

**Campus de São Carlos**

**FENÔMENOS CLIMATOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS E  
SUA REPERCUSSÃO SOBRE A LIMNOLOGIA DOS  
RESERVATÓRIOS DE BARRA BONITA - SP, CARLOS  
BOTELHO (LOBO-BROA)-SP E TUCURUÍ - PA - BRASIL**

**Nyamien Yahaut Sebastien**

**Orientador: Prof. Dr. José Galizia Tundisi**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**



**ESCOLA DE ENGENHARIA  
DE SÃO CARLOS**

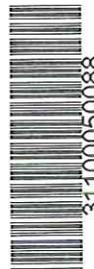
**Tese de doutorado**

**FENÔMENOS CLIMATOLÓGICOS E  
HIDROLÓGICOS E SUA REPERCUSSÃO  
SOBRE A LIMNOLOGIA DOS  
RESERVATÓRIOS DE BARRA BONITA -SP,  
CARLOS BOTELHO (LOBO-BROA)-SP E  
TUCURUÍ-PA-BRASIL  
Nyamien Yahaut Sebastien  
Orientador : Prof.Dr. José Galizia Tundisi**



2004

DEDALUS - Acervo - EESC



Class. TESE-EEEC ✓

Curr. 6334

Tombo T012/05

Sysno 1422483

Nyamien Yahaut Sebastien

FENÔMENOS CLIMATOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS E SUA  
REPERCUSSÃO SOBRE A LIMNOLOGIA DOS RESERVATÓRIOS DE  
BARRA BONITA -SP, CARLOS BOTELHO (LOBO-BROA)-SP E TUCURUI-  
PA-BRASIL

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço...07.../...08.../...05...

Ass.:.....*lesan*.....

Tese apresentada à Escola de Engenharia de  
São Carlos da Universidade de São Paulo,  
como parte dos requisitos para a obtenção do  
Título de Doutor em Ciências da Engenharia  
Ambiental

Orientador : Prof.Dr. José Galizia Tundisi

São Carlos

2004

Ficha catalográfica preparada pela Seção de  
Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Y13f Yahaut Sebastien, Nyamien  
Fenômenos climatológicos e hidrológicos e sua  
repercussão sobre a limnologia dos reservatórios de Barra  
Bonita-SP, Carlos Botelho (Lobo-Broa)-SP e Tucuruí-PA,  
Brasil / Nyamien Yahaut Sebastien. -- São Carlos, 2004.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.

Área: Ciências da Engenharia Ambiental.

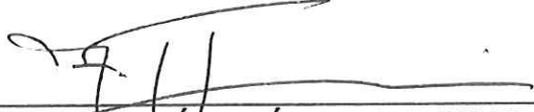
Orientador: Prof. Dr. José Galizia Tundisi.

1. Reservatório. 2. Estabilidade. 3. Circulação.  
4. Gerenciamento. I. Título.

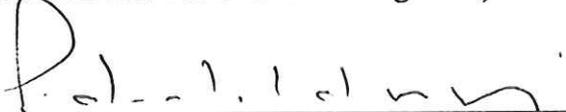
FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **NYAMIEN YAHAUT SEBASTIEN**

Tese defendida e julgada em 08-11-2004 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **JOSÉ GALÍZIA TUNDISI (Orientador)**  
(Instituto Internacional de Ecologia/IIE)

Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **PEDRO LEITE DA SILVA DIAS**  
(Instituto Astronômico e Geofísico/USP)

Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **BELMIRO MENDES DE CASTRO FILHO**  
(Instituto Oceanográfico/USP)

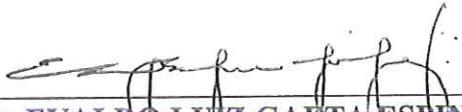
APROVADO

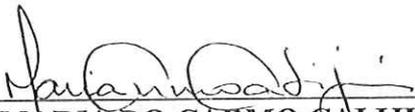
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **IRINEU BIANCHINI JÚNIOR**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **EDUARDO MARIO MENDIONDO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **EVALDO LUIZ GAETA ESRINDOLA**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Ciências da Engenharia Ambiental

  
\_\_\_\_\_  
Profª. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho a duas pessoas, ao Professor Dr José Galizia Tundisi, por ser a última orientação de tese de Doutorado na USP, e outro à Professora Dra Vera Lucia Mota Klein, que sempre me incentivou e me fez acreditar no meus potenciais para pesquisa.

## AGRADECIMENTOS

À deus pela vida e coragem que me deu para chegar até este nível

Meu orientador Professor Doutor José Galizia Tundisi, pela valiosa orientação apesar de suas ocupações

À minha esposa Francly Rodrigues da Guia Nyamien, e Família em particular Dona Ermita Rodrigues da Silva pelo apoio moral.

Aos meus filhos Emmanuel Stessy Amoa Rodrigues da Guia Nyamien e Letícia Jaqueline Ako da Guia Nyamien

À meus pais e irmãos em Côte d'Ivoire em particular meu pai Nguessan Niamien e minha mãe Diabia Ako

Ao colega, amigo e compadre Meteorologista Prof Dr Ricardo Ferreira Carlos de Amorim da Universidade Federal de Alagoas pela ajuda na interpretação das imagens de satélite, dos dados climatológicos e a correção do português.

Ao IIE –Instituto Internacional de Ecologia pelo apoio na execução e finalização deste trabalho.

À todos os professores do Programa, pelo ensinamento

Ao programa de Pós-graduação do CRHEA pela oportunidade e a formação

Aos colegas e amigos da Unioeste em particular ao Prof. DR José Dílson pela correção do Português, Luis Antonio e Rinaldo Antonio Ribeiro Filho pela amizade.

Ao Prof. Vianney Mesquita pela revisão final do português

E finalmente aos colegas do Gerpel que direta ou indiretamente me incentivaram.

## RESUMO

Yahaut S., N. (2004). Fenômenos climatológicos e hidrológicos e sua repercussão sobre a limnologia dos reservatórios de Barra Bonita-SP, Carlos Botelho (Lobo-Broa)-SP e Tucuruí-PA-Brasil- Tese –EESC Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004

Os reservatórios, ao longo do tempo, passaram de simples controle de enchente para a produção de energia elétrica e, nos últimos anos, para um uso múltiplo. Em todos os casos, a qualidade é de suma importância. Nesta pesquisa, propõe-se analisar a resposta dos reservatórios de Barra Bonita e Carlos Botelho (Lobo-Broa) no estado de São Paulo, nas latitudes de 22° 31' S e 22° 15' S respectivamente e o de Tucuruí no estado do Pará a 3° 45' S aos diferentes fatores climatológicos, hidrológicos e limnológicos. Dados limnológicos, climatológicos, hidrológicos, imagens de satélite, foram obtidos de fontes diversas. Calcularam-se os parâmetros morfométricos, características físicas como conteúdo de calor, trabalho de vento, resistência térmica à circulação, os números adimensionais de Wedderburn, Richardson, Froude e *lake number*, as variâncias, as correlações e regressões entre os diferentes parâmetros. Observou-se que os reservatórios de Barra bonita e Broa considerados rasos são sensíveis aos fatores climatológicos e Tucuruí aos fatores hidrológicos e infiltrações. O Broa e Barra Bonita passam por instabilidade quando a estação passa de outono para inverno e da primavera para o verão. Com relação aos nutrientes, na Barra Bonita, o fosfato total (PO<sub>4</sub>), amônia (NH<sub>4</sub>) e nitrato (NO<sub>3</sub>) tiveram correlações positivas com o conteúdo de calor, trabalho de vento e a resistência térmica a circulação. As correlações não foram significativas com a estabilidade mostrando que quanto maior a estabilidade, menos disponível se tornam os compostos. No Broa as correlações positivas foram observadas entre a estabilidade e o silicato, o nitrito. Então há maior disponibilidade de nutriente (fosfato total, nitrato, amônia) no período de instabilidade. Como resposta na Barra Bonita observa-se o desenvolvimento dos *Bacillariophyceae* (*Aulacoseira italica* e *Aulacoseira granulata*) durante as instabilidades. No período de inverno e verão, diminui os *Bacillariophyceae* consequência de uma diminuição de nutrientes e um desenvolvimento de *Chlorophyceae*. Enquanto isso no Broa, durante o período de estabilidade, são disponibilizados a sílica (Si) e o nitrito (NO<sub>2</sub>), reduzindo o PO<sub>4</sub>, a (NH<sub>4</sub>) e o NO<sub>3</sub>. As estabilidades das UHE de Barra Bonita e Carlos Botelho localizada no sudeste do Brasil ocorrem no verão enquanto que de Tucuruí muda de estado nos períodos de chuva e estiagem. Com estas mudanças de estado, ocorre uma sucessão de comunidade planctônica e um aumento dos custos de tratamento da água.

Palavras Chaves : reservatório, estabilidade, circulação, gerenciamento

## Abstract

Reservoir uses have evolved from simple control of inundation to a vast gamut of multiple uses. In all reservoirs, at present, control of water quality as well as water quantity is a fundamental need. Responses of reservoirs related to water quality and quantity are dependent upon climatological and hydrological cycles as forcing functions. The objective of this research was to analyze the impact of climatological and hydrological factors on the limnology and productivity of reservoirs. For this research three reservoirs were selected: Barra Bonita (Lat 22°31'S/Long 48°33'W), Carlos Botelho (Lobo-Broa) (Lat 22°15'S/Long 47°49'W) and Tucuruí reservoir (Lat 3°45'03''S/Long 49°40'03''W). Morphometric parameters, physical factors: heat content, thermal resistance to circulation and non dimensional numbers such as Wedderburn, Richardson, Lake Number and Froude were calculated. Statistic analyses: variance, regression and correlation coefficient were also determined. The data on climatology, hydrology and limnology were obtained from published papers, thesis and dissertations available. The results show that shallow reservoirs such as Barra Bonita and Carlos Botelho (12 m average depth and 3.2 m average depth respectively) were affected by climatic factors such as air temperature, wind and effects of cold fronts. Tucuruí reservoir, deeper and located at low latitude is influenced by hydrologic factors such as rainfall, river flow, drainage water. The response of the reservoir is shown by the frequency of stability / mixing patterns. When there is circulation, such as in Barra Bonita and Carlos Botelho (Lobo / Broa) reservoirs, nutrients availability increases. Both in Barra Bonita and Carlos Botelho reservoirs mixing patterns increase the presence of diatoms in the water column (*Aulacoseira italica* for Carlos Botelho reservoir and *Aulacoseira italica* and *Aulacoseira granulata* for Barra Bonita reservoir). When stability occurs, *Cyanophyta* will develop its blooms especially in Barra Bonita, a eutrophic reservoir. The stability for both reservoirs located in the Southeast of Brazil occurs during the summer. Tucuruí reservoir change states during the year, especially during the periods of high and low rainfall corresponding to high and low water discharge. With the impact of the mixing, processes that promote changes in the vertical structure of the reservoir water quality increases the costs of treatment. Thus, the successive pulses that changes community succession (planktonic community) in the reservoirs are a consequence of external forces, climatological or hydrological or both.

Keyword: Reservoir, stability, circulation, management

## Lista de Figuras

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Divisão territorial das grandes bacias hidrográficas brasileiras   | 12 |
| 2  | Imagem de satélite da bacia do reservatório da UHE Carlos Botelho (Lobo-Broa)  | 13 |
| 3  | Bacia do reservatório da UHE de Barra Bonita e o rio Tietê   | 14 |
| 4  | Bacia do reservatório da UHE de Tucuruí  | 17 |
| 5  | Mapa de repartição das principais zonas climáticas no Brasil   | 29 |
| 6  | Repartição das precipitações no Brasil   | 30 |
| 7  | Medida do Índice de Oscilação Sul (IOS) e períodos ENOS  | 31 |
| 8  | Índice de Oscilação Sul de 1876 a 2003   | 31 |
| 9  | Manifestação dos eventos de El Niño e La Niña pelo fenômeno de aquecimento das águas do Pacífico e suas conseqüências sobre os continentes América do Sul e Indonésia. | 32 |
| 10 | Impacto do fenômeno do El Niño.  | 32 |
| 11 | Impacto do evento La Niña  | 33 |
| 12 | Impactos causados pelo ENOS negativo no Brasil de 1997 a 1998 com diversas conseqüências   | 34 |
| 13 | Valores mensais do (IOS) Índice de Oscilação Sul, de fevereiro de 2001 a dezembro de 2003  | 34 |
| 14 | Insolação e temperatura do ar no reservatório da UHE de Barra Bonita, no período de 1998 a 2000  | 36 |
| 15 | Radiação solar no reservatório da UHE Carlos Botelho no período de 1979 a 1999.  | 37 |
| 16 | Temperatura média do ar em função dos meses do ano no reservatório da UHE Carlos Botelho 1979 a 1999   | 37 |
| 17 | Temperatura média em função dos meses do ano no reservatório da UHE de Tucuruí, no período de 1971 a 1979  | 38 |
| 18 | Precipitação nos anos de 1983 a 2003 em função dos meses do ano no reservatório da UHE de Barra Bonita   | 38 |
| 19 | Precipitação em função dos meses do ano no reservatório da UHE Carlos Botelho de 1979 a 1999   | 39 |
| 20 | Precipitação no reservatório de Tucuruí em função dos meses do ano de 1971 a 1979  | 39 |

|   |    |
|---|----|
| 21 Velocidade do vento acumulada em função dos meses do ano no reservatório da UHE de Barra Bonita de 1992 a 1994   | 40 |
| 22 Velocidade de ventos no reservatório da UHE Carlos Botelho em função dos meses do ano de 1979 a 1999   | 40 |
| 23 Velocidade de vento no reservatório de Tucuruí em função dos meses do ano em 1987.   | 41 |
| 24 Hidrologia no reservatório da UHE de Barra Bonita de 2001-2003   | 41 |
| 25 Hidrologia no reservatório da UHE de Tucuruí de 2001-2003  | 42 |
| 26 Tempo de retenção e precipitação no reservatório da UHE de Barra Bonita  | 42 |
| 27 Parâmetros (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório em 12 de janeiro de 1984, da UHE de Barra Bonita e (A) imagem de satélite do período.                               | 44 |
| 28 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em fevereiro de 1984 da UHE de Barra Bonita e (A) imagem de satélite não disponível.                              | 45 |
| 29 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em março de 1984, da UHE de Barra Bonita e (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano                | 46 |
| 30 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em abril de 1984, da UHE de Barra Bonita e (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano não disponível | 47 |
| 31 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em abril de 1984, da UHE de Barra Bonita e (A) imagem de satélite relativa ao mesmo                               |    |

- período do ano não disponível. 48
- 32 Parâmetros: (B) estabilidade e temperatura da água, (C) resistência térmica a circulação sendo nula, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em junho de 1984, da UHE de Barra Bonita e (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano. 49
- 33 Parâmetros: (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em julho de 1984, da UHE de Barra Bonita. 50
- 34 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em agosto de 1984, da UHE de Barra Bonita. (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano não disponível 51
- 35 Parâmetros: (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório em setembro, de 1983 da UHE de Barra Bonita. 52
- 36 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em outubro de 1983, da UHE de Barra Bonita. (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano não disponível. 53
- 37 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em novembro de 1983, da UHE de Barra Bonita. (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano. 54
- 38 Parâmetros: (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano, (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e

- temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório em dezembro de 1983 da UHE de Barra Bonita. 55
- 39 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 12/06/1995, no reservatório da UHE Carlos Botelho do Lobo-Broa 56
- 40 Trabalho do vento temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 14/06/1995, no reservatório da UHE Carlos Botelho do Lobo-Broa 57
- 41 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 2/10/1995, no reservatório da UHE Carlos Botelho do Lobo-Broa 59
- 42 Trabalho do vento e temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 4/10/1995, no reservatório da UHE Carlos Botelho do Lobo-Broa 60
- 43 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 6/03/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho do Lobo-Broa 61
- 44 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 7/03/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho do Lobo-Broa 62

- 45 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 8/03/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho do Lobo-Broa 63
- 46 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 28/05/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho do Lobo-Broa 64
- 47 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 11/09/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho do Lobo-Broa 66
- 48 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 12/09/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho do Lobo-Broa 67
- 49 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 11/12/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho do Lobo-Broa 68
- 50 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação (C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em janeiro de 1986 69
- 51 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação (C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em fevereiro de 1986 70
- 52 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e

|   |    |
|---|----|
| resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade,<br>no reservatório de Tucuruí em março de 1986   | 70 |
| 53 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e<br>resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade,<br>no reservatório de Tucuruí, em abril de 1986        | 71 |
| 54 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e<br>resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade,<br>no reservatório de Tucuruí, em maio de 1986         | 72 |
| 55: Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e<br>resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade,<br>no reservatório de Tucuruí, em junho de 1986       | 72 |
| 56 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e<br>resistência térmica a circulação(C) em função da profundidade,<br>no reservatório de Tucuruí, em julho de 1986        | 73 |
| 57 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e<br>resistência térmica à circulação (C) em função da<br>profundidade, no reservatório de Tucuruí, em agosto de 1986      | 74 |
| 58 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e<br>resistência térmica à circulação (C) em função da<br>profundidade, no reservatório de Tucuruí, em setembro de<br>1986 | 74 |
| 59 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e<br>resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade,<br>no reservatório de Tucuruí, em outubro de 1986      | 75 |
| 60 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e<br>resistência térmica à circulação (C) em função da<br>profundidade, no reservatório de Tucuruí, em novembro de<br>1986 | 76 |
| 61 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e<br>resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade,<br>no reservatório de Tucuruí, em dezembro de 1986     | 76 |
| 62 Conteúdo de calor nos três reservatórios indicando o reservatório<br>da UHE Carlos Botelho com o menor índice de calor   | 78 |

|  |    |
|--|----|
| 63 Trabalho do vento nos três reservatórios ilustrando o reservatório de Tucuruí como o de maior variação de trabalho de vento   | 79 |
| 64 Estabilidade nos três reservatórios   | 80 |
| 65 Resistência térmica à circulação nos três reservatórios   | 81 |
| 66 Flutuações das variáveis químicas no reservatório da UHE de Barra Bonita  | 82 |
| 67 Parâmetros biológicos( clorofila, produção primária, diversidade, riqueza e fitoplâncton) no reservatório da UHE de barra Bonita  | 82 |
| 68 Flutuação de fitoplâncton no reservatório da UHE de Barra Bonita, no período de janeiro a dezembro de 1992.   | 83 |
| 69 Distribuição de zooplâncton no reservatório da UHE de Barra Bonita, no periodo de janeiro a dezembro de 1992-1993.  | 84 |
| 70 Estado trófico no reservatório da UHE de de Barra Bonita em função de TP, clorofila no verão e inverno com seus coeficientes de correlação e coeficiente de determinação. | 84 |
| 71 Distribuição dos nutrientes no reservatório da UHE Carlos Botelho em função dos meses do ano.   | 85 |
| 72 Flutuação de fitoplâncton, <i>chlorophyta</i> e <i>chrysophyta</i> em função dos meses do ano no reservatório da UHE Carlos Botelho de março de 1972 a janeiro de 1973.   | 86 |
| 73 Distribuição da abundância da classe de fitoplâncton no reservatório da UHE Carlos Botelho, em out de 1990  | 86 |
| 74 Distribuição da abundância da classe de fitoplâncton no reservatório da UHE Carlos Botelho, em Janeiro de 1991  | 87 |
| 75 Distribuição da abundância de fitoplâncton no reservatório da UHE Carlos Botelho em junho de 1991   | 87 |
| 76 Variação percentual das classes de fitoplâncton no reservatório da UHE Carlos Botelho   | 88 |
| 77 Densidade das classes de fitoplâncton no reservatório da UHE Carlos Botelho   | 88 |
| 78 Índice de Estado Trófico em função da concentração de clorofila em out 90 em Carlos Botelho   | 89 |
| 79 Índice de Estado Trófico em função da concentração de clorofila   |    |

|  |     |
|--|-----|
| jan 91 em Carlos Botelho.  | 89  |
| 80 Índice de Estado Trófico em função da concentração de clorofila em jun 91 em Carlos Botelho   | 90  |
| 81 Variação de ciclo biogeoquímico no período estiagem e período chuvoso reservatório da UHE de Tucuruí em 1987.                           | 90  |
| 82 Variação de ciclo biogeoquímico no reservatório de Tucuruí  | 91  |
| 83 Variação do Índice de Estado Trófico do reservatório de Tucuruí em função da concentração de clorofila                                  | 92  |
| 84 Variação do Índice de Estado Trófico e concentração de clorofila em função do período chuvoso e de estiagem, no reservatório de Tucuruí | 92  |
| 85 Índice de Estado Trófico do reservatório de Tucuruí em função da concentração de TN   | 92  |
| 86 Índice de Estado Trófico e concentração de fósforo total no reservatório de Tucuruí.  | 92  |
| 87 Parâmetros, pH, condutividade OD e turbidez em função da profundidade do reservatório de Barra Bonita                                   | 93  |
| 88 Variação do OD no reservatório da UHE Carlos Botelho  | 94  |
| 89 Comparação do número de Froude nos três reservatórios   | 95  |
| 90 Comparação dos números Wedderburn determinando o reservatório de Tucuruí como o de maior índice.  | 96  |
| 91 Comparação dos números Richardson nos três reservatórios  | 97  |
| 92 Comparação dos números de <i>Lake number</i> nos três reservatórios   | 98  |
| 93 Vazão no reservatório de Barra Bonita e IOS de 2001 a 2003  | 102 |
| 94 Chuva no reservatório de Barra Bonita e IOS de 2001 a 2003  | 103 |
| 95 Chuva em função de IOS com seus coeficientes de correlação e de determinação  | 103 |
| 96 Vazão em função de chuva com seus coeficientes de correlação e de determinação  | 103 |
| 97 Vazão em função de IOS com seus coeficientes de correlação e de determinação  | 103 |
| 98 Vazão em função de precipitação com seus coeficientes de correlação e de determinação   | 103 |

|   |     |
|---|-----|
| 99 Precipitação em função de Fi com seus coeficientes de correlação e de determinação   | 104 |
| 100 <i>Lake number</i> em função de vento com seus coeficientes de correlação e de determinação                                 | 104 |
| 101 Variação da diversidade biológica em função de vazão vertida com seus coeficientes de correlação e de determinação          | 106 |
| 102 Variação do PTD em função de vazão turbinada, com seus coeficientes de correlação e de determinação                         | 106 |
| 103 Variação do PTD em função vazão vertida, com seus coeficientes de correlação e de determinação                              | 106 |
| 104 Variação da P total em função de vazão de entrada, com seus coeficientes de correlação e de determinação                    | 106 |
| 105 Coeficientes de determinação e coeficientes de correlação.  | 107 |
| 106 Variação do Índice de Estado Trófico em Tucuruí em função de clorofila e seus coeficientes de correlação e de determinação. | 108 |
| 107 Variação do Índice de Estado Trofico em função dos meses do ano no reservatório de Tucuruí                                  | 108 |
| 108 Vazão do reservatório de Tucuruí em função de IOS com seus coeficientes de correlação e de determinação                     | 108 |
| 109 Chuva no reservatório de Tucuruí em função da intensidade do IOS e seus coeficientes de correlação e de determinação        | 108 |
| 110 Vazão em função da precipitação com seus coeficientes de correlação e de determinação                                       | 109 |
| 111 Precipitação em função Froude com seus coeficientes de correlação e de determinação   | 109 |
| 112 Correlação <i>Lake number</i> e velocidade do vento   | 109 |
| 113 Vazão em função de Fi com seus coeficientes de correlação e de determinação   | 109 |
| 114 Regressão e correlação entre CO <sub>2</sub> no período de estiagem e no período chuvoso no reservatório de Tucuruí.        | 110 |
| 115 Regressão e correlação entre concentração fosfato no reservatório de Tucuruí  | 110 |
| 116 Série de tempo hipotético para um ecossistema sensível às   |     |

|   |     |
|---|-----|
| influências químicas, físicas, biológicas, climatológicas, hidrológicas e antrópicas  | 124 |
| 117 Funcionamento do reservatório da UHE de Barra Bonita ao longo do ano nas diferentes estações, com as respectivas ocorrências das principais famílias de fitoplâncton, os teores de nutrientes e o comportamento por período               | 126 |
| 118 Funcionamento do reservatório da UHE de Carlos Botelho (Lobo-Broa) ao longo do ano nas diferentes estações, com as respectivas ocorrências das principais famílias de fitoplâncton, os teores de nutrientes e o comportamento por período | 127 |
| 119 Ciclo sazonal de vento e número de células de <i>Aulacoseira itálica</i> no reservatório da UHE de Carlos Botelho, por Lima <i>et al.</i> (1978)  | 128 |
| 120 Modelo de reação dos reservatórios aos diferentes fatores externos e internos   | 129 |

