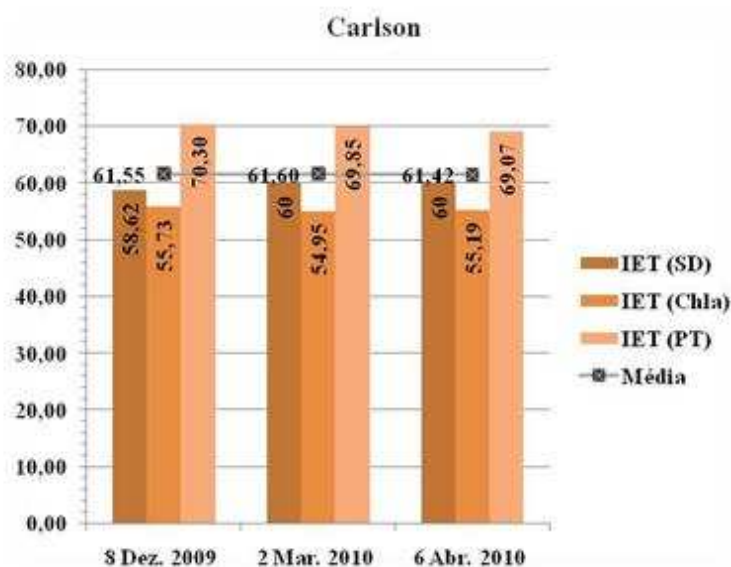


Figura A - Avaliação trófica para o açude Pentecoste segundo Carlson

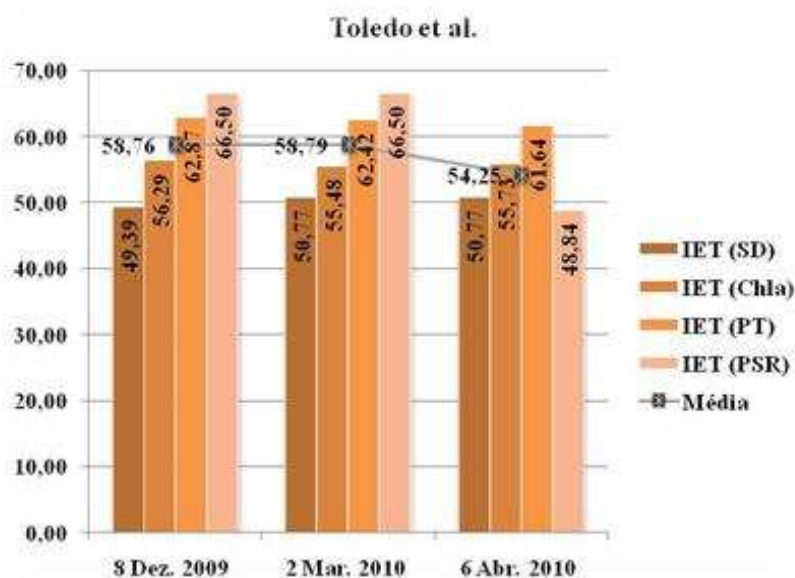


Figura B - Avaliação trófica para o açude Pentecoste segundo Toledo

Houve pequena variação dos índices de estado trófico ao longo do tempo, que poderiam ter diminuído devido à baixa afluência, mas permaneceram constantes. Como o açude não “sangrou”, não houve renovação da massa d’água; o tempo de residência da água aumentou e impactou no valor final do IET. O ano de 2010 foi um ano tipicamente seco, que refletiu diretamente sobre o índice de estado trófico do reservatório Pereira de Miranda.