**LISTA DE TABELAS**

|   |     |
|---|-----|
| 1 Índice de Carlson modificado por Kratzer e Brezonik (1981)  | 22  |
| 2 Características morfométricas dos três reservatórios  | 26  |
| 3 Valores de conteúdo de calor dos três reservatórios com seus valores médios, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação                                 | 77  |
| 4 Valores do trabalho do vento nos três reservatórios com seus valores médios, desvio padrão, variância e coeficiente de variação                                 | 78  |
| 5 Valores da estabilidade nos três reservatórios com seus valores médios, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação                                      | 80  |
| 6 Valores da resistência térmica a circulação nos três reservatórios com seus valores-médios, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação                  | 81  |
| 7 Valores do número de Froude (Fo) nos três reservatórios com seus valores médios, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação                             | 94  |
| 8 Valores dos números adimensionais de Wedderburn e Richardson nos três reservatórios, com seus valores médios, desvio-padrão variância e coeficiente de variação | 96  |
| 9 Valores do <i>Lake number</i> dos três reservatórios com seus valores médios, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação                                | 97  |
| 10 Correlação significativa entre características físicas e nutrientes, no reservatório da UHE de Barra Bonita  | 104 |
| 11 Correlação significativa entre números adimensionais e nutrientes no reservatório da UHE de Barra Bonita   | 104 |
| 12 Correlação entre fatores biológicos e números adimensionais e características físicas do reservatório da UHE de Barra Bonita.                                  | 104 |
| 13 Correlação entre parâmetros hidrológicos e nutrientes no reservatório da UHE de Barra Bonita   | 105 |
| 14 Correlação entre fatores operacionais do reservatório, nutrientes, IOS de  |     |

|   |     |
|---|-----|
| 1998 a 2000 na UHE de Barra Bonita  | 105 |
| 15 Correlação entre nutrientes, números adimensionais e características físicas no reservatório da UHE Carlos Botelho | 106 |
| 16 Correlação entre Fitoplâncton , temperatura da água em Carlos Botelho  | 107 |
| 17 Correlação entre os nutrientes no período de estiagem e no período chuvoso no reservatório da UHE de Tucuruí       | 109 |
| 18 Correlação entre fatores biológicos, conteúdo de calor   | 111 |
| 19 Resumo de todos os parâmetros estudados nos três reservatórios   | 111 |
| 20 Correlação entre hidrologia/ climatologia  | 112 |
| 21 Correlação entre nutrientes e números adimensionais  | 112 |
| 22 Correlação entre fatores físicos, nutrientes, fitoplâncton   | 113 |
| 23 Correlação entre fatores internos, ao reservatório   | 114 |
| 24 Correlação entre fitoplâncton, números adimensionais   | 114 |
| 25 Índice de Estado Trófico   | 115 |

## LISTA DE ABREVIACÃO

|                   |                          |
|-------------------|--------------------------|
| Con. Cal          | Conteúdo de calor        |
| B                 | trabalho do vento        |
| S                 | Estabilidade             |
| RT                | Tempo de retenção        |
| Prec              | Precipitação             |
| Nit. Tot.         | Nitrogênio total         |
| Q tu              | Vazão Tucuruí            |
| Tur.              | Turbidez                 |
| Qv                | Vazão vertida            |
| Qtot              | Vazão total              |
| Fos to            | Fósforo total            |
| Correl            | Correlação               |
| Q                 | Vazão                    |
| CH                | Chuva                    |
| Cla               | Clorofila a              |
| N-NH <sub>4</sub> | Nitrogênio               |
| Fosf in           | Fosfato inorgânico       |
| PTD               | Fósforo total dissolvido |
| TP                | Fósforo total            |
| IOS               | Índice de Oscilação Sul  |
| Ab                | Área da Bacia            |
| Av                | Volume do reservatório   |
| V                 | Volume                   |

## LISTA DE SÍMBOLO

|                  |  |
|------------------|--|
| $\rho_{t_2}$     | a densidade da água a temperatura $t_2$                        |
| $\rho_{t_1}$     | a densidade da água a temperatura $t_1$                        |
| $\rho_{H_2O(4)}$ | a densidade da água a temperatura de 4°                        |
| $\rho_{H_2O(5)}$ | a densidade da água a temperatura de 5°C                       |
| Ao               | a área da superfície do reservatório                           |
| Az               | a área em $\text{cm}^2$ a uma profundidade Z                   |
| Z                | a profundidade considerada positiva e em centímetro            |
| RTC              | Resistência Térmica a Circulação                               |
| B                | Trabalho do vento  |
| $\bar{\rho}$     | a densidade média ou final                                     |
| Zo               | a superfície do reservatório                                   |
| Z <sub>d</sub>   | dada pela profundidade em (cm) e onde encontra-se $\bar{\rho}$ |
| S                | Estabilidade   |
| IET              | Índice de Estado Trófico                                       |
| $u_*^2 L$        | a força aplicada pelo vento sobre a superfície de água;        |
| L                | comprimento do reservatório(m)                                 |
| $g'h^2$          | a força de pressão baroclínica máxima no ponto do “upwelling   |
| $g'$             | Força de gravitação reduzida                                   |
| $g$              | Força de gravitação  |
| $\Delta d/d$     |  |
| h                | a altura da camada de mistura                                  |
| $u^2$            | Velocidade do vento  |
| $\rho_{ar}$      | a densidade do ar a uma dada temperatura                       |
| $\rho_{H_2O}$    | a densidade de água  |
| v.               | a velocidade do vento (m/s),                                   |
| C <sub>d</sub>   | = 0,0014   |
| H                | a profundidade total   |
| L(H)             | o centro do volume   |
| h                | a distância do meio do metalímnio à superfície do lago         |

|           |                      |
|-----------|----------------------|
| $F_i/F_o$ | Número de Froude     |
| $Q_s$     | o fluxo de saída     |
| Ri        | Número de Richardson |
| W         | Número de Wedderburn |
| LN        | Lake Number          |

|   |      |
|---|------|
| <b>SUMÁRIO</b>  |      |
| <b>RESUMO</b>   | V    |
| <b>ABSTRACT</b>   | VI   |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b>   | VII  |
| <b>LISTA DE TABELAS</b>   | XVII |
| <b>LISTA DE ABREVIACÃO</b>  | XIX  |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>  | XX   |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>   | 1    |
| <b>1.1 Revisão bibliográfica</b>  | 1    |
| <b>1.2 Objetivo geral</b>   | 11   |
| <b>1.3 Objetivos específicos</b>  | 11   |
| <b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b>   | 12   |
| <b>2.1 Características dos reservatórios</b>  | 12   |
| <b>2.2 Metodologia do trabalho</b>  | 17   |
| 2.2.1 Estudos climatológicos  | 18   |
| 2.2.2 Características físicas   | 19   |
| 2.2.3 Características biológicas  | 21   |
| 2.2.4 Números adimensionais   | 22   |
| 2.2.5 Comportamento dos reservatórios   | 25   |
| <b>3 RESULTADOS e DISCUSSÃO</b>   | 26   |
| <b>3.1 Estudos morfométricos, hidrológicos, climatológicos e geográficos dos três reservatórios</b>                           | 26   |
| <b>3.2 Estudos Climatológicos</b>   | 29   |
| 3.2.1 Ocorrência dos fenômenos do El Niño/ La Niña  | 31   |
| 3.2.2 Estudos dos fatores climatológicos nos reservatórios  | 36   |
| 3.2.3 Estudos hidrológicos  | 41   |
| 3.2.4 Tempo de retenção   | 42   |
| <b>3.3 Estudos limnológicos</b>   | 43   |
| 3.3.1 Limnologia física: perfil térmico, resistência térmica à circulação, estabilidade e trabalho do vento Barra Bonita      | 43   |
| 3.3.2 Limnologia física: perfil térmico, resistência térmica à circulação, estabilidade e trabalho do vento de Carlos Botelho | 56   |
| 3.3.3 Limnologia física: perfil térmico, resistência térmica à circulação,  |      |

|  |            |
|--|------------|
| estabilidade e trabalho do vento no reservatório de Tucuruí  | 69         |
| 3.3.4 Estudo comparativo das características físicas dos três reservatórios                            | 77         |
| <b>3.4 Caracterização biológica</b>  | <b>82</b>  |
| 3.4.1 Distribuição dos parâmetros biológicos, nutrientes no reservatório de Barra Bonita               | 82         |
| 3.4.2 Índice de estado trófico do reservatório da UHE Barra Bonita                                     | 84         |
| 3.4.3 Distribuição dos parâmetros biológicos, nutrientes no reservatório em Carlos Botelho (Lobo-Broa) | 85         |
| 3.4.4 Índice de estado trófico do reservatório da UHE Carlos Botelho                                   | 89         |
| 3.4.5 Distribuição dos parâmetros biológicos, nutrientes no reservatório em Tucuruí                    | 90         |
| 3.4.6 Índice de Estado Trófico da UHE Barra Bonita   | 92         |
| <b>3.5 Parâmetros físico-químicos</b>  | <b>93</b>  |
| 3.5.1 Parâmetros físico-químicos em Barra Bonita   | 93         |
| 3.5.2 Parâmetros físico-químicos em Carlos Botelho   | 94         |
| <b>3.6 Os números adimensionais</b>  | <b>94</b>  |
| <b>3.7 Estudo das correlações e regressões</b>   | <b>102</b> |
| <b>3.8 Estudo integrado de todos os parâmetros</b>   | <b>111</b> |
| <b>3.9 Representação hipotética dos reservatórios sob a ação dos diferentes fatores estudados</b>      | <b>124</b> |
| <b>4 MODELO TEÓRICO /PRÁTICO DO COMPORTAMENTO DOS RESERVATÓRIOS</b>                                    | <b>124</b> |
| 4.1 No reservatório da UHE de Barra Bonita   | 126        |
| 4.2 No reservatório da UHE Carlos Botelho (Lobo-Broa)  | 127        |
| 4.3 No reservatório da UHE de Tucuruí  | 128        |
| <b>5 GERENCIAMENTO DE RESERVATÓRIOS</b>  | <b>137</b> |
| <b>6 CONCLUSÃO</b>   | <b>139</b> |
| <b>7 RECOMENDAÇÕES</b>   | <b>141</b> |
| <b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>  | <b>142</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Revisão bibliográfica

A água apresenta um papel multifuncional de acordo como seus diferentes estados, o que a faz presente em todas as atividades e todos os meios. Em compostos orgânicos e químicos, ela assume a função de solvente e tem o papel regulador nos diversos ecossistemas e, na área da produção hidrelétrica e da engenharia de pesca, é a matéria-prima para a produção de energia e de organismos aquáticos. Em cada uma das áreas de aplicação, ela requer certa exigência quanto à sua qualidade e à sua quantidade. Para o aproveitamento hidrelétrico, por exemplo, é imprescindível o barramento dos cursos dos rios com o intuito de armazenar uma quantidade suficiente de água em reservatórios para o uso, em seguida, na produção de energia elétrica. Com a formação desses corpos lânticos, observa-se uma variação das condições climáticas da bacia, modificação do hábito das populações, um impacto notável sobre a composição e distribuição dos parâmetros biológicos do corpo de água resultante da sua produtividade. Como consequência, constatam-se efeitos negativos referentes à qualidade das águas dos reservatórios a jusante. Esses parâmetros dos mananciais seguem então uma evolução desde a formação até à sua estabilidade, um equilíbrio com níveis de qualidade compatíveis, em quase sua totalidade, com aqueles previstos na Legislação CONAMA 20, que trata da classificação dos corpos de água para seus diversos fins. Um dos aspectos mais importantes é o de atender a requisitos de qualidade e quantidade adequadas ao consumo pela população, com a finalidade de garantir a manutenção da sua saúde e preservar o ecossistema terrestre (DUARTE *et al.*, 2001).

No final do século XX, os problemas causados pela falta de água foram enfatizados por pesquisadores, imprensa nacional e internacional. Neste sentido, a escassez pode levar à guerra pela água (OTÁVIO, 1995). Naquele ano, em entrevista, o consultor da Organização das Nações Unidas, Norman Meyers, afirmou que 250

milhões de pessoas em 26 países enfrentam falta de água e que até os anos 2025 esse número atingirá 3 bilhões, em 52 países. No mesmo diário, foi publicada uma série de conflitos por água em diversos países, entre eles, o conflito entre o México e os Estados Unidos a respeito do rio Grande, na divisa dos dois países. Além destes problemas, a poluição doméstica, industrial e agrícola está comprometendo os recursos hídricos do Planeta.

Um dos objetivos para o armazenamento de recursos hídricos por intermédio da construção de barragem é a obtenção de um volume adequado para diversas utilizações, como garantir água para o consumo humano e a geração de energia.

No Brasil, as represas de maior volume foram construídas para o fornecimento de energia. A região de São Paulo se caracteriza como sendo a mais concentrada em construção de represas. Nesse Estado, somente o rio Tietê conta com uma série de reservatórios em cascata, com finalidade de produção hidrelétrica. Outros reservatórios, como o de Broa, desativado temporariamente para a produção de energia, constituem ambiente de pesquisa para os programas de pós-graduação das Universidades de São Paulo e Federal de São Carlos, local de lazer, de atividades econômicas como pesca, formando-se reservatórios urbanos. Nas últimas décadas, assistimos às construções de represas de tamanhos variados no mundo, como Kabora Bassa (Moçambique), Lago Powell (Estados Unidos), Lago Alto Volta (Gana) e Lago Nassa (Egito). O Brasil destaca-se com as de Sobradinho (BA), com uma área de inundação de 4.214 km<sup>2</sup>, de Tucuruí (PA), com área estimada de 2.430 km<sup>2</sup> no norte do Brasil, no rio Tocantins, projetada para uma vazão máxima de 68.000 m<sup>3</sup>/s e uma vazão no vertedouro de 100.000 m<sup>3</sup>/s. No seu total funcionamento, a represa de Tucuruí conta com 12 turbinas, cada uma com vazão de 576 m<sup>3</sup>/s e 23 vertedouros, sendo hoje uma das maiores hidrelétricas do Brasil (PINTO, 2002). Além destas, há outras como a de Balbina (AM), com uma área de 2.360 km<sup>2</sup>, Furnas (MG), com 1.340 km<sup>2</sup>; Salto Santiago (PR), com 208 km<sup>2</sup>; Itaipu (PR), com 1.350 km<sup>2</sup>, Porto Primavera (SP/MS), com 2.140 km<sup>2</sup>; Xingó (SE/AL), com 60 km<sup>2</sup>, Barra Bonita (SP), com 334 km<sup>2</sup> etc. (SPERLING, 1999). Com o barramento dos cursos dos rios, observou-se, além dos impactos causados pela inundação, uma alteração das condições climáticas locais. O monitoramento então tornou-se uma preocupação constante dos gestores desses reservatórios, como forma de minimizar os impactos, propondo ações mediadoras. Com esta finalidade, vários trabalhos e pesquisas reunidos em coletâneas de livro foram publicados por pesquisadores, como Tundisi, Bicudo e Matsumura-Tundisi (1995), IETC (2001),

Henry (1999a), Tundisi e Saijo (1997), Tundisi e Straškraba, (1999), Tundisi (1988). Apesar destes esforços, o entendimento de todos os parâmetros de qualidade de água dos reservatórios resulta de uma complexidade de relações entre os diferentes parâmetros morfométricos do reservatório e os fatores climáticos, a influência da bacia hidrográfica, a ação antropogênica e o funcionamento da barragem em si. Um parâmetro indispensável neste processo está relacionado aos movimentos de água associados às turbulências, e que tem sido desprezado na maioria das investigações, como mencionam Wetzel e Likens (1979).

No contexto da qualidade da água, muitas questões foram discutidas (TUNDISI e MATHEUS, 1987; TUNDISI e MATSUMURA-TUNDISI, 1990). Neste caso, a eutrofização ocupa um lugar privilegiado, visto que, de toda a água do globo, somente 3% são água doce distribuída entre as águas superficiais e subterrâneas.

Soluções teóricas e práticas foram sugeridas por Jorgensen *et al.* (1981), Vollenweider (1982), Straškraba (1985, 1986 e 1999) e Tundisi (1997). Este fenômeno, com seus efeitos de ordem econômica e social, compromete a disponibilidade dos recursos hídricos, além de causar conseqüências diversas, como alterações substanciais na estrutura das redes alimentares, modificação da composição de espécies da biota aquática e da biodiversidade do meio aquático. Outras conseqüências notáveis são a superprodução de algas e macrófitas aquáticas em corpos de água, podendo comprometer a gestão e o manejo de água potável; corrosão de equipamentos hidrelétricos; transtornos nos processos de tratamento; redução do conteúdo de oxigênio; acúmulo de amônia na coluna de água e depósito de certos metais (Fe, Mg) no sedimento em condições anoxias, influenciando diretamente o gerenciamento do reservatório (STRAŠKRABA, 1999). O efeito mais grave desse fenômeno é o possível impacto na saúde humana, em razão das substâncias tóxicas oriundas das algas cianofíceas. De certa forma, isso afeta outros setores da economia, como o turismo, a navegação, o abastecimento humano e a piscicultura (TUNDISI, 2001). No caso do desenvolvimento exagerado das comunidades fito e zooplancônicas ao longo do eixo horizontal do reservatório, tal fenômeno é causado pelo fosfato e pela amônia, segundo Matsumura-Tundisi *et al.* (1989) e Armengol *et al.* (1999).

Para Chalar e Tundisi (2001), é fundamental utilizar vários índices de estado trófico, como o de US (1974), Carlson (1977), OECD (1982), e Salas e Martino (1991), para caracterizar mais adequadamente o estado do ecossistema aquático em função da carga de nitrogênio e fósforo, embora variem espacial e temporalmente.

Segundo Henry e Tundisi, (1988) e Henry *et al.* (1997), a identificação do fenômeno é feita por meio de processos de enriquecimento e de medidas da biomassa, da sucessão de espécies durante o experimento. Eles concluíram que, para lagos naturais, provavelmente o nitrato seja o principal fator limitante nos trópicos e, para reservatórios com elevado "input" de nitrato, o fósforo seja o fator limitante crítico.

O desenvolvimento das atividades humanas e agrícolas na bacia hidrográfica contribui para o aumento das concentrações de nutrientes nas represas por escoamento superficial.

Todos estes aspectos tornam a qualidade da água tema ainda longe de ser esgotado, em razão do uso múltiplo e do dinamismo dos reservatórios.

No Brasil, o tema foi estudado por Tundisi e Matheus (1987), Tundisi e Matsumura-Tundisi (1990), introduzindo um novo conceito de gerenciamento de recursos hídricos com ênfase nos lagos e represas (STRAŠKRABA e TUNDISI, 2000; TUNDISI, 2001). Outro aspecto da questão, utilizado por Tundisi e Matsumura-Tundisi (1995) e Henry e Barbosa (1989), é relacionado às características físicas e morfológicas que afetam a qualidade da água em diferentes reservatórios naturais e artificiais.

A qualidade da água nos reservatórios depende também dos fatores geológicos, como a litologia dos tributários, o tipo de solo, a topografia e os usos e ocupações da bacia hidrográfica (SABATER *et al.*, 1990; WHITFIELD, 1983). Com relação ao aspecto físico, Armengol *et al.* (1999) relataram que a estabilidade dos reservatórios é um fator importante na qualidade da água e varia de acordo com a morfologia, as flutuações de temperatura do ar e as condições climatológicas. Assim como em reservatórios com baixa influência de vento, a mistura do epilímnio com o hipolímnio acontece em virtude do resfriamento causado pela entrada da água do rio.

A configuração morfológica do ambiente aquático é um dos parâmetros que influenciam os padrões de mistura da coluna de água conforme as características físicas do ambiente (STRAŠKRABA e TUNDISI, 2000).

Os ciclos hidrológicos, conseqüências da variabilidade climática, têm uma importância nos regimes dos rios e dos reservatórios, caracterizando-se pelas flutuações de níveis de água, variação de vazão, da composição química e física da água e na formação dos gradientes horizontais e verticais nos reservatórios. Matsumura - Tundisi *et al.* (1997) afirmaram que a distinção desses gradientes decorre da intrusão das águas dos rios nos compartimentos verticais que se formam ao longo da represa, resultando em um deslocamento horizontal.

Os rios, sendo corpos dinâmicos sensíveis à flutuação da temperatura do ar, terão influência direta sobre a estrutura do reservatório pelas suas entradas progressivas de água (KENNEDY e WALKER, 1990; KIMMEL *et al.* 1990) e também pelas precipitações pluviométricas, como menciona Tundisi (2001).

As alterações na estrutura vertical do reservatório são conseqüências das descargas de rios em virtude de precipitações pluviométricas no verão e da incidência de vento no período seco (CHALAR e TUNDISI, 1999). No mesmo sentido, Sperling (1999), referindo-se à temperatura da água, acentuou que, ao longo da coluna de água, as temperaturas tornam-se semelhantes, com pequenas variações afetando as camadas superiores. A massa de água apresenta uma densidade aproximadamente uniforme, sujeita a qualquer força externa e provocando uma circulação capaz de superar a fraca estabilidade da coluna da água.

A estabilidade persiste no período de verão em virtude das entradas das águas de densidades diferentes e dos ventos de verão, não sendo fortes suficientemente, favorecendo a criação de uma estabilidade (S) do reservatório. O valor de S aumenta quando o reservatório se torna mais estratificado, e quantifica também a resistência dessa estratificação à disrupção pelo vento e, portanto, o grau com o qual o hipolimnion fica isolado dos movimentos epilimnéticos e superficiais é influenciado pelas dimensões e morfometria do reservatório.

Não é sempre a diferença de densidade que regula a estratificação nos lagos. Outros fenômenos, como indução térmica, modificação de salinidade, matéria orgânica dissolvida e aquecimento, favorecem algumas misturas de água da superfície com a de profundidades (WETZEL, 1993).

Nos lagos, o aquecimento pelo sol e a ação dos ventos sobre a superfície criam diferentes correntes horizontais e verticais na massa líquida. Em pequenos corpos hídricos, com pequenas profundidades, a estratificação ocorre quando o sistema está protegido contra a ação do vento.

De acordo com Straškraba (1999), a mudança da qualidade da água do reservatório pode ocorrer como conseqüência do aumento do tempo de residência, da diminuição da vazão, causando forte estratificação e desenvolvimento de uma camada profunda anoxia. Neste contexto, Matmusura-Tundisi *et al.*(1997) constataram que o tempo de retenção da represa é um fator controlador da produção primária e dos ciclos de fitoplâncton. Segundo Sperling (1999), a dinâmica de circulação e estratificação do

corpo de água é o principal fator que regula a distribuição de substâncias e de organismos na massa líquida, por isso, então, a necessidade de um estudo aprofundado do comportamento desses processos físicos. Para Salençon e Thebault (1997), as circulações criadas são ligadas à temperatura e à densidade do fluido, que dependem da pressão hidrostática.

A maioria dos lagos temperados e subtropicais, com exceção dos pouco profundos, desenvolve anualmente uma estratificação térmica (YOSHIMURA, 1936; HUTCHINSON, 1957). A coluna de água morna é claramente segregada em epilímnio, metalímnio e hipolímnio pela diferença de densidade produzida pelo calor da superfície do lago como fonte de energia.

As estações do ano influenciam direta ou indiretamente a qualidade da água, fornecendo energia para o fenômeno da fotossíntese. A energia recebida torna-se mais ativa quanto maior for o espelho de água receptora da luz solar.

Os reservatórios funcionam a partir de variáveis climáticas, como vento, pressão barométrica e temperatura, sem interferência de entrada de energia e material a partir do rio. A distribuição vertical dos organismos no reservatório depende da interação das forças atuantes, como o vento, dos fatores físicos e químicos no período e da estrutura estratificada. O funcionamento destes sistemas está relacionado ao isolamento, circulações e estratificação verticais que influenciam a distribuição de organismos planctônicos (TUNDISI *et al.*, 1999).

Os ventos são conseqüências de deslocamento de massa de ar, com temperatura, umidade e pressão diferentes de alta pressão para os de baixa pressão. Ao longo do ano, deslocam-se entre o oceano Atlântico e a América do Sul, tendo como principal conseqüência a determinação do clima no Brasil. No verão, esses centros encontram-se no oceano, e, no inverno, sobre o continente. O encontro de duas massas de ar com a temperatura e pressão diferentes cria uma zona de instabilidade chamada de frente, sistema organizado cujo deslocamento provoca abundantes chuvas, caracterizadas por intensidade e a duração.

Existem duas principais correntes de jato distintas (REITER, 1969; RIEHL, 1969). Uma delas é a Corrente de Jato Polar, associada ao forte gradiente horizontal de temperatura que ocorre nas estreitas zonas frontais, localizando-se no lado equatorial destas. Esse jato encontra-se geralmente entre as latitudes de 35° S e 70° S. A sua posição é mais próxima do equador durante o inverno. A outra corrente, Jato

Subtropical, está associada à circulação da Célula de Hadley e geralmente fica localizada no limite polar dessa célula, entre as latitudes de 20° S e 35° S. Esta corrente é mais regular e sua posição média muda em direção ao equador no período de inverno e em direção aos pólos no verão (PEZZI *et al.*, 2003). A importância da Corrente de Jato é ressaltada em Browning (1985), que associa a ela alguns casos de precipitação pluviométrica. Kousky e Cavalcanti (1984) relacionaram o padrão do escoamento em altos níveis a um bloqueio ocorrido na América do Sul durante o evento ENOS, de 1983, ressaltando o papel do Jato Subtropical nas intensas precipitações pluviométricas sobre a região Sul (CHU, 1985). As análises sazonais, interanuais e climatológicas para o escoamento atmosférico realizadas por Pezzi *et al.* (2003), com a finalidade de observar o comportamento sazonal e interanual da Corrente de Jato Polar e Jato Subtropical para a América do Sul nos diferentes períodos, revelaram que nos meses de verão o Jato Subtropical praticamente desaparece, prevalecendo o Jato Polar ou Extratropical. Em alguns casos, pode ocorrer a associação entre os jatos subtropical e extratropical. Na América do Sul, em alguns casos, o jato associa-se à atividade convectiva que ocorre sobre o Peru e a Bolívia. Em janeiro de 1988, esse jato foi responsável por uma frontogênese sobre o norte de São Paulo, sendo que esse jato em média fica no hemisfério sul, situado entre as latitudes 40° S e 50° S, com ventos acima de 32 m/s (CLIMANÁLISE, 1988). Com relação aos meses de outono, o mesmo autor concluiu que o Jato Subtropical se apresentou bem definido e em processo de intensificação. Durante esse período, a sua intensidade ficou em média acima de 40 m/s, posicionado-se sobre o sul da América do Sul e oceano Atlântico, na faixa de latitude que vai de 30S a 40S. Portanto a pressão interna de jato subtropical influencia a pressão de centro de alta pressão e intensidade dos pontos de precipitação associados.

Os casos de precipitação estão associados às correntes de jato (KOUSKY e CAVALCANTE, 1984 apud Pezzi *et al.*, 2003). Como consequência, ressaltam-se intensas precipitações sobre a região sul com pouca influência do ponto de vista climatológico (CHU, 1985).

Outros fenômenos climáticos exercitam uma influência marcante sobre os corpos de água: são os eventos El Niño Oscilação Sul (ENOS) e as correntes de jato. O ENOS, de acordo com Ropelewski e Haiper (1987; 1989) apud Marengo e Uvo (2003), ao examinar séries históricas de precipitação pluviométrica em estações bem

distribuídas sobre o Nordeste brasileiro, não encontraram tendências significativas de condições mais úmidas ou secas na região. As precipitações nessa região, no entanto, são bastante sensíveis a extremo de temperatura da superfície do mar no Pacífico equatorial associado ao ENOS. Com relação à influência sobre a vazão dos rios, não há uma correspondência linear entre a chuva e a vazão, afirmam, mas é correto assumir a idéia de que grande anomalias de precipitação resultam em anomalias de descarga de rio de mesmo sinal

Segundo Guyot *et al.* (2003), as perturbações do regime de precipitação alteram os regimes hidrológicos dos rios e existe uma boa correlação entre os índices de oscilação (ENOS) e os índices de vazão dos rios. No Nordeste brasileiro e na Amazônia, o El Niño de 1983 provocou uma queda de 16% das vazões anuais, enquanto que La Niña (1989) foi responsável pelo excedente de 14% da vazão anual.

Define-se como produção primária a produtividade fitoplanctônica representada pela síntese de matéria orgânica (WETZEL, 1993). Nos reservatórios a produção primária é intimamente ligada a vários fatores, como origem de formação e composição do terreno, da área de drenagem, o uso e ocupação da bacia hidrográfica. Além disso, um dos parâmetros de grande importância é a decomposição do material ou alóctone afogado durante a inundação. Como consequência do represamento, ocorre um aumento nas concentrações de fósforo e nitrogênio, transformando os sistemas de óxidos para anóxicos, com uma produção de amônia, redução de sulfeto e formação de metano (TUNDISI *et al.*, 1991). O monitoramento dos corpos de água oferece instrumento para avaliação da quantidade e qualidade das águas. Um deles, o Índice de Estado Trófico, é bastante utilizado e baseado nas concentrações de nitrogênio total, fósforo total, clorofila e profundidade do disco de Secchi é utilizado com sucesso em vários reservatórios temperados (OECD, 1982) e adaptado a reservatórios tropicais, utilizando-se de uma série histórica dos níveis de nutrientes fósforo, nitrato e clorofila (SALAS MARTINO, 1991).

Em sistema aquático lânticos pouco profundo, a sensibilidade da comunidade fitoplanctônica à concentração dos nutrientes constitui um índice característico do efeito da atividade humana nas redondezas (POPOVSKAYA, 2000). Anneville e Pelletier (1999), em estudo realizado no lago Geneva, considerado monomítico, determinaram uma concentração de fósforo  $10 \mu\text{gL}^{-1}$ , mas esta concentração aumentou durante os anos 1970 e o lago foi classificado como eutrófico, com base nesse parâmetro. A concentração de fósforo total atingiu um valor máximo de  $90 \mu\text{gL}^{-1}$  em 1979, em razão

do aumento da população humana, uso de detergente à base de fosfato e inadequado tratamento de esgoto. Nesse período, ocorreu um *bloom* de alga que teve um impacto negativo sobre o uso tradicional do lago. O fitoplâncton reage às mudanças ambientais, ocorrendo no lago pela formação e desenvolvimento dos corpos lênticos, podendo ser fortemente afetados pela descarga de lençol de água com alta concentração de nitrato e silicato reativo solúvel. De maneira geral, ocorre uma modificação das características do ecossistema de lótico para lêntico pelo aumento da quantidade de nutrientes à base de nitrogenados e fosfatados disponíveis no reservatório, tendo como origem a degradação da biomassa inundada. O fosfato também apresenta um gradiente crescente da superfície em direção ao fundo, com maior concentração nas imediações do barramento. A disponibilidade de nutrientes essenciais, como fosfato, nitrato e amônia, ocorreu em função dos processos de decomposição da vegetação inundada. O conhecimento da associação de espécies e/ou da clorofila são parâmetros importantes na avaliação da qualidade de água (POPOVSKAYA, 2000). Uma das manifestações da presença de nutrientes é o desenvolvimento de plantas aquáticas e de fitoplâncton. As primeiras podem ser representadas por *Scirpus sp*, *Salvinia sp*, *Pistia sp* e *Eichhornia sp*, ocorrendo no local em decorrência das condições físicas e do estado trófico da água. Reynolds (1994) argumentou que a associação de fitoplâncton e a abundância de espécies variam de acordo com o gradiente trófico e sazonal. Além disso, ficam aderidas às raízes dessas plantas aquáticas larvas de *Mansonia sp* e perífiton. Essas algas microscópicas, que também são encontradas nos troncos submersos da vegetação afogada, podem se constituir, juntamente com os detritos, um importante item alimentar nas cadeias tróficas no reservatório, que, por sua vez, é uma das principais bases da alimentação na cadeia trófica e fonte de nutrientes (TUNDISI *et al.*, 1993). A disponibilidade de nutrientes e suas relações com a produção primária são associadas a diferentes processos biogeoquímicos na coluna da água e dos sedimentos. O fitoplâncton tem um papel importante na regeneração de substâncias primárias, no fornecimento de índice de qualidade de água e como principal componente do ciclo biótico de lago (POPOVSKAYA, 2000).

O uso de associação de espécies pode ser importante para identificação do estado trófico. Assim, a *Cyclotella* e a *Merismopedia* são características de ambiente oligotrófico (REYNOLDS, 1994 e 1999); no entanto, *Straurodesmus*, *Pleurotaenium*, *Straurastum* e *Cosmarium* são dominantes em meio pobre em fósforo. Os meios

eutróficos em baixa latitude são dominados por *Aulacoseira granulata*. Antes dessas observações, Popovskaya (2000) constatou que, na baía Selega, o número de células de fitoplâncton aumentou oito vezes em média, e a biomassa cinco vezes. De acordo com esses níveis, ele concluiu que a baía Selega pode ser classificada como mesotrófica com propriedade de eutrofização. Já a produção de fitoplâncton na zona pelágica, no verão, é pobre em razão dos ventos fortes que ocorrem nas zonas afóticas (POPOVSKAYA, 2000), enquanto que as algas verde-azuis nesse ano apresentaram máximo desenvolvimento com o aquecimento da água e tempo calmo.

Estudos de Rieztler (1989) em reservatório raso apontaram um aumento de 50 % do teor de clorofila nos períodos de setembro/outubro de 1988 e julho/agosto de 1989, com maior representatividade das frações de menos de 20  $\mu\text{m}$ .

Na região Sudeste, o evento La Niña caracteriza-se pelo tempo de calmaria, vento reduzido, favorecendo o desenvolvimento de fitoplâncton, *bloom* de algas (POPOVSKAYA, 2000).

Em lagos eutróficos a biomassa fitoplanctônica do epilímnio atenua uma boa parte da luz subaquática e consome os nutrientes. O nutriente consumido pela produção primária é transportado para as camadas profundas para depósito. A decomposição de algumas destas matérias orgânicas no hipolímnio aumenta a concentração de nutrientes nesta camada e o consumo de oxigênio dissolvido. Durante o período quente, a camada hipolímnica torna-se anoxia.

A variação anual das temperaturas superficiais de um reservatório depende das condições geográficas, como a latitude, a altitude e tamanho do corpo hídrico, velocidade do vento, tendo uma consequência sobre os padrões de distribuição térmica. A variação desses parâmetros implica mudança da estratificação e, quando aumentam, a estratificação e a retenção de nutrientes também aumentam, ao contrário da carga, que diminui. As mudanças que ocorrem durante a estratificação produzem excessivo gradiente vertical de temperatura, nutriente e oxigênio dissolvido. Estes mudam as condições ambientais e metabolismo de energia da biota do lago.

Em período de temperatura mais elevada, ocorrem alta disponibilidade de nutrientes e estabilidade na coluna de água (STRAŠKRABA e TUNDISI, 2000). A estratificação térmica afeta as comunidades planctônicas de várias formas. Esta mudança influencia a luz subaquática e, conseqüentemente, a ecologia dos organismos fototróficos. A segregação de massa de água causa um gradiente vertical de nutriente e

oxigênio dissolvido, determinando a energia do metabolismo e a relação trófica de população e comunidade de plâncton.

A composição química das águas afeta a vida aquática existente no reservatório. Entradas de nutrientes aumentam a biomassa de algumas espécies de fitoplâncton e reduzem simultaneamente sua diversidade. Alta salinidade e baixo pH interferem na integridade da cadeia alimentar. Assim sendo, é importante o gerenciamento da composição química das águas. Os mecanismos de funcionamento do reservatório estão relacionados ao ciclo hidrológico, volume de água, gradientes verticais e horizontais e aos processos de circulação produzidos pelo vento, pelo aquecimento e resfriamento térmico ou pelas retiradas de água de várias profundidades (TUNDISI *et al*, 1999). Levando em consideração todas estas observações, a determinação da qualidade da água em reservatório é uma resultante de vários fatores relacionados às mudanças globais como os fenômenos de ENOS, às características físicas dos reservatórios, aos fatores biológicos, como o uso e ocupação da bacia hidrográfica, sua localização geográfica, e aos fatores climatológicos, como as passagens de frentes.

O estudo de cada caso e o gerenciamento global devem crescer de acordo com os conhecimentos. Torna-se indispensável adequar modelos conceituais, e também reais, para um uso múltiplo ao longo de todos esses processos. Os estudos comparados dos mecanismos desses reservatórios devem elucidar o comportamento dos reservatórios sob influências de parâmetros diversos, interferindo na qualidade das águas à medida que variem as localidades geográficas.

## **1.2 Objetivo geral**

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo comparativo dos reservatórios de Barra Bonita, Broa e Tucuruí, no que se refere às repercussões dos parâmetros climatológicos e hidrológicos sobre a distribuição dos componentes biológicos, dos ciclos biogeoquímicos e da qualidade de água dos reservatórios.

## **1.3 Objetivos específicos**

- 1) Estudo comparativo dos parâmetros morfométricos dos três reservatórios;
- 2) estudo da hidrologia e climatologia da área de abrangência dos três reservatórios;
- 3) análise das características físicas referentes a resistência térmica, circulação, ação do vento, conteúdo de calor e estabilidade da água;
- 4) investigação do comportamento das variáveis biológicas e ciclos biogeoquímicos, da produção primária e do índice de estado trófico;

- 5) cálculo, para cada um, dos números adimensionais referentes aos números de Wedderburn, de Richardson, de Froude e *Lake number*;
- 6) elaboração de um modelo conceitual teórico do funcionamento ou comportamento para cada reservatório, em função das correlações entre os diversos parâmetros; e
- 7) promover bases científicas e tecnológicas adequadas para a gestão dos reservatórios

## 2 Material e Métodos

### 2.1 Caracterização dos reservatórios

Os reservatórios em estudo Barra Bonita, Carlos Botelho (Lobo-Broa) e Tucuruí pertencem às bacias hidrográficas do Paraná e Tocantins como apresentado na Figura 1.

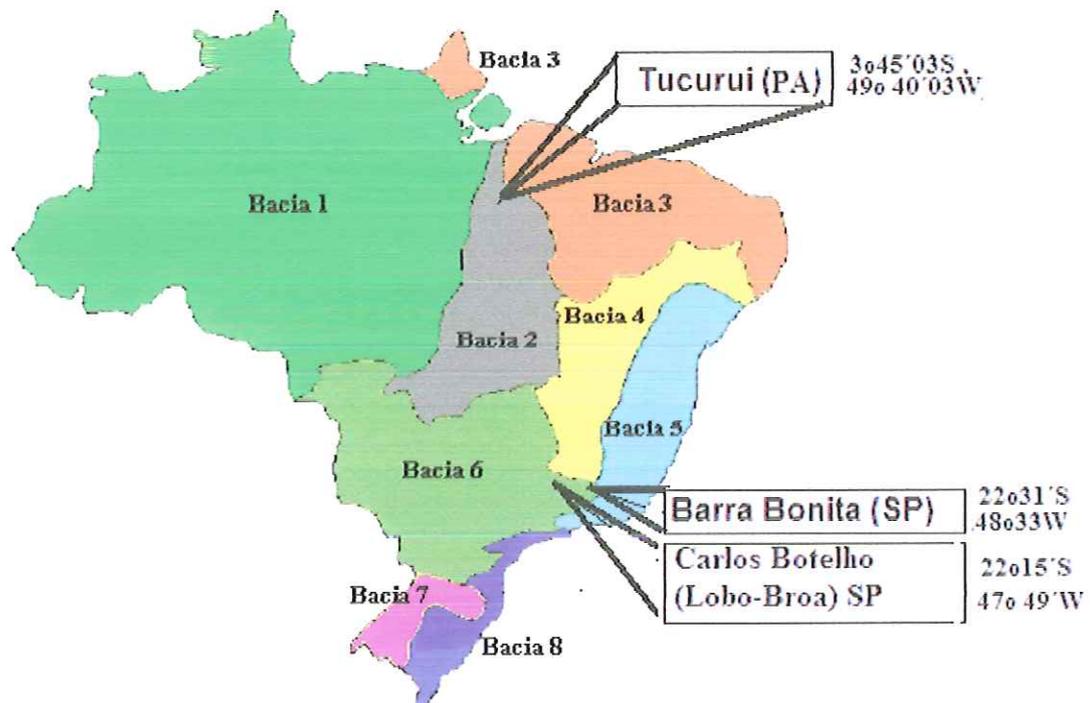


Figura 1: Divisão territorial das grandes bacias hidrográficas brasileiras: 1) bacia do rio Amazonas; 2) bacia do Tocantins, à qual pertence o reservatório de Tucuruí; 3) bacia do Atlântico Norte/Nordeste; 4) bacia do rio São Francisco; 5) bacia do Atlântico Leste; 6) bacia do Paraná-Paraguai, da qual fazem parte os reservatórios de Barra Bonita e Lobo-Broa; 7) bacia do Uruguai; 8) bacia do Atlântico Sul e Sudeste (Fonte ANEEL, 2002).

### 2.1.1 Reservatório Carlos Botelho (Lobo-Broa)

A represa Carlos Botelho (Lobo-Broa) pertence à bacia hidrográfica localizada na divisa dos Municípios de Brotas e Itirapina, a 15 km de São Carlos, na região central do Estado de São Paulo. Geograficamente, encontra-se nas coordenadas 22°15'S e 47°49'W, altitude de 660m em relação ao nível do mar. A bacia do reservatório de Broa estende-se sobre uma área de 227,7 km<sup>2</sup>. O Carlos Botelho (Lobo-Broa), com seus 6,8 km<sup>2</sup> de espelho de água, na sua concepção de 1936, teve como principal objetivo a produção de energia elétrica. Atualmente seu volume acumulado é de 22 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, sendo o mesmo utilizado em atividades de recreação, como pesca esportiva e profissional, esporte náutico (TUNDISI *et al.*, 2003). Além disso, com uma profundidade máxima de 12m, é considerado raso.



Figura 2: Imagem de satélite da bacia do reservatório da UHE Carlos Botelho (Lobo-Broa) em preto. As áreas em verde-escuro correspondem à floresta, as áreas em verde claro reflorestamentos; as áreas em rosa-claro, exploração de areia; as áreas em rosa escuro, assentamentos ou áreas de ocupação (Fonte: Embrapa, 2002).

A análise da imagem de satélite revela que a bacia hidrográfica é intensamente utilizada para atividades agrícolas, como a monocultura de eucalipto, de cana-de-açúcar, a extração de areia e a ocupação por condomínios. Em suas margens, verifica-se ausência de mata ciliar. Algumas áreas são dominadas pelo reflorestamento e atividades

recreacionais. Como conseqüências diretas dessas ocupações, observam-se o aumento de descarga de esgoto doméstico e outros, bem como lixo no reservatório, causando impacto à qualidade da água (TUNDISI *et al.*, 2003). Outras atividades econômicas impactantes, como desmatamento, *runoff* da agricultura e reflorestamento, dominam a área da bacia. O reservatório é alimentado pelos rios Itaqueri e Riberão, com vazões médias de 3,11 e 0,99 m<sup>3</sup>/s, respectivamente (TUNDISI *et al.*, 2003), e os córregos Geraldo e Perdizes. O clima é influenciado pelas massas de ar equatoriais e tropicais, caracterizando períodos secos de maio a outubro e úmidos de novembro a abril.

Geologicamente, distinguem-se oito formações diferentes: a formação hidromórfica orgânica, latossolo, regossolo, solo litólito, terra roxa, solo podzólico e solos arenosos. O solo é caracterizado por alto teor de ferro e alumínio. A vegetação é dominada por savana do tipo cerrado, floresta de galeria ao longo dos rios, *Pinus sp* e *Eucalyptus sp* em áreas de reflorestamento (TUNDISI *et al.*, 1995). A bacia do reservatório é utilizada para as atividades agrícolas permanentes e ocasionais.

### 2.1.2 Reservatório de Barra Bonita

Localizada no centro da bacia do rio Tietê, faz parte do conjunto de reservatórios em cascata do médio Tietê a 22°29'S e 48°34'W, e a uma altitude de 453 m do nível médio do mar (Figura 3).



Figura 3: Bacia do reservatório da UHE de Barra Bonita e o rio Tietê em escuro. As cores roxa e rosa correspondem a áreas de degradação, ocupação e assentamentos; a

cor verde caracteriza área de plantações de cana-de-açúcar; as linhas escuras, estradas (Fonte: EMBRAPA, 2002).

A bacia do médio Tietê ocupa uma área de 32.330 km<sup>2</sup>, na região Sudeste. Com uma área de reservatório de 340 km<sup>2</sup> e um volume acumulado de água de 3.600 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, possui um comprimento máximo de 50 km e um perímetro de 525 km, sendo a bacia ainda dominada por Mata Atlântica. Atualmente, por ser uma represa urbana, é desprovida de vegetação em virtude do desenvolvimento e do desmatamento. Seu tempo de retenção varia de 30 a 180 dias e, na época chuvosa, é relativamente baixo, apresentando um valor de 30 dias, no período de janeiro a março. Na época de seca, pode atingir 180 dias (MATSUMURA-TUNDISI, 1997). A formação geológica é composta na porção sudeste de rocha de embasamento cristalino. O restante é formado de rochas sedimentares e depósitos vulcânicos da bacia do rio Paraná (BITAR *et al.*, 1991). Existem na bacia três grandes compartimentos geomorfológicos: o planalto atlântico, ao leste, é caracterizado por embasamento cristalino, uma depressão periférica composta de sedimentos finos dominando toda a parte central e as “cuestas” basálticas, restritas a uma faixa acima da serra de Botucatu. Como associação geológica, encontram-se: o latossolo roxo, o latossolo vermelho-escuro de textura argilosa e terra roxa estruturada; latossolo vermelho-securo com textura média e latossolo vermelho-amarelo de textura argilosa; podzólico vermelho-amarelo, muito argiloso e médio/argiloso; podzólico vermelho-amarelo de textura areno/argilosa e areno/média; solo litólico e cambissolo (IETC, 2001). Ao contrário dos outros reservatórios, a qualidade de água da Barra Bonita representa o “retrato” do crescimento urbano e da produção agroindustrial da região. Em virtude de receber as cargas orgânicas da região metropolitana de São Paulo, ele é eutrofizado (IETC, 2001).

### 2.1.3 Reservatório de Tucuruí

Localizado sobre o rio Tocantins, pertence à bacia do Araguaia, com uma área de 803.250 km<sup>2</sup> (IBGE, 1991) e uma descarga de 11.000 m<sup>3</sup>/s, no Estado do Pará, a 300 km de sua foz em Belém. O reservatório de Tucuruí encontra-se na latitude 03°45' 03" S e longitude 49°40'03" W. Ele foi construído para a produção de energia elétrica. Projetado para uma área de espelho de água de 1.116 km<sup>2</sup>, no início de seu funcionamento atingiu uma área de 2.430 km<sup>2</sup>. Hoje ocupa uma área de 2.785 km<sup>2</sup>. Sua

área então aumentou de 18%. Com isso, a quantidade de água acumulada passou de 45,6 bilhões para 50,3 bilhões de metros cúbicos. Seu perímetro, conseqüentemente, aumentou para 7.700 km (PINTO, 2002). O solo é composto de rochas sedimentares com alta concentração de material em suspensão e, em virtude disso, confere alta turbidez na água do rio Tocantins. Os solos são compostos de terras vermelhas-amarelas, podsolo, latossolo amarelo-vermelho e latossolo vermelho com baixa fertilidade e alta acidez. Não há terras inundadas no alto e médio rio Tocantins, portanto os tributários são contribuintes importantes de matéria orgânica, caracterizando regiões de reprodução de peixes. A bacia do rio Tocantins é uma bacia continental com larga expansão latitudinal e periodicamente fluvial, bem definida, constituída de alta descarga nos meses de dezembro a maio, e baixa descarga de agosto a outubro. Mais de 2/3 da bacia são cobertos pelo cerrado (savana seca) e a pluviometria anual é situada entre 1500-2000 mm. Uma pequena porção da bacia é coberta de floresta tropical, localizada na área do baixo Tucuruí (IBGE, 1991). Como qualquer outra hidrelétrica, produz vários impactos, como a perda da biodiversidade da fauna e flora aquática e territorial, alta concentração de matéria orgânica no fundo em virtude da vegetação inundada e da mudança química da água a jusante. Quanto ao assoreamento, não existem dados concretos, mas a evolução da praia de Tucunaré serve de parâmetro para se ter uma idéia da dimensão do problema, afirmou Pinto (2002). Com a instalação de estações hidrológicas pela ELETRONORTE, haverá um monitoramento da área de influência do reservatório, acrescentou Pinto (2002). Este problema afetará a capacidade nominal para produção de energia e a qualidade da água. Uma análise da imagem por satélite da bacia revela que o reservatório possui na suas margens milhares de empreendimentos, como fazenda de gado de corte com baixa incorporação tecnológica e sem consciência ecológica, além do desmatamento de florestas e matas ciliares, segundo Pinto (2002). A vegetação do tipo floresta amazônica na região de Tucuruí é caracterizada pelo clima equatorial úmido com grande variedade de espécies vegetais desde a floresta densa até os campos. Em razão da sua forma dendrítica do reservatório, ao redor encontram-se florestas de várzea periodicamente alagadas. Esta complexidade morfométrica e limnológica definiu mecanismos de funcionamento do reservatório (STRASKRABA *et al.*, 1993).



Figura 4: Bacia do reservatório da UHE de Tucuruí em preto e verde, caracterizada por floresta semeada de áreas de degradação; em vermelho, ocupação e assentamentos ; em verde-claro, várzeas de inundação (Fonte: EMBRAPA, 2002).

## 2.2 Metodologia do trabalho

A consecução deste estudo foi baseada em dados obtidos de levantamentos bibliográficos, conforme os objetivos específicos. Para o estudo comparativo, os dados foram extraídos das seguintes publicações: Sperling, 1999; Tundisi E Matsumuma–Tundisi, 1984; Tundisi, Matsumuma–Tundisi e Rodrigues, 2003; Ietc, 2001; <http://www.elnm.gov.br/meiotuc2.htm>; <http://www.sct.embrapa.br>. Os parâmetros de localização (latitude e longitude), volume acumulado, área do reservatório, área da bacia hidrográfica, profundidade máxima, vazão máxima, tempo de retenção, principais vegetações na bacia hidrográfica, idade e altitude com relação ao nível médio do mar

foram coletados em diversas fontes e foram indispensáveis para o cálculo de outras características, como profundidade relativa, fator de desenvolvimento, índice de desenvolvimento do perímetro, índice de forma. Os valores encontram-se agrupados no quadro 1.

A análise e a determinação do uso e ocupação das áreas em relação direta com os reservatórios foram feitas a partir de imagem de satélite disponível no site da EMBRAPA. <http://www.embrapa.br> acessado em

### 2.2.1 Estudos climatológicos

Com relação ao estudo hidrológico e climatológico da bacia de drenagem, os dados foram cedidos e estão disponíveis em Tundisi e Matsumura-Tundisi (1990), referentes ao reservatório de Barra Bonita. Chalar e Tundisi (1999) realizaram estudos sobre a represa de Carlos Botelho (Lobo-Broa), Henry (1986) e Santos (1983), no reservatório de Tucuruí. As análises das repartições climáticas no Brasil e as distribuições de vento, precipitação, radiação solar, foram baseadas em publicação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1991) e em dados da estação meteorológica do CRHEA-USP (Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada). A hidrologia foi feita com auxílio de dados e gráficos do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) disponíveis no site <http://cptec.inpe.br>. Para um estudo mais integrado de todos os possíveis parâmetros que interferem no comportamento dos corpos de água, foi necessário um histórico das ocorrências dos fenômenos de El Niño e La Niña. As informações foram recolhidas dos seguintes sites

[www.org.uy/phi/libros/enso/guyot.htm](http://www.org.uy/phi/libros/enso/guyot.htm); [www.atmos.washington.edu/gcg/RTN/rtn.html](http://www.atmos.washington.edu/gcg/RTN/rtn.html),  
[www.unesco.org/phi/libros/enso/guyot.html](http://www.unesco.org/phi/libros/enso/guyot.html). e [www.hidroweb.aneel.gov.br/doc/tropicos\\_painel1.htm](http://www.hidroweb.aneel.gov.br/doc/tropicos_painel1.htm),  
<http://john-daly.com/guests/regional.htm> ;  
<http://cptec.inpe.br/product/climanalise.cliesp10a/mudanca.htm>

Para melhor visualização, foi necessário o uso de imagens do satélite GOES feitas em infravermelho, sobre a ocorrência ou não de frentes frias nos momentos de coletas, obtidas no site <http://cptec.inpe.br>. Foi possível o uso desta ferramenta na análise dos dados do Broa e Barra Bonita.

## 2.2.2 Características físicas

### 2.2.2.1 Resistência Térmica à Circulação (RTC).

Como base, nos cálculos utilizaram-se dados fornecidos sobre a distribuição da temperatura e densidade na coluna de água, obtidos dos trabalhos de Tundisi e Matsumura –Tundisi (1990) sobre o reservatório de Barra Bonita; de Henry (1999) sobre o reservatório de Tucuruí, e de Chalar e Tundisi (1999) sobre a represa de Carlos Botelho (Lobo-Broa). Os dados originais foram extraídos dos gráficos, com auxílio de um escalímetro e de papel milimetrado. A expressão de determinação da RTC é fornecida por

$$RTC = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{d_{H_2O(4)} - d_{H_2O(5)}} \quad (1)$$

sendo: RTC = Resistência Térmica a Circulação

$d_{t_2}$  a densidade da água a temperatura  $t_2$

$d_{t_1}$  a densidade da água a temperatura  $t_1$ ,

$d_{H_2O(4)}$  a densidade da água a temperatura de 4°

$d_{H_2O(5)}$  a densidade da água a temperatura de 5°C .

### 2.2.2.2 Ação do vento

O estudo da ação do vento foi embasado e desenvolvido por Birge (1916) e definido por Cole (1975) como sendo o trabalho (B) necessário para realizar a distribuição da água quente em direção ao fundo, causando assim uma uniformidade de densidade na coluna de água, principalmente no nível das estratificações.

Neste sentido, ele será oposto à estabilidade. Em outros termos, é o estresse necessário para criar ou destruir a estratificação. Seu cálculo é feito por meio da expressão

$$B = \frac{1}{Ao} \int_{z_o}^{z_n} Z(d_1 - d_2) A_z dz \quad (2)$$

sendo: Ao a área da superfície do reservatório;

- Az a área em  $\text{cm}^2$  a uma profundidade Z;  
 Z a profundidade considerada positiva e em centímetro,  
 $d_1$  a densidade inicial e  
 $d_2$  a densidade observada na profundidade Z

### 2.2.2.3 Conteúdo calorífico

Definido por Cole (1975) como sendo um grama (1g) de água ocupando um volume de um centímetro cúbico ( $\text{cm}^3$ ) ou um mililitro (1ml) a uma temperatura de  $1^\circ\text{C}$ , tem um conteúdo calorífico de  $1\text{cm}^3 \times 1^\circ\text{C} = 1\text{cal}$ . O conteúdo de calor para Wetzel e Likens (1979) é expresso em unidade de área e a temperatura das colunas de água é decrescente quando não há mistura completa, sendo indispensável o conhecimento da morfometria do reservatório para cálculos mais precisos do conteúdo de calor. Por falta de dados batimétricos dos reservatórios de Barra Bonita e Tucuruí, foi empregado o método envolvendo a profundidade média  $Z_m$  (cm), a temperatura média em  $^\circ\text{C}$  ( $T_m$ ) e a área do reservatório (COLE, 1975). Assim sendo, a determinação do conteúdo de calor consiste na razão entre o produto da temperatura média e o valor médio da profundidade pela área do reservatório. Esta expressão fornece o valor em caloria por unidade de área ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ ) do reservatório, com uma disparidade de 1% em relação ao método de ecobatimetria.

### 2.2.2.4 Estabilidade do sistema

Definido por Cole (1975) como sendo a formação de estratificação quando os ventos não são suficientemente fortes para criar homogeneidade de densidade, consequência de uma descontinuidade de temperatura na coluna de água. Esta situação acontece no verão em regiões temperadas. Chama-se (S) o trabalho necessário para misturar o reservatório e obter uma densidade uniforme sem adição ou subtração de calor. Em situação de densidade uniforme do fundo à superfície, a estabilidade é zero, pois não é necessário trabalho para promover a homogeneidade. Nos reservatórios existe um ponto representando a profundidade do centro de gravidade  $Z_g$ . Acima deste ponto a massa de água é igual à massa de água abaixo. Teoricamente, (S) é igual à soma do trabalho necessário para levantar o atual ponto ( $Z_g$ ) para o nível  $Z'_g$  que existiria em densidade uniforme. O trabalho necessita da força e da distância para mover a massa de

água e reduzir a unidade absoluta de trabalho no sistema (cgs) por unidade de área (cm<sup>2</sup>) da superfície do reservatório. Então, a estabilidade pode ser expressa em g.cm/cm<sup>2</sup> e apresenta-se, conforme Idoso (1973) apud Cole (1975), da seguinte forma:

$$S = \frac{1}{A_0} \int_{z_0}^{z_m} (d_z - \bar{d})(A_z)(z - z_d) dz \quad (3)$$

Sendo:

A<sub>0</sub> a área da superfície em cm<sup>2</sup>;

A<sub>z</sub> a área em cm<sup>2</sup> a uma profundidade z(cm);

d<sub>z</sub> a densidade a uma profundidade Z;

$\bar{d}$  a densidade média ou final;

Z(m) a profundidade máxima;

Z<sub>0</sub> a superfície do reservatório

Z<sub>d</sub> dada pela profundidade em (cm) e onde encontra-se  $\bar{d}$ .

### 2.2.3 Características biológicas

#### 2.2.3.1 Estudo da produção primária e do ciclo biogeoquímico

Este estudo foi baseado em dados publicados por Hino (1979) e Tundisi e Matsumura-Tundisi (1975), sobre os reservatórios Carlos Bothelho (Lobo-Broa), Calijuri (1999) e de Barra Bonita. Os dados analisados foram N total, nitrito, nitrato, amônia, clorofila a, fosfato total, fosfato dissolvido, silicato e oxigênio dissolvido. Os períodos de coletas de dados foram o inverno de 1971; o verão de 1980, inverno de 1986, janeiro de 1991 e verão de 1991 para o reservatório Carlos Bothelho (Lobo-Broa); agosto de 1984, julho de 1986 e inverno de 1983 para a represa de Barra Bonita e períodos de estiagem e chuvoso de 1986 e 1987 para a represa de Tucuui.

#### 2.2.3.2 Estudo do estado trófico

A determinação do estado trófico (IET), ferramenta utilizada para classificar a qualidade da água dos reservatórios com o auxílio do modelo de Carlson (1977), modificado por Kratzer e Brezonik (1981), foi baseada nos componentes clorofila a (chl a), nitrogênio total (TN) e fósforo total (TP), de acordo com as fórmulas:

$$IET(Cla) = 10 \times \left( 6 - \frac{2,04 - 0,68 \ln Cla}{\ln 2} \right) \quad (4)$$

$$IET(TP) = 10 \times \left( 6 - \frac{\ln \frac{48}{TP}}{\ln 2} \right) \quad (5)$$

$$IET(TN) = 10 \times \left( 6 - \frac{\ln \left( \frac{1,47}{TN} \right)}{\ln 2} \right) \quad (6)$$

Conforme os resultados encontrados com essas fórmulas, determina-se a classe da qualidade de água com base na tabela 1.

Tabela 1 : Índice de Carlson modificado por Kratzer e Brezonik (1981).

| Estado trófico     | IET           |
|--------------------|---------------|
| Ultra-oligotrófico | IET < 20      |
| Oligotrófico       | 21 < IET < 40 |
| Mesotrófico        | 41 < IET < 50 |
| Eutrófico          | 51 < IET < 60 |
| Hipertrófico       | IET > 60      |

Fonte: IETC, 2001.

Os dados utilizados para este propósito foram os de Calijuri (1999) para Barra Bonita, de Calijuri e Divina (1996), Tundisi e Mateus (1987), Trindade (1980) para o Lobo-Broa e Hino (1987) para Tucuruí.

#### 2.2.4 Números adimensionais

Para o estudo da influência do vento sobre os reservatórios, foi utilizado o número de Wedderburn, o *Lake number* e o número de Richardson.

##### 2.2.4.1 O Número de *Wedderburn*

Este estudo permite a determinação da resposta da camada superficial à ação do vento. Ele é baseado na esquematização em duas camadas de densidades diferentes.

O número de Wedderburn é expresso por unidade de superfície do lago e apresenta-se, segundo Tundisi *et al* (2002), da seguinte forma:

$$W = \frac{\Delta d g h^2}{d u_*^2 L} \quad (7)$$

sendo:

$u_*^2 L$  a força aplicada pelo vento sobre a superfície de água;

L comprimento do reservatório(m);

$g' h^2$  a força de pressão baroclínica máxima no ponto do “upwelling”

$g' = g \Delta \rho / \rho$ ,

h a altura da camada de mistura e  $u_*^2$ , representado por:

$$\mu_*^2 = v \frac{d_{ar}}{d_{H_2O}} C_d. \quad (8)$$

Sendo:  $d_{ar}$  a densidade do ar a uma dada temperatura e altitude ( $1,2 \text{ kg/m}^3$ ),  $d_{H_2O}$  a densidade de água,  $v$  a velocidade do vento (m/s), o coeficiente de avanço  $C_d = 0,0014$ .  $W > 10$  corresponde a uma forte estratificação a ventos fracos. A camada de mistura é dominada pela turbulência produzida na superfície e transportada na base da camada de mistura em que desaparece a termoclina. Os processos unidimensionais são dominantes. Se  $3 < W < 10$ , é caracterizada uma forte estratificação e ventos fortes em virtude da termoclina basculada ou a camada de mistura se desloca sob o efeito do vento. A estrutura unidimensional é conservada. Neste caso, há circulações verticais. Se  $W < 3$ , têm-se ventos fortes e termoclina próxima da superfície. O “upwelling” e a mistura horizontal tornam-se importantes em decorrência da circulação do corpo de água sob o efeito dessas forças.

#### 2.2.4.2 Lake number

Este número foi introduzido por Imberger e Patterson (1989), para minimizar as dificuldades de aplicação encontradas com os números descritos por Wedderburn (W) e os números de Froude ( $F_i$  e  $F_o$ ). Ele permite caracterizar uma resposta mais global da massa de água, levando em consideração a estratificação vertical arbitrária  $\Delta \rho$ . O

número de Lake ( $L_N$ ) é a relação entre os momentos, calculados com relação ao centro do volume, à força de gravidade que estabiliza a massa de água em razão da estratificação da densidade e das forças de mistura desestabilizadoras ligadas ao vento, às entradas e saídas a uma desestratificação artificial.

$$L_N = \frac{\int [Z - L(H)] A_z d_z dz (1 - [H - h]/H)}{d_o u_*^2 A_o^{3/2} (1 - [L - h]/H)} \quad (9)$$

( Salençon e Thebault, 1997)

em que:

$A(z)$  corresponde à superfície do lago na profundidade  $z$  e  $A_o = A(0)$ , a área na superfície do lago. A fórmula seguinte é caracterizada pelo centro de massa de água, e pode ser escrita como segue

$$L(H) = \frac{\int_0^H ZA(z) dz}{\int_0^H A(z) dz} \quad (10) \text{ ( Salençon e Thebault, 1997)}$$

Sendo:

$H$  a profundidade total é dado pelo centro de massa de água.

$L(H)$  o centro do volume e

$h$  a distância do meio do metalímnio à superfície do lago.

Se  $L_N < 1$ , a estratificação é muito fraca para opor-se à energia do vento; considerando  $L_N > 1$ , a estratificação é suficientemente forte para impedir a mistura e o hipolímnio fica pouco turbulento e, se  $L_N = 1$  “upwelling” da termoclina está em contato com a superfície da água.

#### 2.2.4.3 Número de *Richardson*

Esse número é muito utilizado pelo fato de representar a relação entre a energia potencial da camada de superfície e a energia cinética fornecida pelo vento na superfície, e fornece uma indicação sobre o potencial de resistência do epilímnio à mistura do vento, e pode ser representado da seguinte forma:

$$R_i = \frac{\Delta dgh}{d_o u_*^2} \quad (11) \text{ ( Salençon e Thebault, 1997)}$$

$g$  = aceleração da gravitação

$h$  = altura da camada de mistura

$u_*^2$  = velocidade do vento na superfície do reservatório

$d_o$  = densidade da camada superficial

$\Delta d$  = diferença de densidade entre duas camadas

#### 2.2.4.4 Números de *Froude*: influência das entradas e saídas de água

O número interno de *Froude* exprime a relação entre as forças de inércia e as forças de gravitação ou a relação entre o tempo de ajustamento gravitacional e o deslocamento do fluido. Ele permite entender se as ondas internas podem ajustar as linhas de densidade assim que elas se formem por advecção. Para as entradas,  $F_i$  é dado por:

$$F_i = \frac{U_e}{\sqrt{g_i} \cdot H} \quad (12) \text{ ( Salençon e Thebault, 1997)}$$

Sendo:

$U_e$  a velocidade de entrada da água,  $g_i$  é a gravidade reduzida entre a água de entrada e a superfície do reservatório e  $H$  a profundidade total. Considerando  $F_i > 1$ , a inércia da água que entra no reservatório é suficiente para dominar a força de gravidade, o que resulta num gradiente de densidade horizontal.

Contudo, se  $F_i < 1$ , as forças de pressão ajustam os gradientes mais rapidamente de tal forma que a entrada de água não pode criá-los. Para as saídas, o número de *Froude* é definido como sendo:

$$F_o = \frac{Q_s}{H^2 \sqrt{g_o} \cdot H} \quad (13) \text{ ( Salençon e Thebault, 1997)}$$

sendo:

$Q_s$  o fluxo de saída (a escala de velocidade de saída é dada por  $Q_s/H^2$ ) e  $g_o$  a gravidade reduzida entre a superfície do reservatório e o ponto de saída da água (comportas) correspondendo a  $g(\Delta d/d_o)$ .

#### 2.2.5 Comportamento dos reservatórios

Um estudo integrado será feito de todos os parâmetros estudados: climatológicos, produção primária, números adimensionais, IET, determinando-se as correlações entre todos eles, as regressões e a análise dos coeficientes de determinação do ajuste de curvas respostas. Este estudo permitirá a projeção do estado da qualidade do reservatório sob efeito dos diferentes fatores estudados.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Estudos morfométricos, hidrológicos, climatológicos e geográficos dos três reservatórios

Tabela 2 Características morfométricas dos três reservatórios

|  | <b>BROA</b>                                     | <b>BARRA BONITA</b>                          | <b>TUCURUI</b>                                    |
|--|---|--|---|
| <b>Bacia</b>   | Bacia do Itaqueri                               | Bacia do médio Tietê                         | Tocantins   |
| <b>Latitude</b>  | 22° 15 S  | 22° 31' S                                    | 3° 45' 03S  |
| <b>Longitude</b>   | 47° 49 W  | 48° 33' W                                    | 49° 40' 03W                                       |
| <b>Volume acumulado</b>                                  | 22x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>               | 3600x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>          | 45800 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>              |
| <b>Área do reservatório</b>                              | 6,8 km <sup>2</sup>                             | 340 km <sup>2</sup>                          | 2785 (07/02)<br>2439 km <sup>2</sup><br>(1984)    |
| <b>Área da bacia</b>                                     | 227,7 km <sup>2</sup>                           | 32330 km <sup>2</sup>                        | 758000 km <sup>2</sup>                            |
| <b>Prof. máxima</b>                                      | 12,0 m  | 25,0 m                                       | 72,0 m  |
| <b>Comp. máximo</b>                                      | 7,5 km  | 50 km  | 1321 km   |
| <b>Largura . máxima</b>                                  | 2,2 km  | -  | -   |
| <b>Vazão ( min e max)</b>                                | 3,031 – 4,49 m <sup>3</sup> /s                  | 200- 950 m <sup>3</sup> /s                   | 3492 m <sup>3</sup> /s<br>68400 m <sup>3</sup> /s |
| <b>T. de retenção</b>                                    | 20 a 40 dias                                    | 30 a 180 dias                                | 51 dias   |
| <b>Vegetação</b>   | Cerrado, floresta de galeria e reflorestamento  | Mata Atlântica                               | Floresta Amazônica                                |
| <b>Idade</b>   | 30 anos   | 40 anos                                      | 18 anos   |
| <b>Temperatura mínima</b>                                | 8 a 10° C                                       | 8 a 20° C                                    | 22 a 28° C  |
| <b>Temperatura máxima</b>                                | 18 a 25° C                                      | 24 a 28° C                                   | 22 a 34° C  |
| <b>Altitude</b>  | 660 a 770 m                                     | 453 ( 456) m                                 | 40,00 m   |
| <b>Perímetro</b>   | 21 km   | 525 km                                       | 7700 km   |
| <b>Profundidade média</b>                                | 3,2 m   | 11,53  | 17,3 m  |
| <b>Vazão turbinada</b>                                   |   | 309 – 412 m <sup>3</sup> /s                  | 68400 m <sup>3</sup> /s                           |
| <b>Velocidade vento</b>                                  | 3,8 a 8,1 m/s                                   | 5 a 7 m/s                                    | 2 – 3,5 km/h                                      |
| <b>Cap. calorífica</b>                                   | 40,35 10 <sup>3</sup> Jcal/cm <sup>2</sup> /ano | 113,4 10 <sup>3</sup> J/cm <sup>2</sup> /ano | 227,8 10 <sup>3</sup> J/cm <sup>2</sup> /ano      |
| <b>Prof. relativa</b><br>$(Z_r = (Z_{\max})/(\sqrt{A}))$ | 0,145 %   | 0,135%                                       | 0,136 %   |
| <b>Fator de envolvimento</b><br>$F = Ab + Ar/V$          | 10,65   | 9,07   | 0,000016  |

|  |                      |                      |                       |
|--|----------------------|----------------------|-----------------------|
| <b>Índice de desen. perímetro</b> $DI = L / 2\sqrt{\Pi A}$ <sup>(2)</sup><br>(2) Cole, 1975; Wetzel e Likens, 1979             | 2,27                 | 8,03                 | 41,17                 |
| <b>Índice de forma</b><br>$F = P / \sqrt{A\Pi} = 2Dp$ <sup>(3)</sup><br>(3) Straškraba, Gnauck, 1982 apud Sperling (1999)      | 4,54                 | 16,06                | 82,34                 |
| <b>Declividade média</b><br>$\alpha(\%) = 100Z_{\max} / \sqrt{A/\Pi}$  | 0,8154               | 0,24025              | 0,2417                |
| <b>Tempo de renovação 1/TR.</b>  | 0,033 $\equiv$ 3,3 % | 0,033 $\equiv$ 3,3 % | 0,0196 $\equiv$ 1,96% |
| <b>Produtividade Área / Volume</b>   | 0,31                 | 0,094                | 0,053                 |
| <b>Índice desen. volume</b><br>$Dv = A\bar{Z} / Z_{\max}$<br>$A\bar{Z} \left( Z_{\max} A / 3 \right)^{-1}$<br>Hutchinson(1957) | 0,8                  | 1,38                 | 0,72                  |

O estudo destes reservatórios foi feito coletando-se dados morfométricos de cada um dos reservatórios. Estes dados foram agrupados na tabela 2, onde se podem observar a localização geográfica, o volume acumulado, a área do reservatório (e da bacia), a profundidade máxima, média e relativa, o fator de envolvimento do perímetro e de desenvolvimento do volume, o comprimento máximo etc. O volume tem uma influência sobre a capacidade calorífica dos reservatórios, variando de acordo com a latitude. Quanto mais distante do equador, menor conteúdo de calor. O cálculo deste parâmetro determinou os valores médios de 27,061 Kcal/cm<sup>2</sup> na Barra Bonita, 54,36 Kcal/cm<sup>2</sup> em Tucuruí e 9,63 kcal/cm<sup>2</sup> no Broa. O volume, além de disponibilizar uma quantidade suficiente de água para os diversos fins, fornece ao sistema um potencial autodestrutivo de matéria orgânica. Neste estudo, por ordem decrescente, apresenta-se o Tucuruí seguido de Barra Bonita e Broa, com os respectivos volumes 45800 x10<sup>6</sup>; 3600 x10<sup>6</sup> e 22 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

A penetração de luz determina a produtividade do reservatório, ou seja, quanto mais raso for o corpo de água, maior a probabilidade para realizar a fotossíntese, conseqüentemente, aumento da produção. Uma medida para avaliar o aumento desta

produtividade primária é a razão área / volume. Maior valor desta razão implica uma grande probabilidade de produtividade. Assim sendo, os valores obtidos de 0,39 para o Broa, 0,06 Tucuruí e 0,1 Barra Bonita classificam o Broa como o mais propício à produção, seguido da Barra Bonita.

O comprimento máximo efetivo permite avaliar o processo de sedimentação e a ação dos números de Wedderburn sobre a distribuição dos compostos dissolvidos e suspensos. Os valores elevados mostram maior taxa do fenômeno, colocando o reservatório de Tucuruí e seus 1321 km como tendo maior índice de sedimentação.

A profundidade média influencia diretamente a biomassa formada pelos plânctons (RAWSON (1955) Apud COLE, 1983). Valores menores que 20m caracterizam reservatórios muito produtivos em virtude da atuação dos processos de mistura, disponibilizando os nutrientes no corpo de água. O cálculo do referido parâmetro mostra que valores de 3,2; 11,57 e 17,3 para o Broa, Barra Bonita e Tucuruí foram menores do que 20, classificando os três como sendo produtivos.

A profundidade relativa (Pr) constitui um dos parâmetros de grande importância, por ter influência sobre a oxigenação do corpo de água e produtividade biológica, disponibilizando o fósforo e o nitrato e favorecendo os fenômenos bioquímicos como as reações anaeróbicas e os depósitos de metais. Destes estudos, observou-se que todos apresentaram valores de 0,145%; 0,135% e 0,136% próximos um de outro.

O índice de desenvolvimento do perímetro (IDP) condiciona os estudos limnológicos. Ele permite a determinação do número de pontos mínimos necessários durante o monitoramento da represa. Valores elevados implicam maior número de pontos em virtude da irregularidade do contorno da represa. As represas do Broa, Barra Bonita e Tucuruí apresentaram IDP igual a 2,27; 8,03 e 41,17, respectivamente, indicando que o reservatório de Tucuruí apresenta uma área dendrítica e o do Broa mais regular; como consequência, eles apresentarão na mesma ordem os números de pontos de coletas.

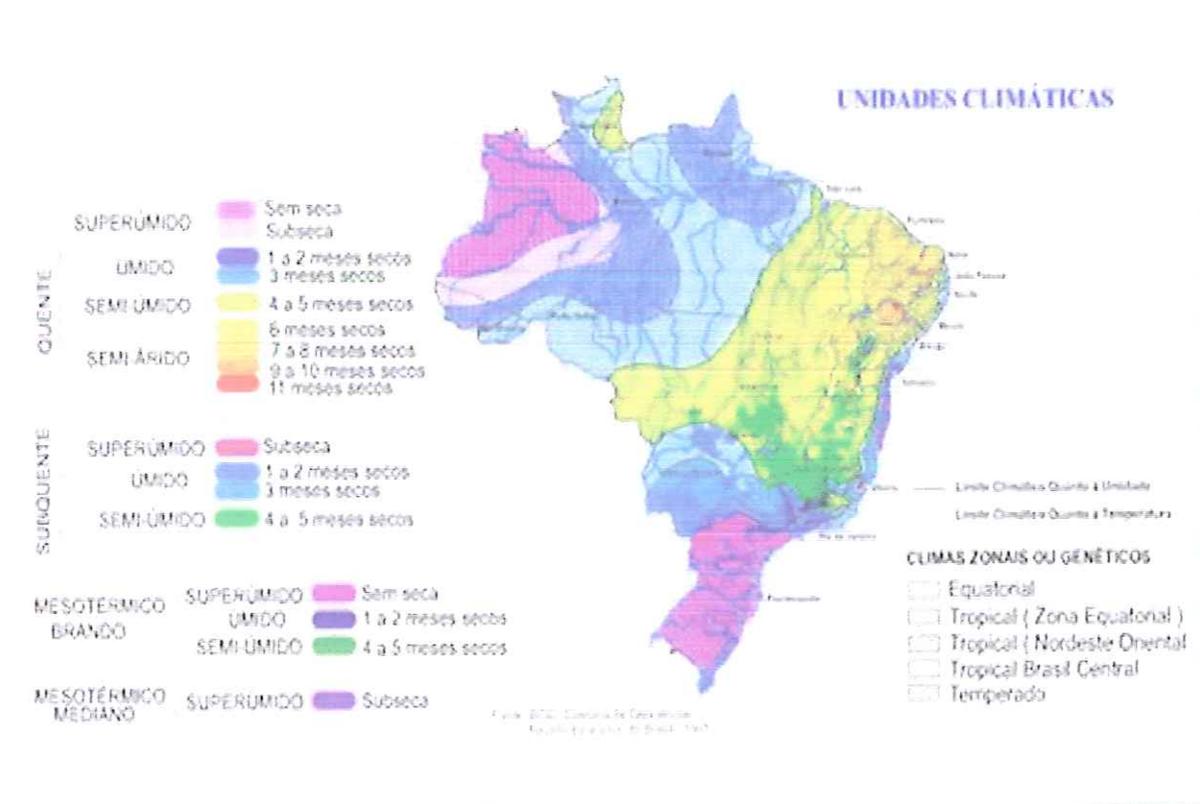
O índice de desenvolvimento do volume (Dv) compara a ação do vento sobre o corpo da água. O reservatório de Barra Bonita, com  $Dv = 1,38 > 1$ , está mais sujeito à ação do vento e conseqüentemente tem maior probabilidade de revolvimento de material do fundo. Os de Tucuruí e de Broa têm os valores iguais a 0,72 e 0,8, respectivamente, então menos sensíveis à ação eólica.

O fator de envolvimento indica o grau de probabilidade da bacia de drenagem de contribuir com aporte de material no corpo de água. Valores elevados mostram uma

tendência de carregamento de material sólido (assoreamento), de nutrientes contribuindo com a eutrofização e também os assentamentos urbanos (SPERLING, 1999). Os valores obtidos de 10,65; 9,075 e 0,00016 dos reservatórios de Broa, Barra Bonita e Tucuruí refletem os estados atuais destes reservatórios, em que o Broa e a Barra Bonita são urbanos e tiveram valores elevados.

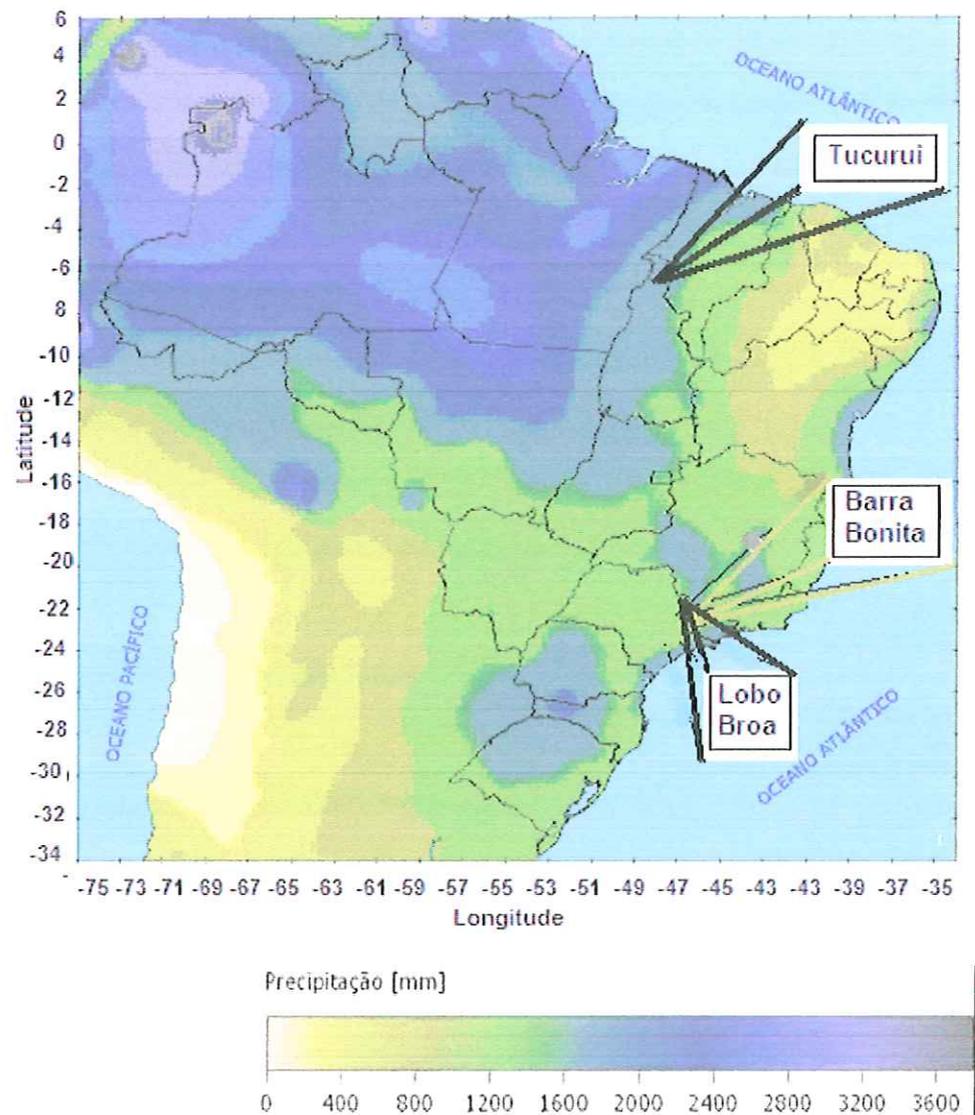
A declividade estabelece uma relação entre o reservatório e a intensidade de transporte de sedimento no seu leito. Quanto maior, mais íngreme se apresenta a área no entorno e mais transporte de sedimento. Então o reservatório de Broa, com 0,8, tem valor mais elevado. Tucuruí e Barra Bonita têm valores iguais, correspondendo a 0,24. Neste estudo, a climatologia e a hidrologia tiveram importância sobre os reservatórios. Eles influenciaram a radiação, determinaram as pressões barométricas e os ventos.

### 3.2 Estudos climatológicos



Fonte : IBGE, 1991

Figura 5 Mapa de repartição das principais zonas climáticas no Brasil. São o clima super-úmido sem seca (roxo) nos extremos norte e sul semi-úmido ; uma zona de Mato Grosso até o Nordeste (amarelo); um clima úmido nos litorais e na Amazônia (azul).



Fonte: Projeto Reanálise – NCAR/NCEP, interpolação: CBEE

Figura 6 Repartição das Precipitações no Brasil, destacando a localização do reservatório de Tucuruí –PA ; Barra Bonita –SP e Lobo-Broa –SP e suas precipitações médias no período de 1990.

### 3.2.1 Ocorrência dos fenômenos do El Niño/La Niña

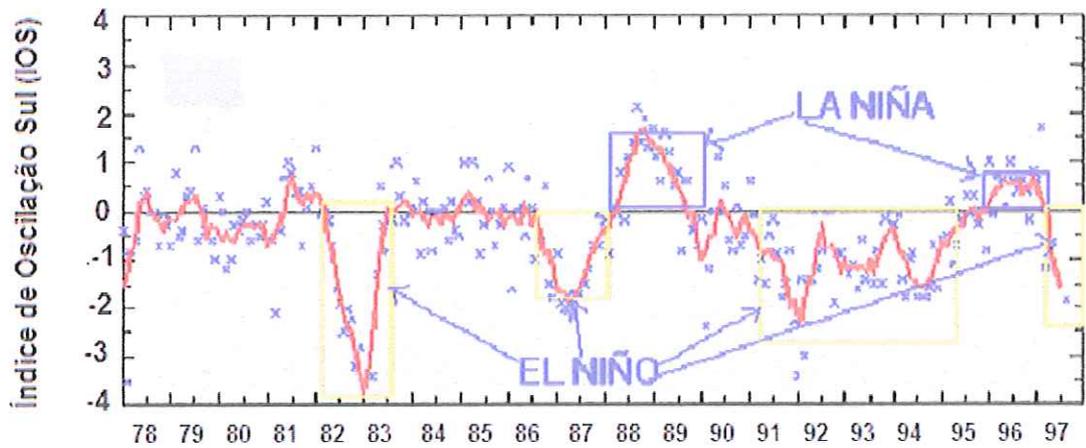


Figura 7 Medida do Índice de Oscilação Sul (IOS) e períodos ENOS negativo (El Niño) cercado de amarelo nos anos de 1982 - 1983; 1986-1987; 1991-1995 e 1997 e os ENOS positivos (La Niña) cerca de azul nos anos 1988 – 1990 e 1996-1997.

Fonte : [www.org.uy/ph/libros/censo/guyot.htm](http://www.org.uy/ph/libros/censo/guyot.htm);

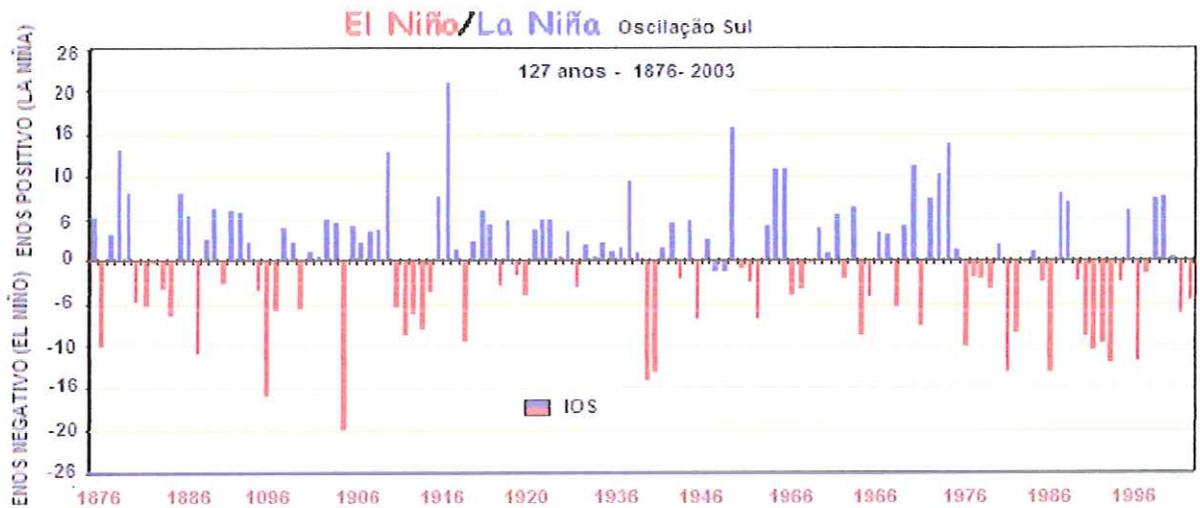


Figura 8 Índice de Oscilação Sul de 1876 a 2003, com os anos de ocorrência dos eventos de Enos positivos (La Niña) em azul e os Enos negativos( El Niño) em vermelho ( DALY, 2003)

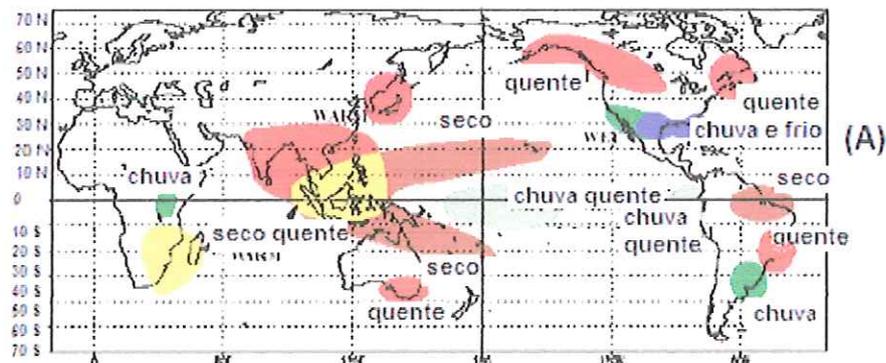
Fonte: [www.org.uy/ph/libros/censo/guyot.htm](http://www.org.uy/ph/libros/censo/guyot.htm);



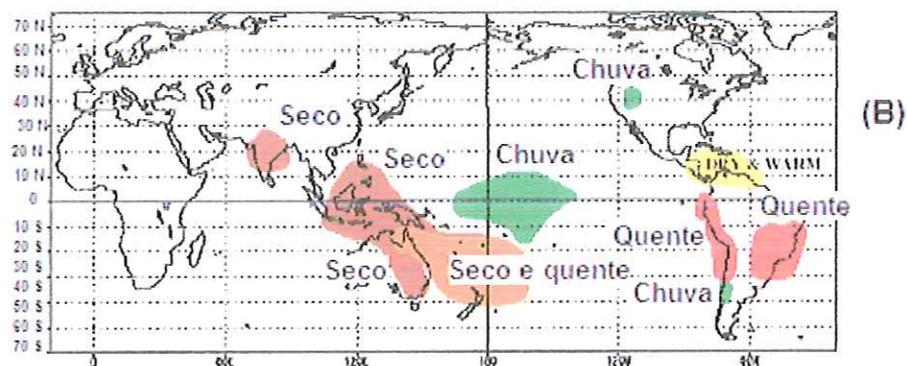
Figura 9 Manifestação dos eventos de El Niño e La Niña pelo fenômeno de aquecimento das águas do Pacífico e suas conseqüências sobre os continentes América do Sul e Indonésia.

Fonte ... [www.org.uy/ph/libros/cnso/guyot.htm](http://www.org.uy/ph/libros/cnso/guyot.htm);

#### Período quente durante El Niño, de dezembro a fevereiro



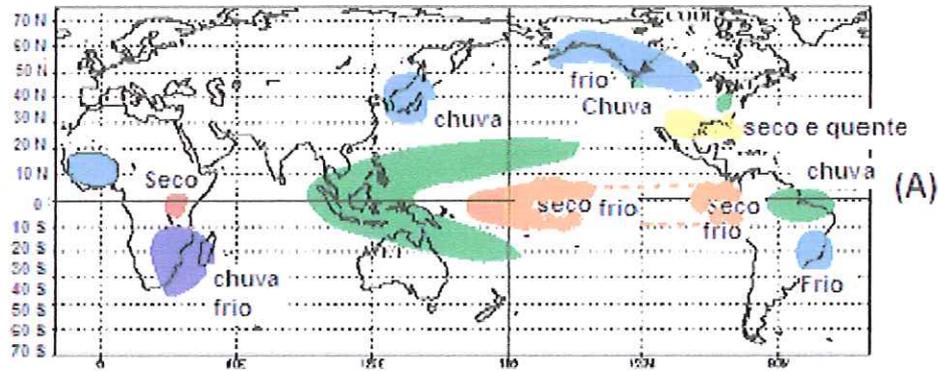
#### Período quente durante El Niño, de junho a agosto



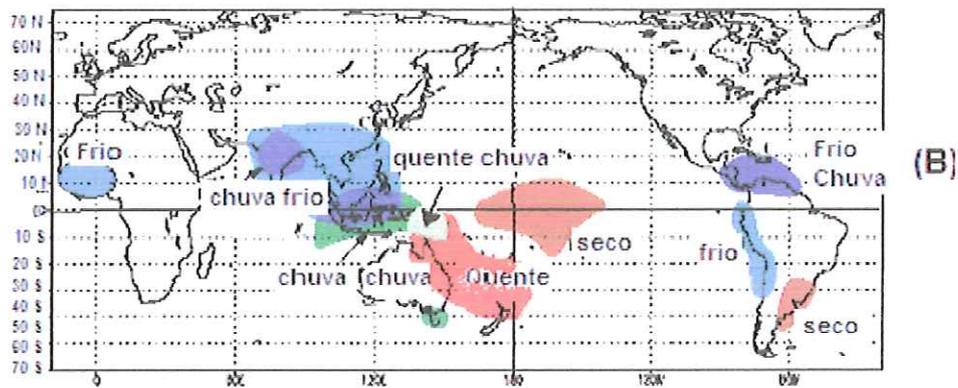
Fonte Centro de Previsão Climática(NCEP), 2003.

Figura 10 Impacto do Fenômeno do El Niño. (A) Provoca seca no Nordeste, quente no Centro-oeste e chuva no Sul do Brasil, de dezembro a fevereiro, coincidindo com o verão. (B) De julho a agosto o clima fica seco e quente na América Central e quente na maior parte do Brasil.

### Período de frio durante La Niña de dezembro a fevereiro



### Período de frio durante La Niña de julho a agosto



Fonte: Centro de Previsão Climática (NCEP)

Figura 11 Impacto do evento La Niña. (A) De dezembro a fevereiro, provocando chuva no Nordeste e frio no Centro-Oeste do Brasil e, de julho a agosto, seca no Sul do Brasil.

Fonte : Climate Prediction Center (NCEP) Centro de Previsão Climática.

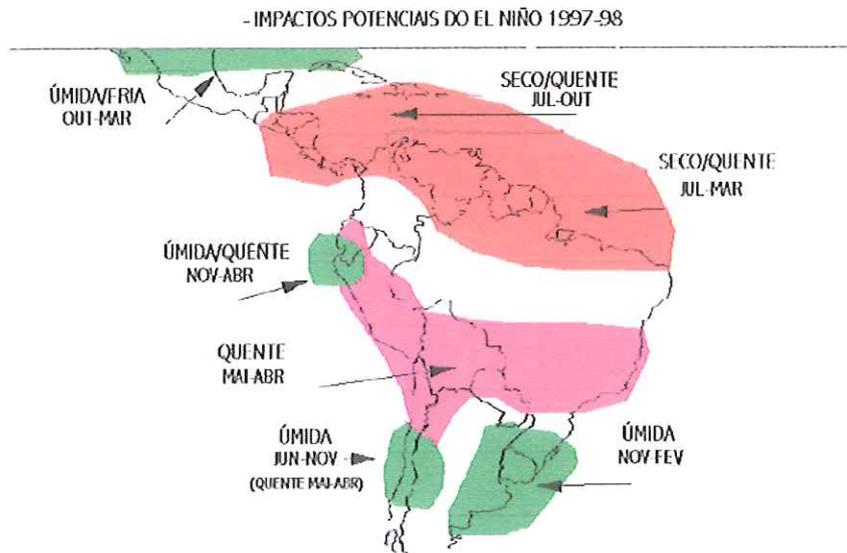


Figura 12 Impactos causados pelo ENOS negativo no Brasil de 1997 a 1998, com diversas conseqüências. De forma geral, o El Niño causou seca e tempo quente no Nordeste e Norte de julho a março; chuva de novembro a fevereiro no Rio Grande do Sul e clima úmido e quente no sul da Argentina; quente no cinturão do litoral da Bahia até o litoral da Pacífico e tempo quente e seco de julho a outubro na América Central.

Fonte: <http://www.senado.gov.br/web/relatorios/elniño/fig9.htm> capturado em 14/02/2004.

### Índice de Oscilação Sul (SOI) de jan 2001 a dez 2003

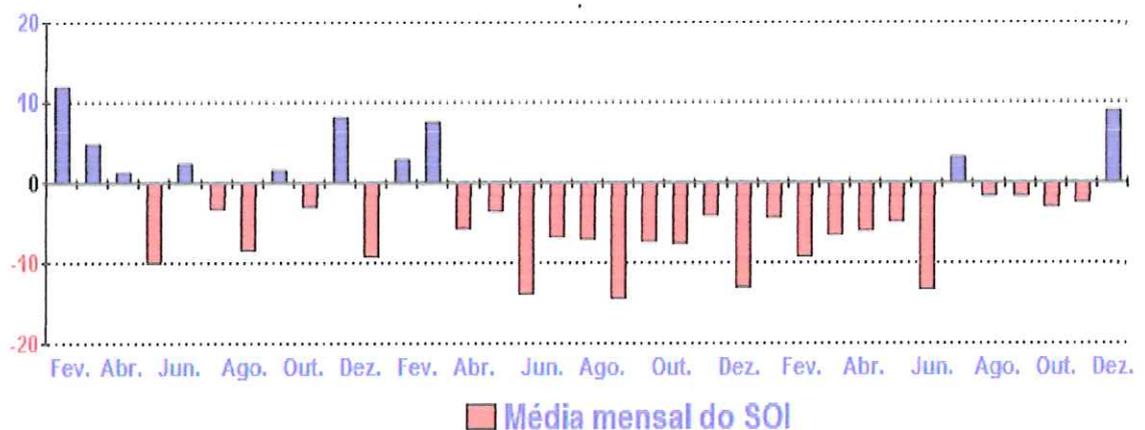


Figura 13 Valores mensais do (IOS) Índice de Oscilação Sul de fevereiro de 2001 a dezembro de 2003, com o El Niño de março de 2002 a junho de 2003( fonte Daly, 2003).

Uma das conseqüências diretas das variações de chuva, vento e evaporação é a definição dos regimes climáticos, regidos por sistemas fechados e regulados pela quantidade de chuva, escoamentos, infiltrações e todos os estados e formas de corpo de água. As características fisiográficas de cada bacia, no que se refere às suas características vegetativas, geológicas, hidrográficas, morfológicas e ao seu uso e ocupação pelos seres vivos, diferenciam os regimes climáticos, e dependem, além das características há pouco enumeradas, do tipo de precipitação, da intensidade, duração e distribuição da chuva. Distinguem-se três grandes grupos climáticos: o tropical, o temperado e o polar.

De maneira geral, a estação chuvosa apresenta-se com pequenas variações quando se afasta do equador. As figuras 5 e 6 apresentam as repartições das zonas climáticas e das precipitações sobre os reservatórios e seus entornos. Estas figuras revelam que o reservatório de Tucuruí pertence à zona, com uma pluviometria de 3200 mm/ano, enquanto o Broa e a Barra Bonita têm uma variação anual de 1200 mm colocando-os no clima tropical úmido e clima tropical semi-úmido, respectivamente. Os fenômenos naturais como El Niño e La Niña e o TSM do Atlântico influenciam direta ou diretamente os regimes climáticos. As figuras 7 e 8 apresentam as intensidades e freqüências de ocorrência destes fenômenos, de 1876 a 2003. Além da temperatura do mar, os fenômenos ENOS estão relacionados ao aquecimento / esfriamento das águas na região e determinam as medidas do El Niño e La Niña. Quando se trata de um número positivo, isto é ( $IOS > 0$ ) temos um avanço de La Niña ou esfriamento do oceano, mas quando o número é negativo ( $IOS < 0$ ) temos o El Niño ou um aquecimento das águas. Este número significa que ocorreu uma progressão do El Niño.

No Nordeste brasileiro, conforme Hastenrath e Greischar (1993), ao contrário da Amazônia, as precipitações são bastantes sensíveis aos extremos de temperatura da superfície do mar no Pacífico equatorial associados ao ENOS. De acordo com a figura 8, observa-se que o ENOS é quase cíclico, manifestando-se a cada 4/7 anos, caracterizado por aquecimento e resfriamento da superfície do oceano Pacífico. Como conseqüência, ocorre um deslocamento de massa de ar quente ou frio de leste para oeste do Pacífico, causando, de acordo com sua intensidade, perturbações (seca ou enchente) no mundo (figura 9). Conforme a figura 10, de dezembro a fevereiro, no Brasil, o clima tornou-se seco no Norte e parte do Nordeste e na Austrália, durante os ENOS negativos. No período de junho a agosto, a maior parte do Brasil, desde o Nordeste até o Sul

registrou elevada temperatura neste período. A Austrália sofreu severa seca nessa mesma época.

As figuras 10 e 11 apresentam os fenômenos ENOS positivo e a circulação anômala é revertida com o conseqüente aumento da precipitação sobre aquelas regiões. Ao contrário do aquecimento, os eventos ENOS positivos chamados de La Niña são causados por injeção de águas frias mais intensas do que o usual, provocando um esfriamento da superfície do oceano Pacífico oriental. Este fenômeno provoca secas de junho a agosto no sul do Brasil e chuvas intensas no Nordeste, de dezembro a fevereiro. Na Austrália, de dezembro a fevereiro, ocorrem chuvas pesadas e inundação. As figuras 12 e 13 apresentam respectivamente as conseqüências destes fenômenos e suas intensidade sobre a América do Sul.

### 3.2.2 Estudos dos fatores climatológicos nos reservatórios

#### 3.2.2.1 Insolação e temperatura do ar em Barra Bonita

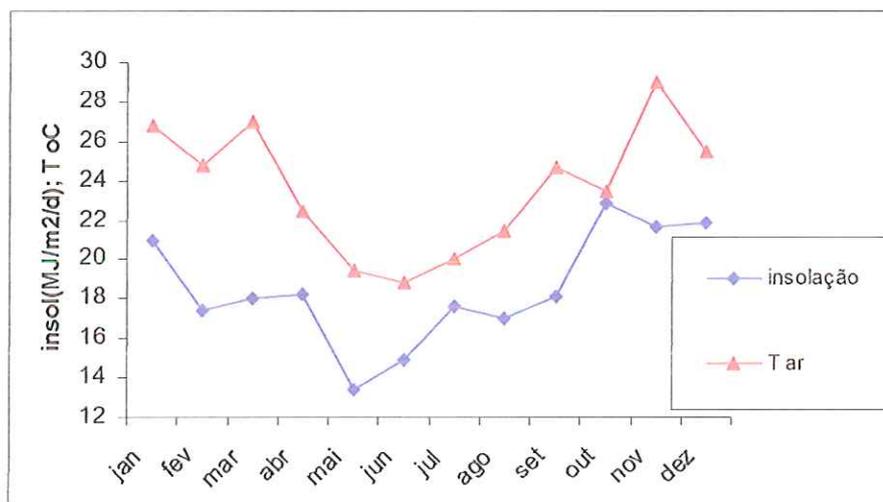


Figura 14 Insolação e temperatura do ar no reservatório da UHE de Barra Bonita, no período de 1998 a 2000, indicando período de abril a agosto( inverno) e setembro a março(seco). Chaves (2002).

No reservatório de Barra Bonita, a insolação e a medida da temperatura do ar apresentaram duas curvas parabólicas com valores elevados de setembro a março correspondendo ao período seco e de abril a agosto ao período úmido.

### 3.2.2.2 Radiação solar na UHE Carlos Botelho ( Lobo- Broa)

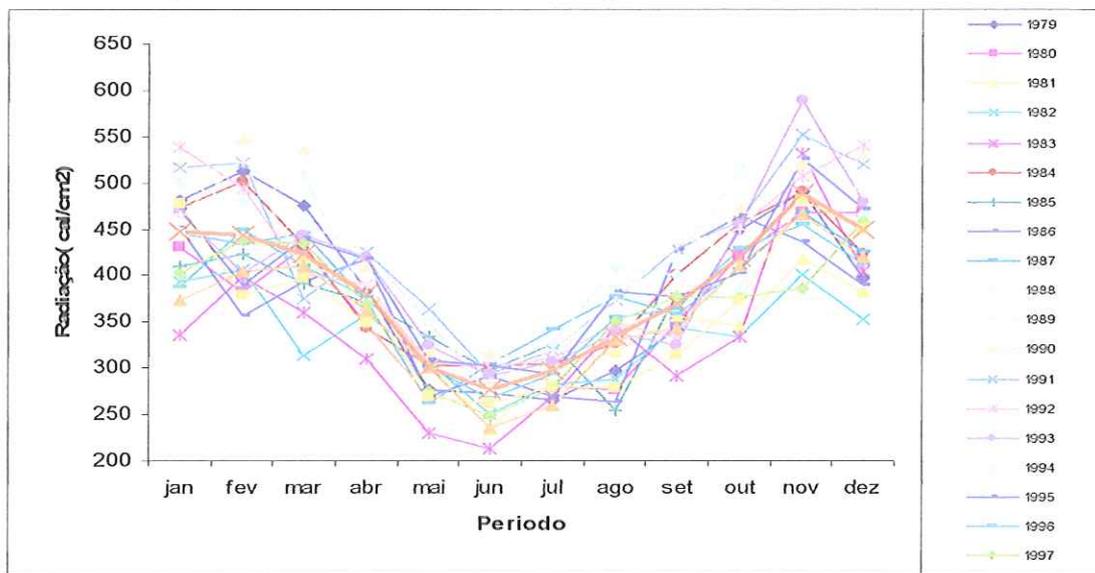


Figura 15 Radiação solar no reservatório da UHE Carlos Botelho do Lobo-Broa em função dos meses do ano, no período de abril a agosto (inverno) e agosto a março (verão), no período de 1979-1999. Fonte: Tundisi(2002).

Em Carlos Botelho (Lobo –Broa) de 1979 a 1999, as variações das radiações solares forneceram o gráfico da figura 15. Ele apresentou valores elevados de setembro a março durante a primavera e o verão com máximos de  $2514 \text{ Joule/cm}^2$  no ano de 1983, período de ocorrência do El Niño. Os menores valores acumularam-se de abril a agosto no outono e inverno com inverno rigoroso em 1983. A radiação não ultrapassou dos  $838 \text{ J/cm}^2$ .

### 3.2.2.3 Regime temperatura do ar

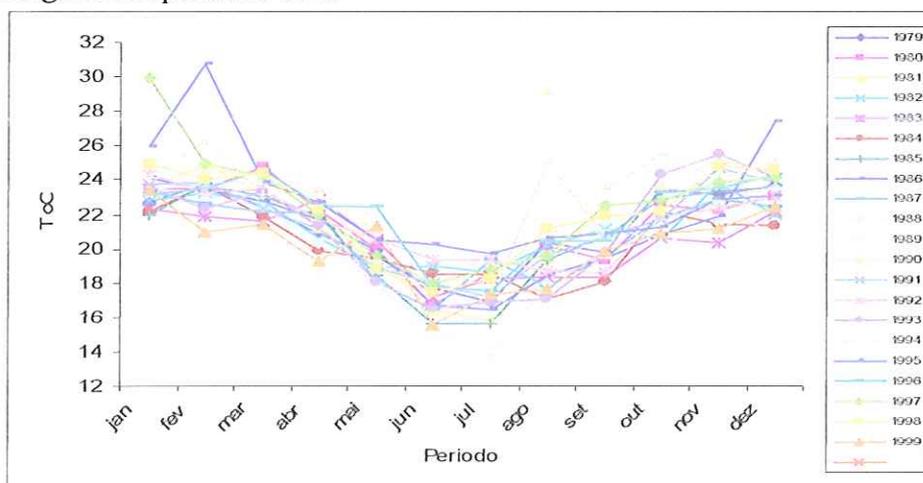


Figura 16 Temperatura média do ar em função dos meses do ano no reservatório da UHE Carlos Botelho, de 1979 a 1999, nos períodos de maio a agosto (inverno) e setembro a abril (verão), Fonte: Tundisi,( 2002).

O registro das variações de temperatura em Carlos Botelho configurou-se em dois períodos distintos : o período de valores elevados na primavera e verão e de valores baixos no outono e inverno. Os invernos rigorosos foram observados em 1985 e 1999, quando as temperaturas médias mensais não passaram de 16° C e os verões quentes nos anos 1995 e 1997, com média mensais de 31° C.

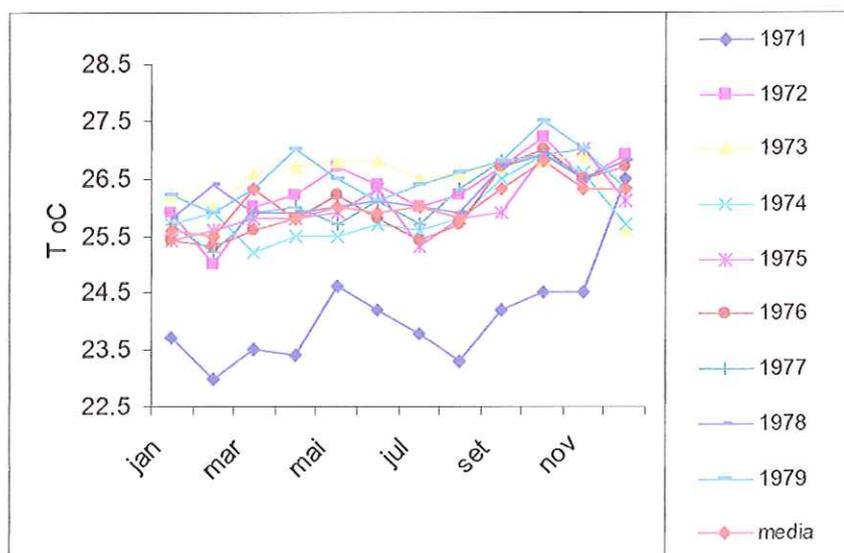


Figura 17 Temperaturas médias em função dos meses do ano, no reservatório de Tucuruí, no período de 1971 a 1979.

Em relação a Tucuruí, a figura 17 apresentou as temperaturas médias no período de 1971 a 1999. Sendo localizado próximo ao equador as temperaturas médias registradas rodaram em torno de 25,5 e 26,5° C, à exceção do ano de 1971, quando esta temperatura variou entre 23,5 e 24,5° C .

#### 3.2.2.4 Precipitação

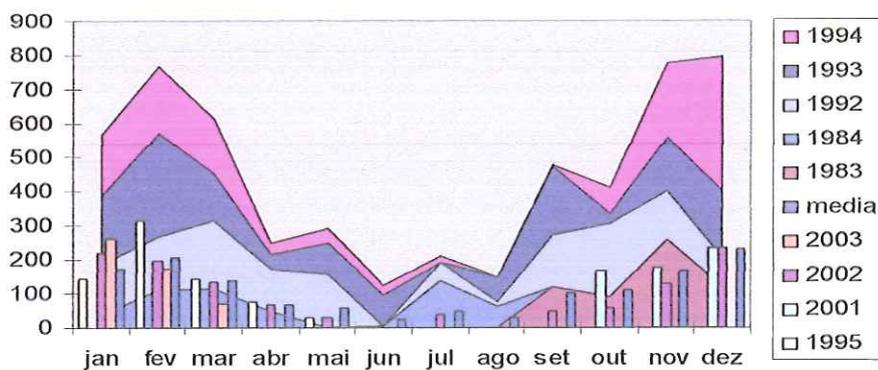


Figura 18 Precipitação nos anos de 1983 a 2003 em função dos meses do ano, no período de abril a agosto ( inverno) e de setembro a março(chuvoso), no reservatório da UHE Barra Bonita. CPTEC (2002).

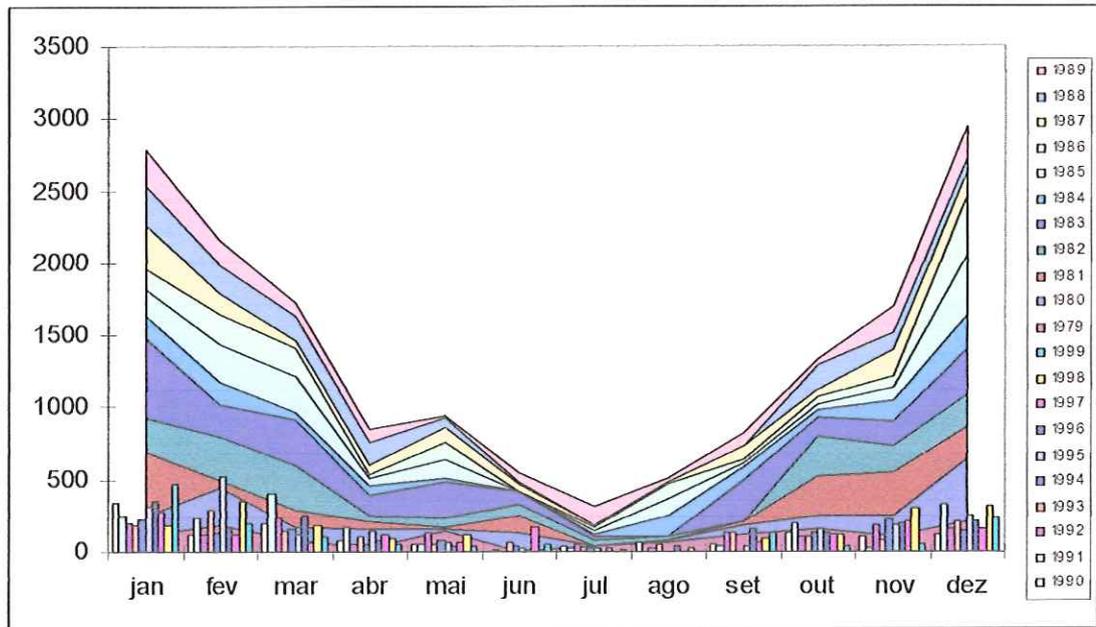


Figura 19 Precipitação em função dos meses do ano, nos períodos de abril a agosto (inverno) e setembro-março (verão), no reservatório da UHE Carlos Botelho, de 1979 a 1999 Fonte de dados: Tundisi, 2002.

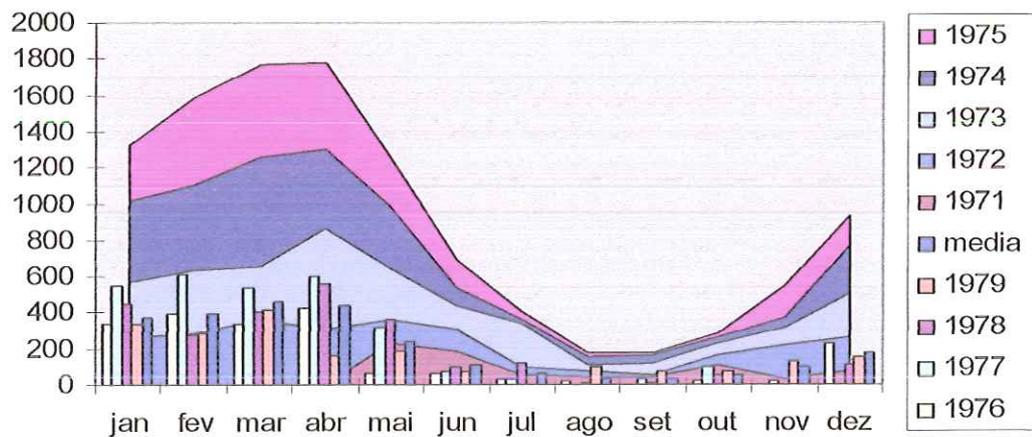


Figura 20 Precipitação no reservatório de Tucuruí em função dos meses do ano, no período chuvoso de outubro a maio e período seco de junho a setembro, de 1971 a 1979 (Fonte : SANTOS,1983).

As figuras 18, 19 e 20 apresentam as precipitações médias de 1983 a 2003 em Barra Bonita, de 1979 a 1999 em Carlos Botelho e de 1971 a 1979 em Tucuruí, respectivamente. A observação e análise das três figuras indica que Barra Bonita e Carlos Botelho têm a mesma configuração pluviométrica, com período chuvoso de setembro a março e período seco de abril a agosto. Os valores máximos registrados foram em 1983 de 550 mm, em Carlos Botelho, e 1994 com 800 mm em Barra Bonita.

No reservatório de Tucuruí, a figura apresentou um período chuvoso de janeiro a maio e um período de estiagem de junho a dezembro (inverno /primavera), enquanto os ventos fortes sopraram de julho a dezembro e os ventos fracos de janeiro a junho (verão / outono).

### 3.2.2.5 Vento

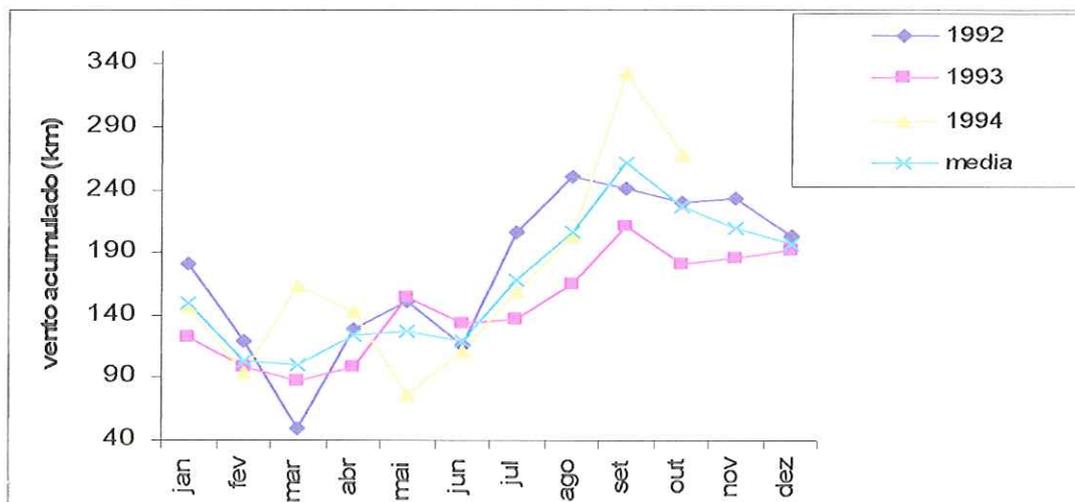


Figura 21 Velocidade do vento acumulada em função dos meses do ano no reservatório da UHE de Barra Bonita, no período de janeiro a junho (ventos fracos) e de junho a dezembro (ventos fortes) de 1992 a 1994. IETC (2001).

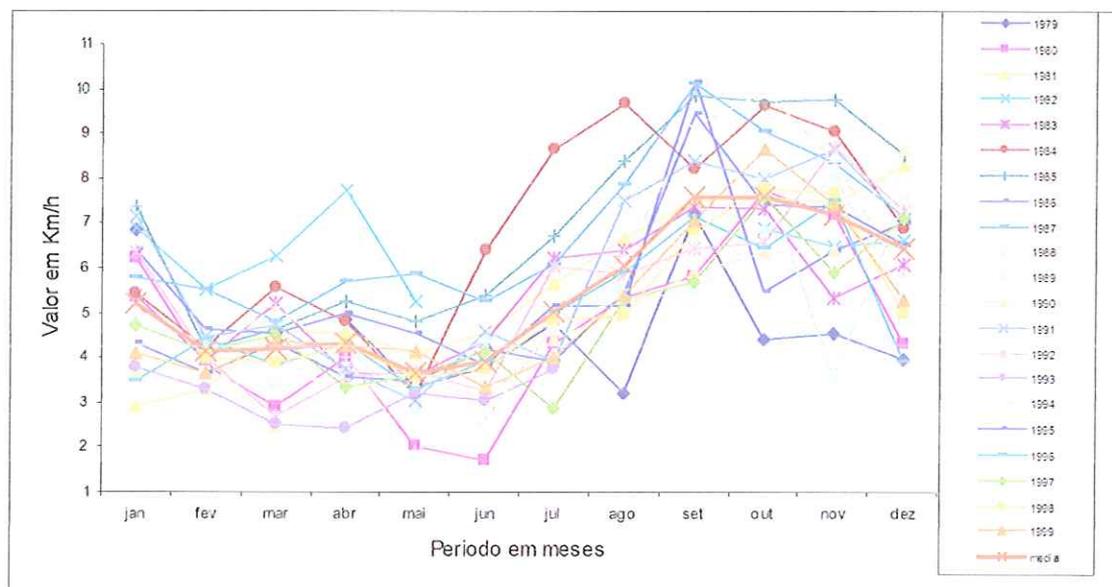


Figura 22 Velocidade de ventos no reservatório da UHE Carlos Botelho em função dos meses do ano, no período de julho a dezembro de ventos fortes, de janeiro a junho de vento fraco, de 1979 a 1999.

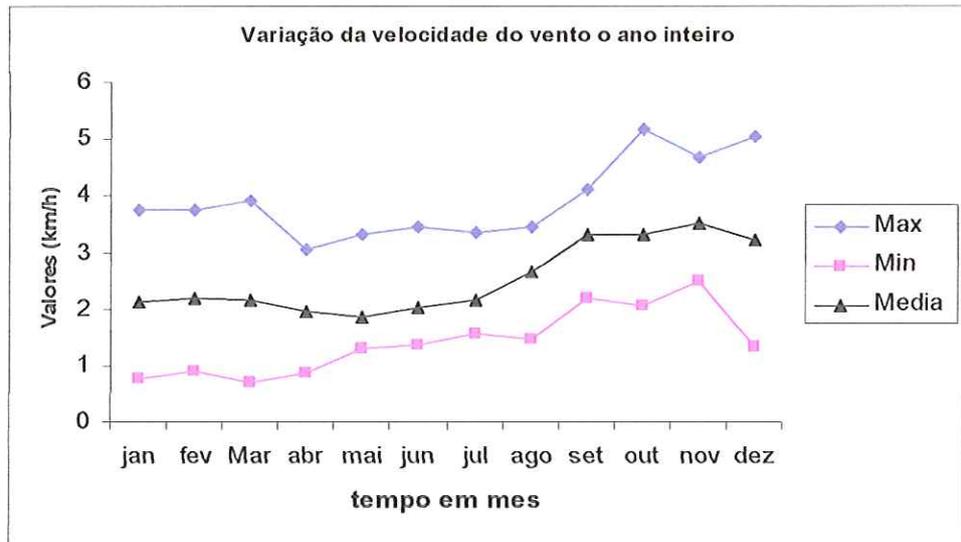


Figura 23 Velocidade de vento no reservatório de Tucuruí em função dos meses do ano, mostrando o período de ventos fortes de agosto a março e o período de ventos fracos de abril a julho em 1987.

Os estudos relativos aos ventos foram apresentados nas figuras 21 (Barra Bonita) no período de 1992 a 1994, na figura 22 (Carlos Botelho de 1979 a 1999) e na figura 23 (Tucuruí) em 1987. Na Barra Bonita, os resultados foram apresentados em forma de distância acumulada percorrida pelo vento, enquanto em Carlos Botelho e Tucuruí os resultados foram expressos em km/h. Apesar do uso medidas diferentes, os três casos apresentaram valores baixos de janeiro a junho e valores altos de agosto a dezembro.

3.2.3 Estudos hidrológicos

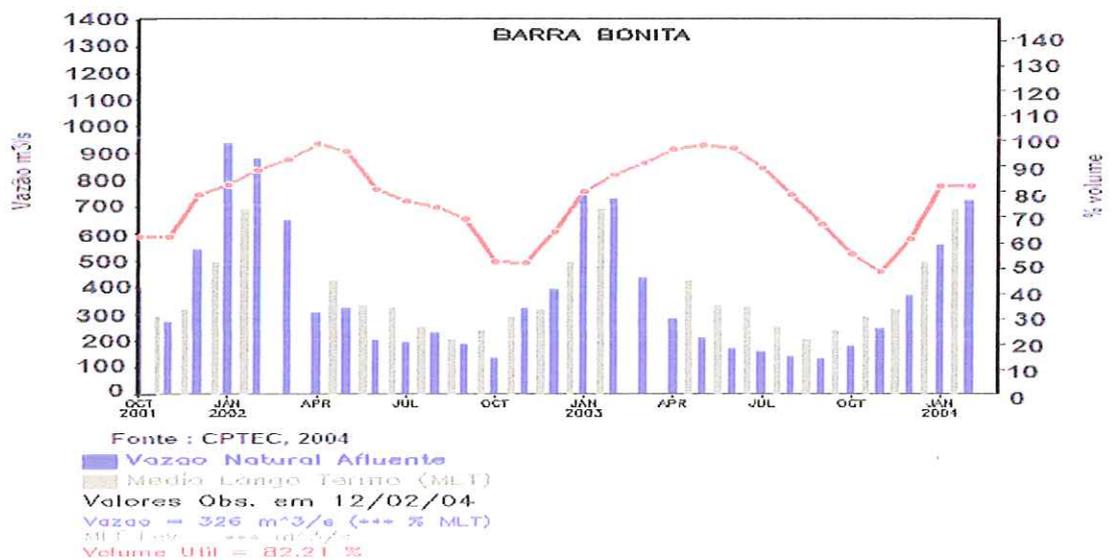


Figura 24 Hidrologia do reservatório da UHE de Barra Bonita nos anos de 2001;2002,2003 e 2004, para as vazões natural e afluente, média longo termo e volume útil. Fonte :CPTEC : [http://www.cptec.inpe.br/~energia/bacia\\_ti.shtml](http://www.cptec.inpe.br/~energia/bacia_ti.shtml) (2004)

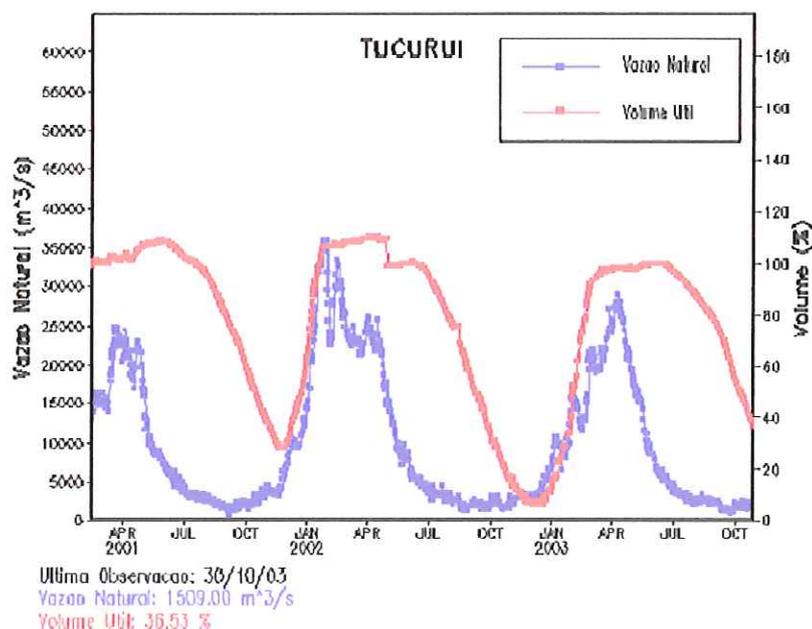


Figura 25 Hidrologia no reservatório da UHE de Tucuruí de 2001 a 2003, mostrando o regime de cheio de outubro a maio e o regime de seca de junho a setembro (Fonte CPTEC, 2003).

A hidrologia da Barra Bonita e Tucuruí registrada estão exibidas nas figuras 24 e 25, respectivamente. Os resultados revelam também período de valores elevados, chegando a 900 m<sup>3</sup>/s na Barra Bonita no mês de janeiro e 35000 m<sup>3</sup>/s em Tucuruí, também no mesmo mês e período de valores baixos em setembro com 150 m<sup>3</sup>/s na Barra Bonita e 1000 m<sup>3</sup>/s em Tucuruí.

### 3.2.4- Tempo de retenção

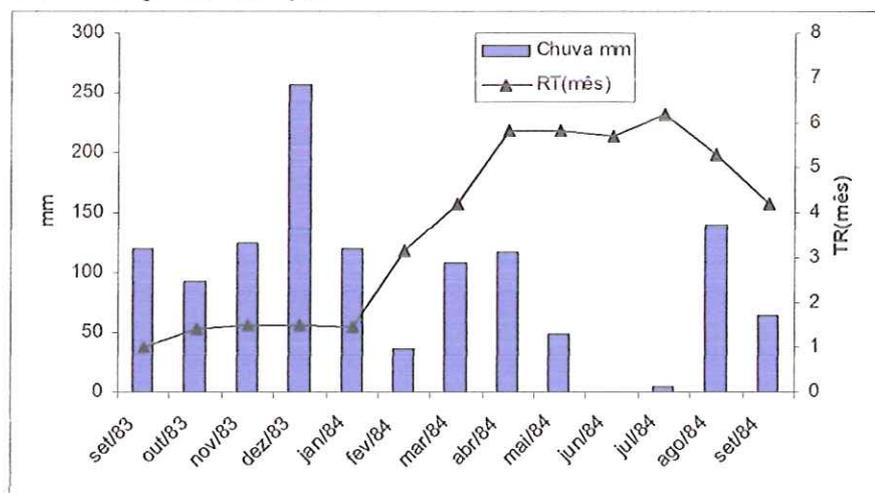


Figura 26 Tempo de retenção, da precipitação no período chuvoso (setembro – fevereiro) e no período seco (março – agosto), no reservatório da UHE de Barra Bonita, por Tundisi e Matsumura-Tundisi (1990).

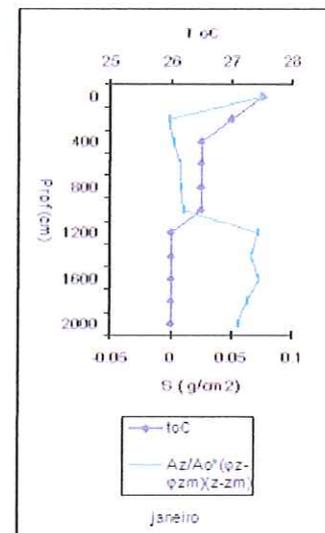
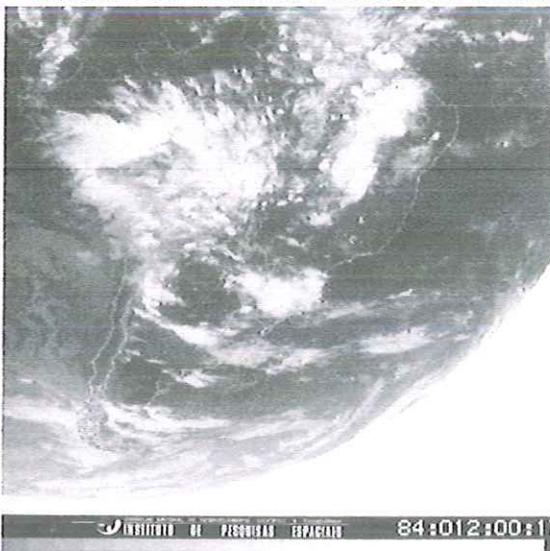
## Temperatura do ar

Com relação ao tempo de retenção (TR), foram obtidos dados referentes ao reservatório de Barra Bonita. Os resultados da figura 18 revelam um período de retenção longa, de março a setembro (outono e inverno), e período de retenção curta, de outubro a fevereiro, período chuvoso. Sendo um parâmetro-chave no estudo da qualidade da água, Straškraba (1999) classifica as represas em função do maior ou menor tempo de retenção. Tempo de retenção menor que duas semanas é um ecossistema com características similares ao do rio; com tempo de retenção superior a duas semanas porém menor que um ano, são ecossistemas com posição intermediária entre represa e lago e com TR maior que um ano são ecossistemas próximo do lacustre. Na Barra Bonita o TR é relativamente médio, variando de 1 mês no período chuvoso de setembro a fevereiro (figura 26) e de 2 a 6 meses no período seco. Estes resultados conferem com o de Henry (2004), realizado com quatro reservatórios. Segundo o autor, as médias anuais dos reservatórios Rio Pardo de janeiro a dezembro de 1979, da represa Das Garças de janeiro a dezembro de 1997, de Barra Bonita de julho de 1992 a junho de 1993 e de Jurumirim de julho de 1992 a junho de 1993 tiveram os respectivos valores 7,08 dias, 68,92 dias, 101,08 dias e 302,42 dias .

Em tempo prático, estes valores indicam que, durante o ano, a água acumulada seria renovada 50 vezes na represa do Rio Pardo, 5,3 vezes na represa Das Garças, 3,6 vezes na represa de Barra Bonita e 1,2 vezes a represa de Jurumirim ( HENRY, 2004).

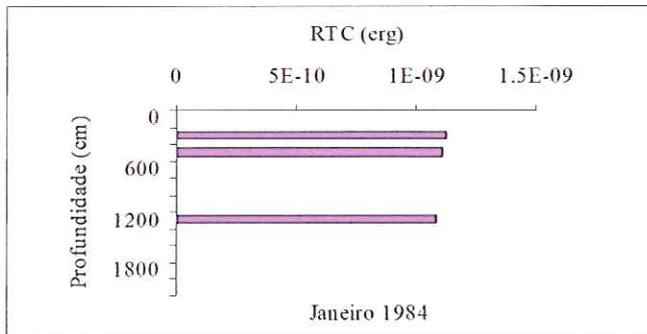
### 3.3 Estudos limnológicos

3.3.1 Limnologia física : perfil térmico, resistência térmica à circulação, estabilidade e trabalho do vento no reservatório de Barra bonita

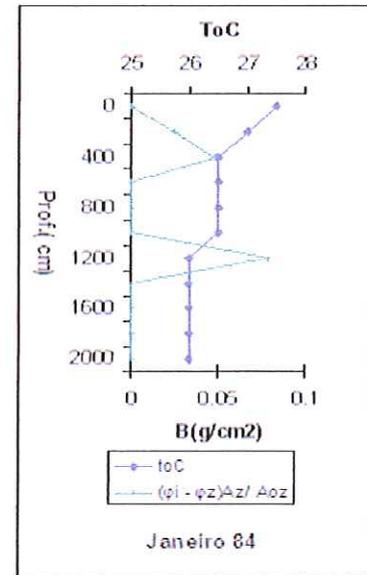


B-Estabilidade

A 12/01/84 V= 1,19 km/h



C- Resistência térmica a circulação



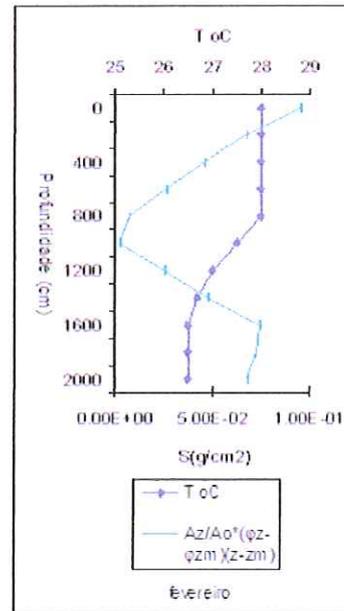
D

Figura 27 Parâmetros (B) estabilidade, (C) resistência Térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório em 12 de janeiro de 1984, da UHE Barra Bonita e a imagem de satélite do período.

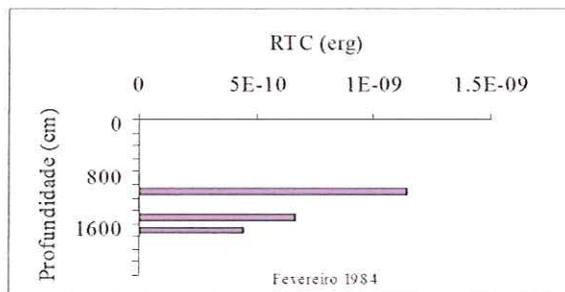
O estudo das características físicas dos reservatórios foi feito a partir de imagem de satélite, quando disponível, da determinação dos gráficos de estabilidade, da resistência térmica à circulação e do trabalho do vento. Os resultados dos estudos da Barra Bonita encontram-se nas figuras 27 a 38.

A figura 27 resume o episódio ocorrido em 12 de janeiro de 1984. A velocidade do vento registrada no Estado de São Paulo foi de 1,19 km/h. O perfil térmico mostra uma zona de termoclina entre 1000 e 1200 cm de profundidade onde ocorre aumento de estabilidade. O gráfico 27C da resistência térmica à circulação mostra uma primeira resistência de superfície e outra de 1000 a 1200 cm, coincidindo com as termoclinas. O trabalho do vento apresenta maior valor aos 1000 a 1400 cm de profundidade, onde aparece uma zona de resistência térmica à circulação (RTC), interrompendo os movimentos de turbulência da superfície do reservatório provocados pela ação do vento. Houve então a formação de nebulosidade com ligeira queda de temperatura, sem avanço de frente fria, acompanhado de um vento sem grandes conseqüências sobre o reservatório que se apresentou estratificado.

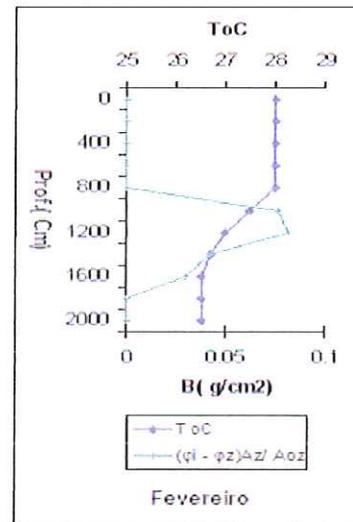
A 10/02/84 V= 19,19 km/h



B: 10/02/84



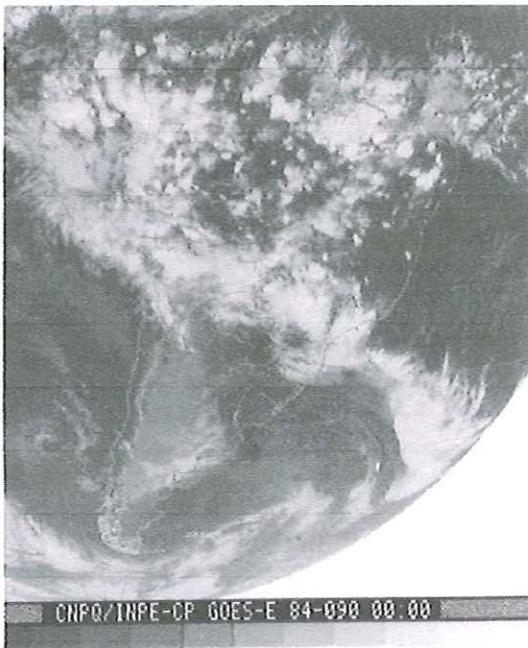
C: 10/02/84



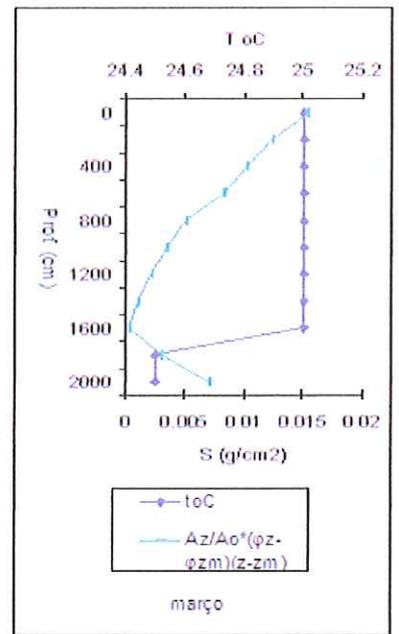
D: 10/02/84

Figura 28 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em fevereiro de 1984, da UHE Barra Bonita e (A) imagem de satélite não disponível

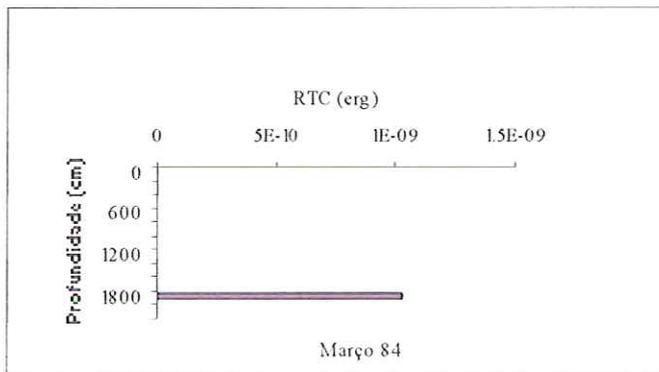
No dia 10 de fevereiro (figura 28). a temperatura do ar ( $28^{\circ}\text{C}$ ) e os ventos fortes de 19,19 km/h causaram uma circulação da zona epilimnica até aos 800 cm, reduzindo a estabilidade e o trabalho do vento próximo de zero. A formação da RTC com aumento da estabilidade e uma resistência ao trabalho do vento ocorreu abaixo da termoclina de 800 a 1600 cm. Neste período, apesar da velocidade do vento, o reservatório apresentou-se estratificado, com uma zona epilimnica, metalimnica e hipolimnica, e uma forte estabilidade de  $95,30\text{ g}\cdot\text{cm}/\text{cm}^2$  no metalímnio, causando uma proteção ao revolvimento do sedimento no fundo do reservatório.



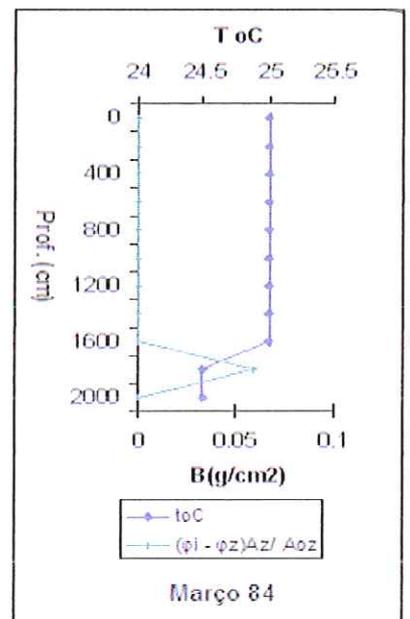
A: 30/03/84 V= 24 km/h



B: 30/03/84

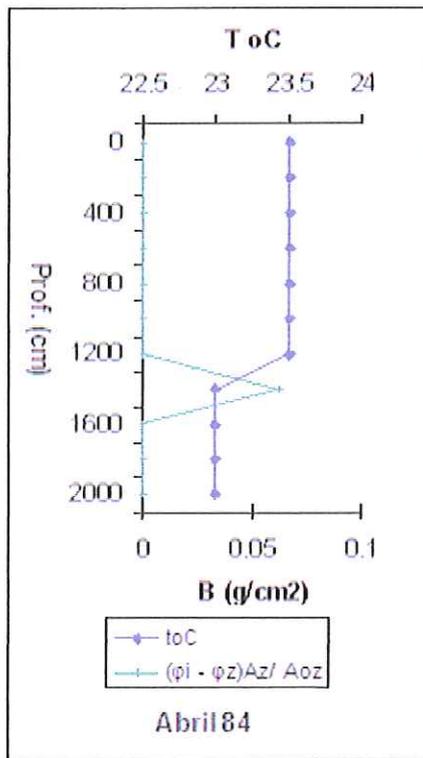


30/03/1984

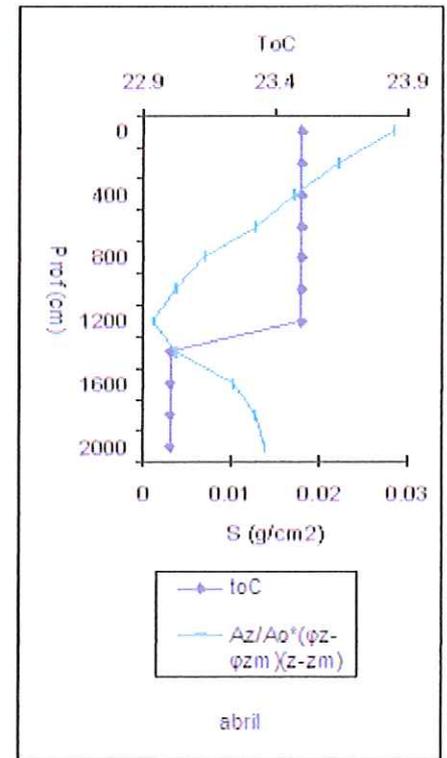


D: 30/03/84

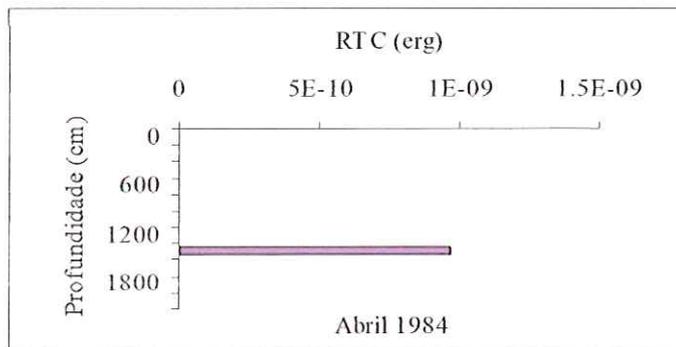
Figura 29 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em março de 1984, da UHE Barra Bonita e (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano. A figura 29 caracteriza o episódio de 30 de março de 1984, com velocidade de 24 km/h. Na figura 29A, observou-se uma linha de nebulosidade caracterizando o avanço de uma frente. Este provoca uma circulação do reservatório indicado pelo perfil térmico. Como consequência, há redução da estabilidade na zona de atuação do vento e formação da RTC no fundo, impedindo o revolvimento do substrato do fundo. Nestas situações, o reservatório apresentou o ponto de estabilidade aos 1600 cm.



D: 13/04/1984 V= 18 km/h



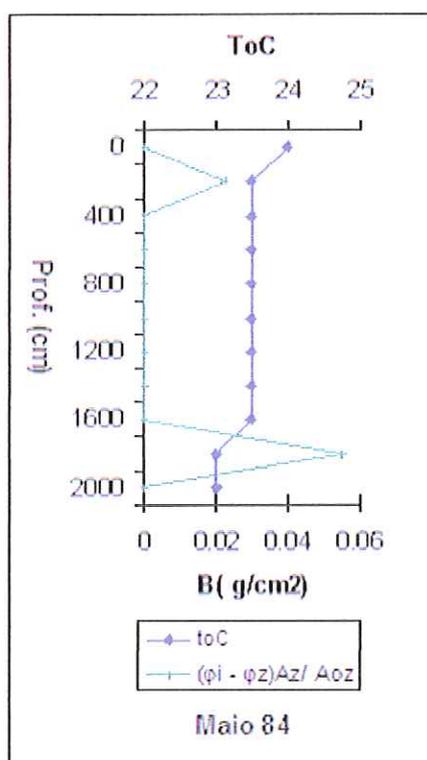
B: 13/04/1984



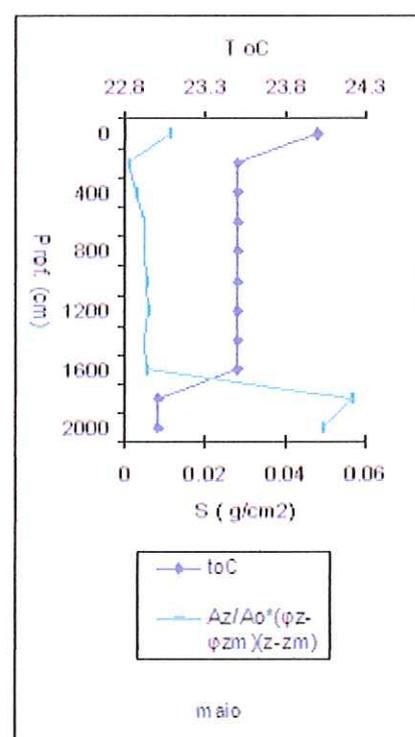
C 13/04/1984

Figura 30 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em abril de 1984, da UHE Barra Bonita e (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano não disponível.

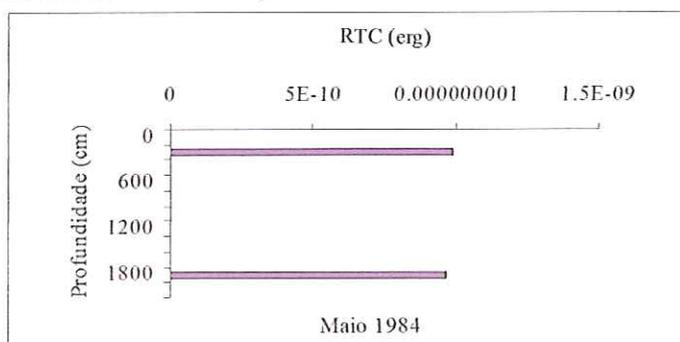
A situação em 13 de abril está ilustrada na figura 30. A imagem de satélite do episódio não foi disponibilizada. Da análise das figuras 30 B,C e D, constata-se situação semelhante à anterior; entretanto, o ponto de estabilidade ficou próximo à superfície aos 1200 cm, pela redução da velocidade do vento, resultando a formação de RTC a 1400 cm.



D: 11/05/1984 V= 1,19 km/h



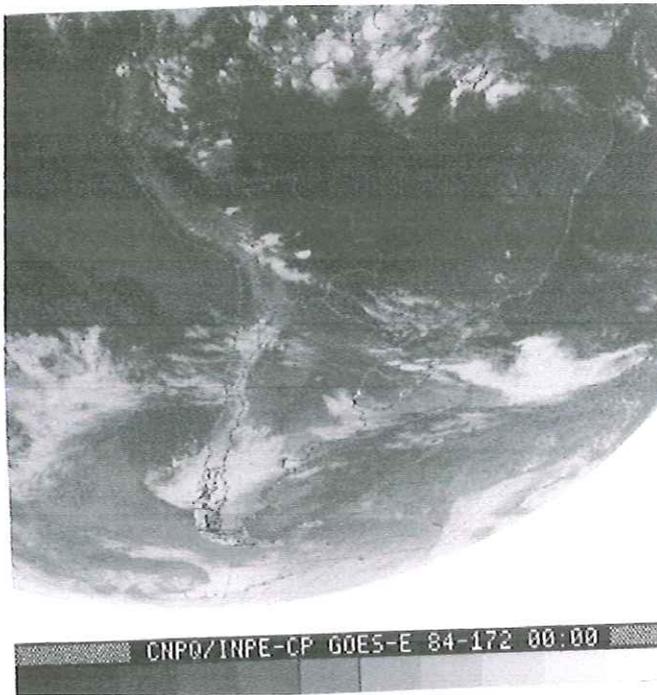
B: 11/05/1984



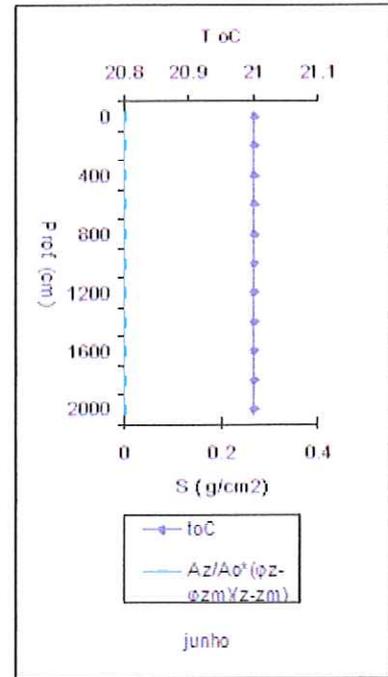
C: 11/05/1984

Figura 31 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em abril de 1984, da UHE Barra Bonita e (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano não disponível.

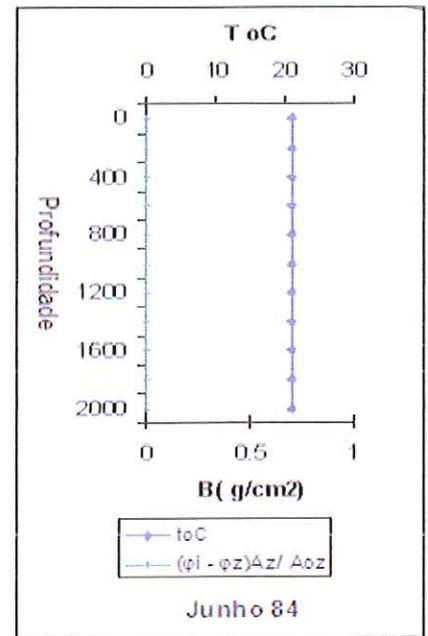
A figura 31 (11 de maio 1984), sem disponibilidade de imagem, indica uma zona de barreira superficial, criando um isolamento do corpo da água contra ação do vento. Este fenômeno manteve uma camada homogênea entre as duas termoclinas ou RTC. Houve circulação e redução de estabilidade. Vento fraco de 1,19 km/h.



A:20/06/1984 V= 0 km/h



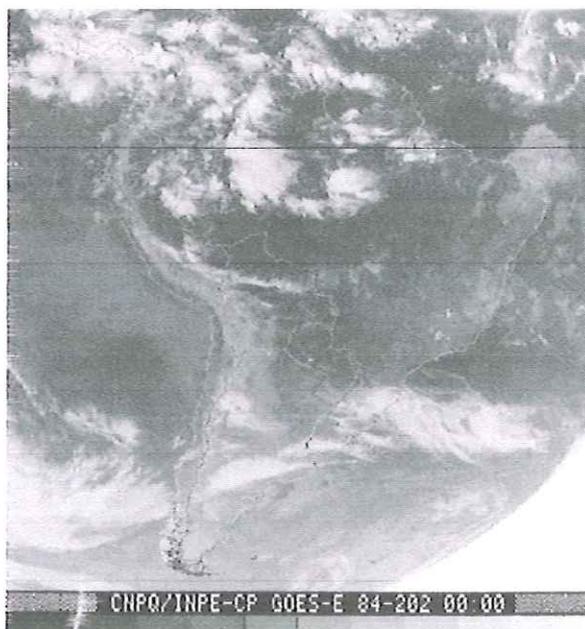
B: 20/06/1984



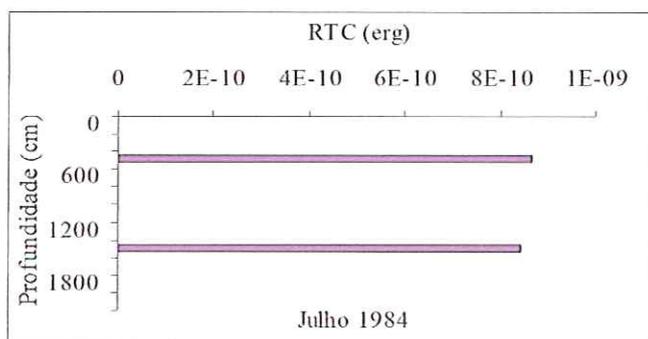
D 20/06/1984

Figura 32 Parâmetros: (B) estabilidade e temperatura da água, (C) resistência térmica à circulação sendo nula, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em junho de 1984, da UHE Barra Bonita e (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano.

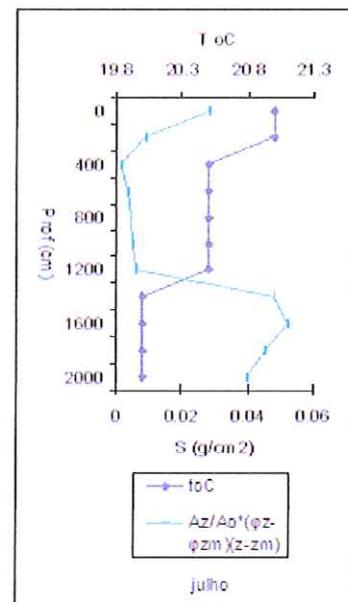
Figura 32 (junho de 1984): a imagem apresenta a nebulosidade em São Paulo provocada por nuvens altas. Tempo seco sem vento; embora com a ausência de vento, houve uma homogeneização da densidade da água causando uma circulação completa e uma estabilidade e resistência térmica à circulação nula.



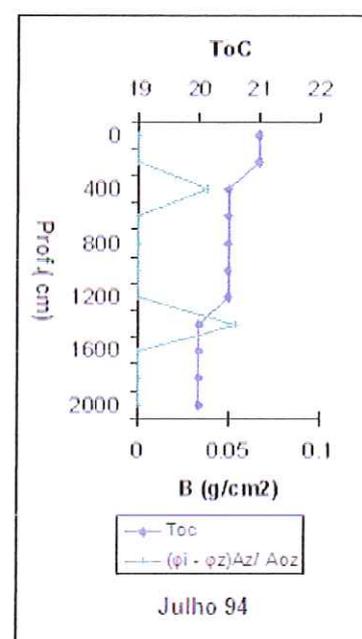
A: 20/07/1984 V= 0 km/h



C:20/07/1984



B: 20/07/1984



D: 20/07/1984

Figura 33 Parâmetros: (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em julho de 1984, da UHE Barra Bonita.

Figura 33 (20 de julho 1984): a imagem de satélite da figura 33A mostra o avanço de nebulosidade. Neste período do ano, as frentes entram tipicamente a cada 5-7 dias. Sobre o Estado de São Paulo, existem poucas nuvens. O reservatório de Barra Bonita apresentou –se estratificado com estabilidade aos 400 cm e vento nulo.

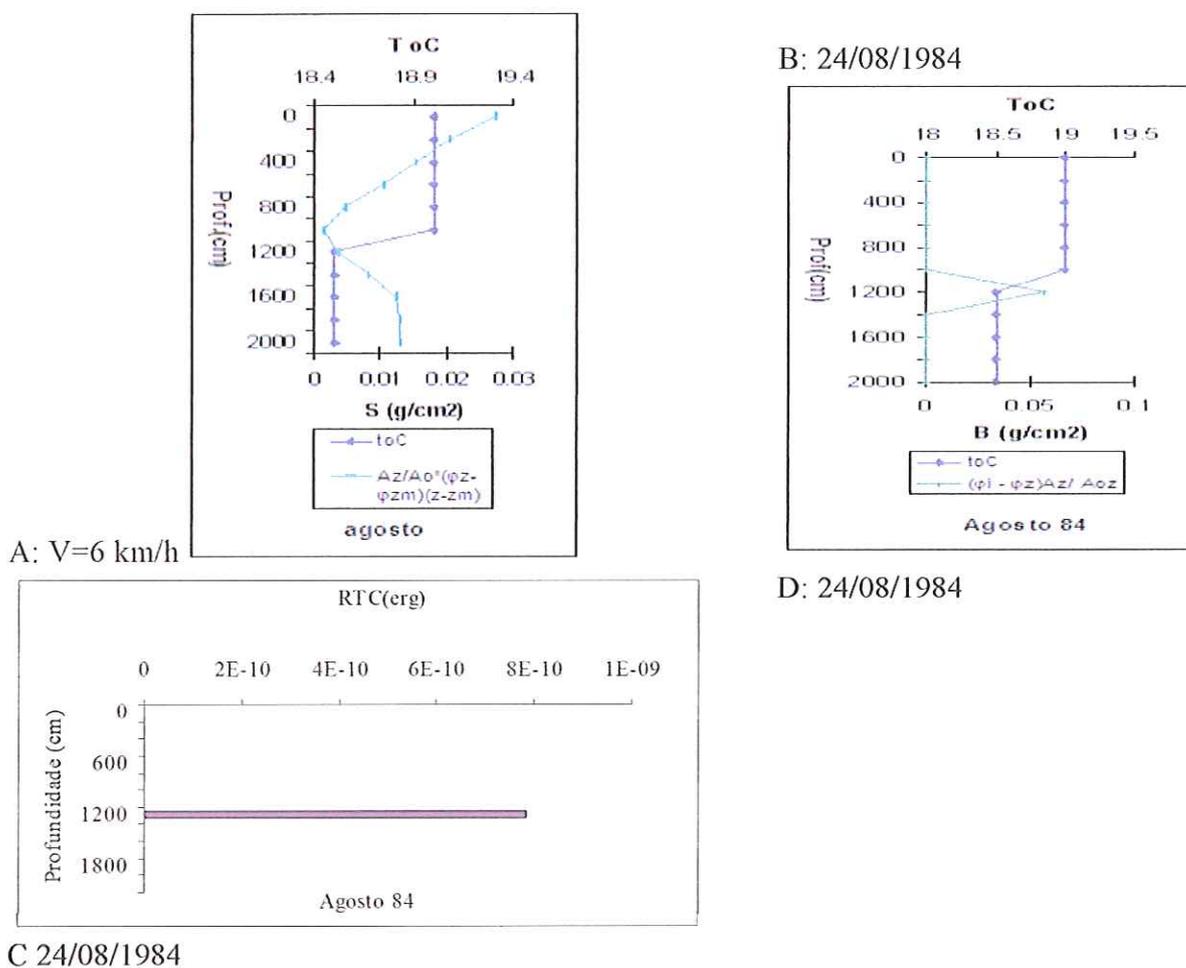
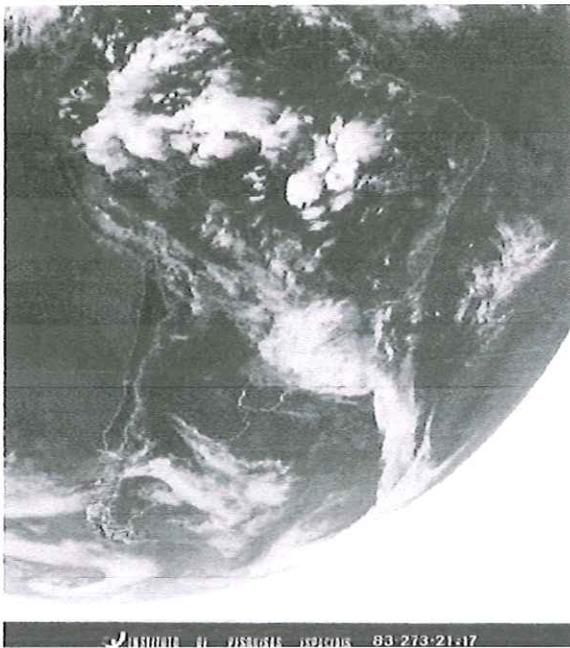
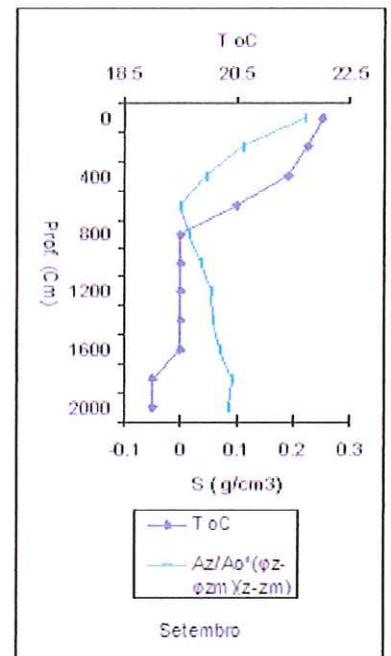


Figura 34 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em agosto de 1984, da UHE Barra Bonita e (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano não disponível.

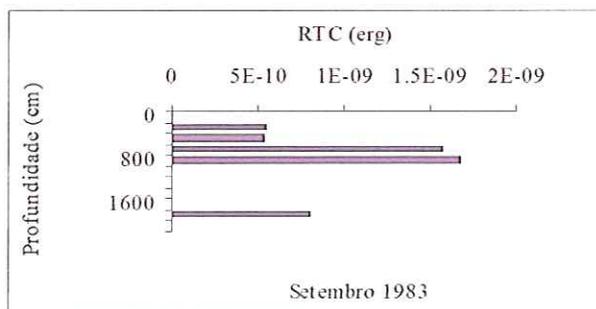
A figura 34 apresenta situação semelhante à do dia 24 de agosto de 1984, com velocidade de 6 km/h. A imagem de satélite não foi disponível, entretanto o perfil de temperatura mostrou um reservatório estratificado com ponto de estabilidade próxima à superfície. Houve formação de uma termoclina ou RTC aos 1200 cm. O estresse causado pelo vento não foi suficiente para uma circulação completa do reservatório.



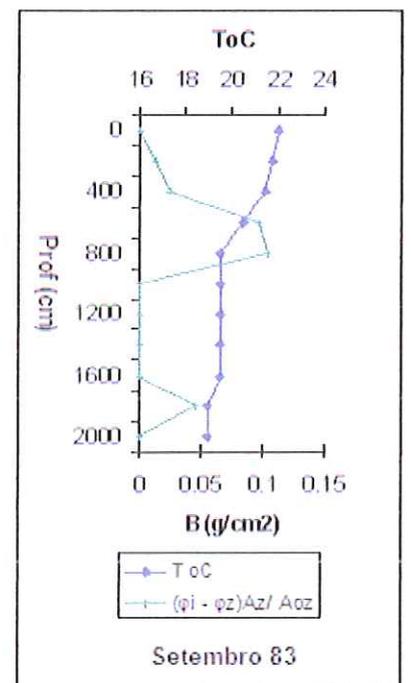
A: 30/09/1983 V= 6 km/h



B: 30/09/1983



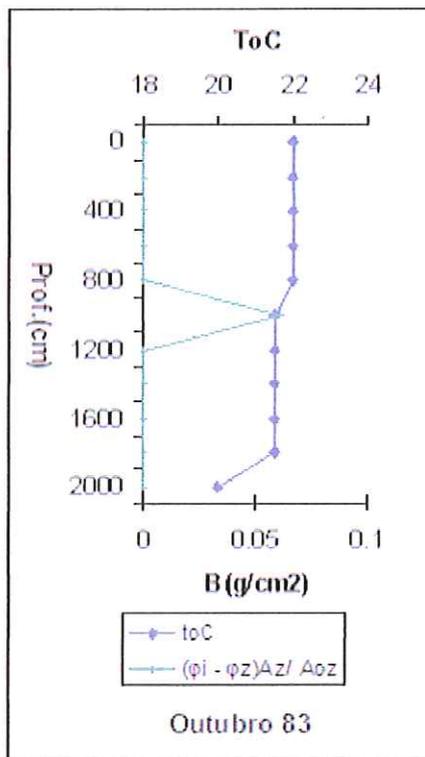
C 30/09/1983



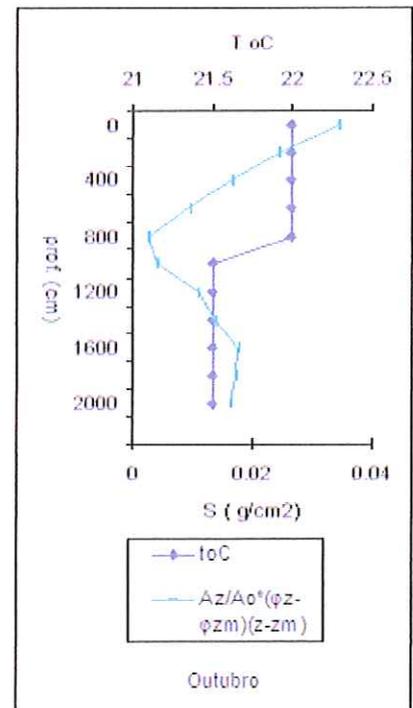
D: 30/09/1983

Figura 35 Parâmetros: (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em setembro de 1983, da UHE Barra Bonita.

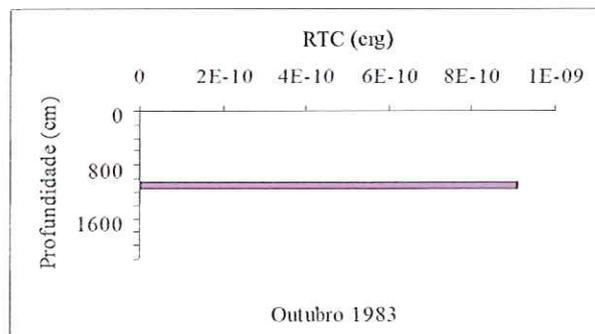
No dia 30/09/83 (figura 35), o episódio mostra uma imagem de satélite apresentando a frente com muitas nuvens e vento de 6 km/h. Houve formação de uma camada protetora em virtude da diferença de temperatura entre a coluna de água e a temperatura do ar, indicada pela estabilidade, a formação de RTC e a estratificação do reservatório.



D: 14/10/1983 ; V= 26 km/h



B: 14/10/1983



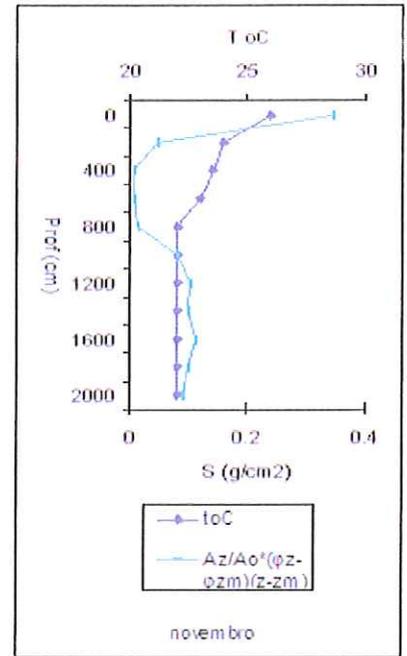
C 14/10/1983

Figura 36 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em outubro de 1983, da UHE Barra Bonita. (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano não disponível.

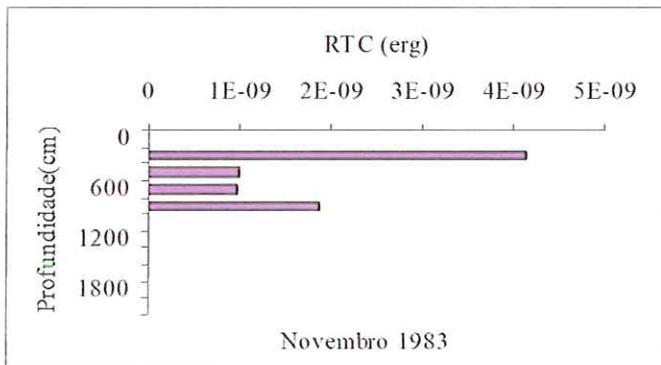
Em 14 de outubro de 1983 (figura 36), embora a imagem não esteja disponível, é possível observar a estrutura estratificada do reservatório com RTC e termoclina aos 1100 cm e a estabilidade aos 800 cm. O vento forte de 26 km/h não foi suficiente para romper a resistência térmica à circulação e provocar uma circulação completa do reservatório.



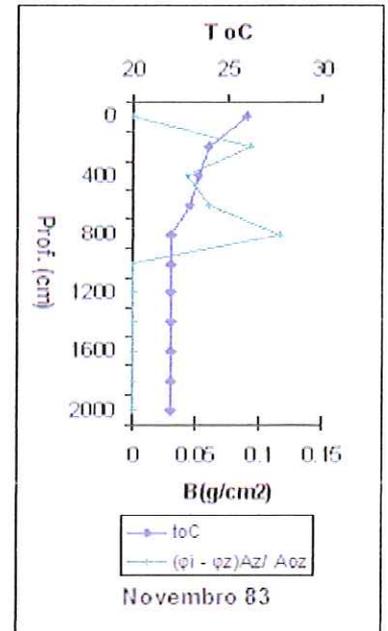
A: 25/11/1983 V= 1,19 km/h



B: 25/11/1983



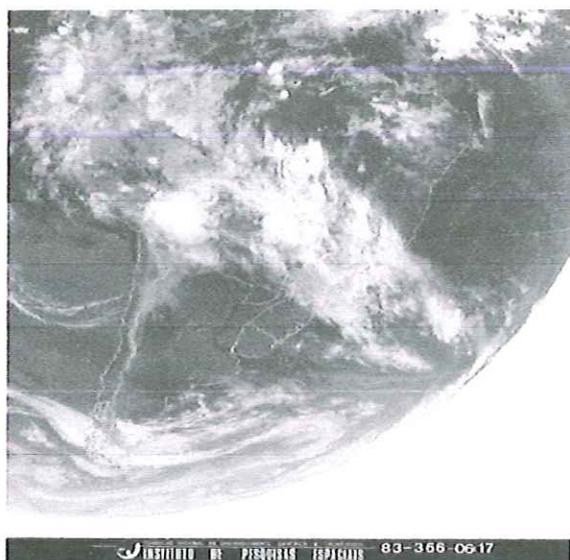
C :25/11/1983



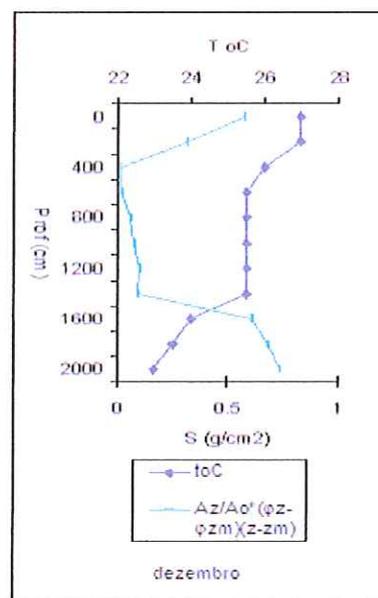
D: 25/11/1983

Figura 37 Parâmetros: (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em novembro de 1983, da UHE Barra Bonita. (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano.

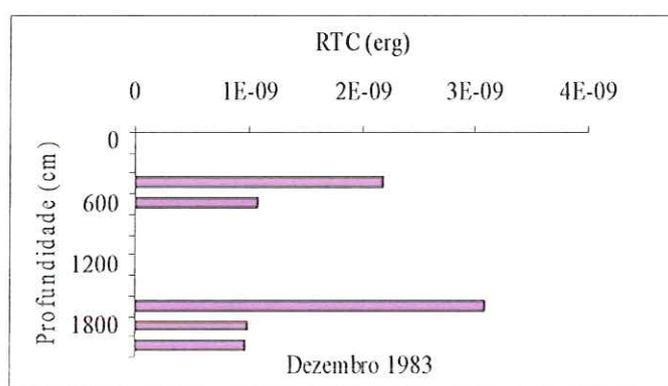
Ao contrário do mês anterior, em 11 de novembro de 1983 (figura 37), a imagem de satélite mostra formação de nebulosidade do Atlântico até o Mato Grosso, passando pelo litoral do Espírito Santo. Houve passagem da frente dias antes da coleta de dados. Logo em seguida, a velocidade de vento no dia de coleta foi de 1,19 km/h e o reservatório apresentou-se estratificado.



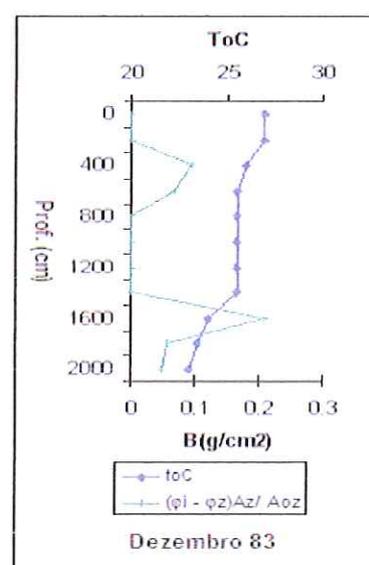
A: 22/12/83 : 8,39 km/h



B: 22/12/83



C 22/12/1983

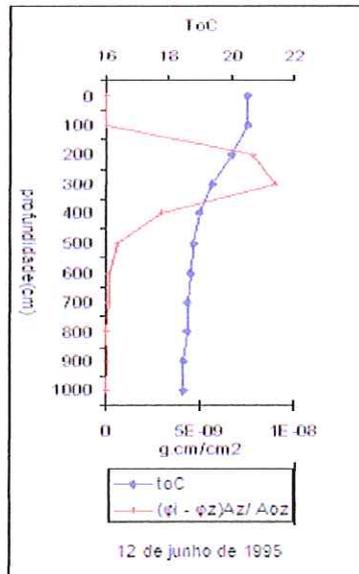


D: 22/12/83

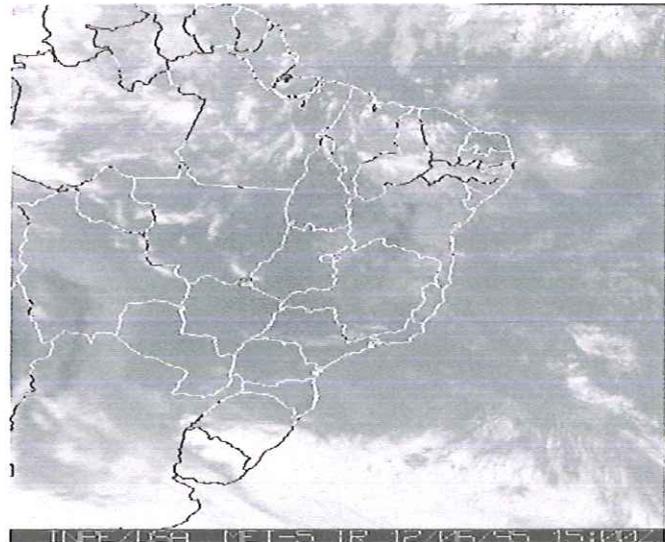
Figura 38 Parâmetros: (A) imagem de satélite relativa ao mesmo período do ano, (B) estabilidade, (C) resistência térmica à circulação e temperatura da água, (D) trabalho do vento em função da profundidade do reservatório, em dezembro de 1983, da UHE Barra Bonita.

Em 22 de dezembro de 1983 (figura 38), a imagem indica muitas nuvens e uma nebulosidade associada à alta da Bolívia, estendendo-se da costa oeste da América do Sul até a costa leste do Brasil, do litoral de São Paulo ao Espírito Santo. Esta nebulosidade está associada à zona de instabilidade, correspondendo à Zona de Convergência Atlântico Sul (ZCAS). A instabilidade é acompanhada de ventos fortes de 8,39 km/h, resultando uma estratificação do reservatório com formação de termoclina. O reservatório apresenta-se estável.

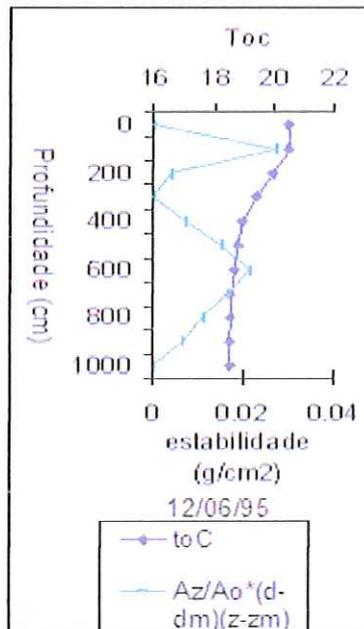
### 3.3.2 Limnologia física: perfil térmico, estabilidade, resistência térmica a circulação e trabalho do vento na UHE Carlos Botelho



A Perfil térmico e Trabalho do vento

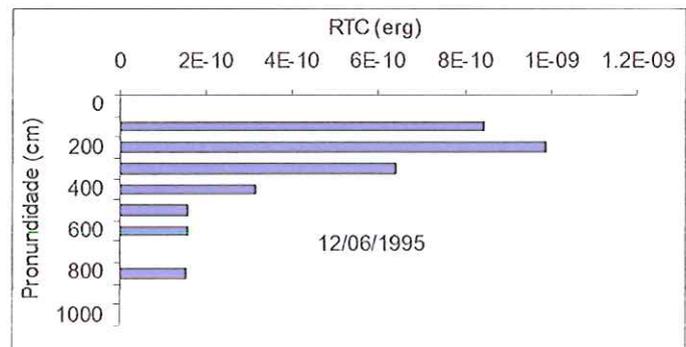


B imagem 12/06/95 V= 2,71 km/h



Estabilidade e perfil térmico

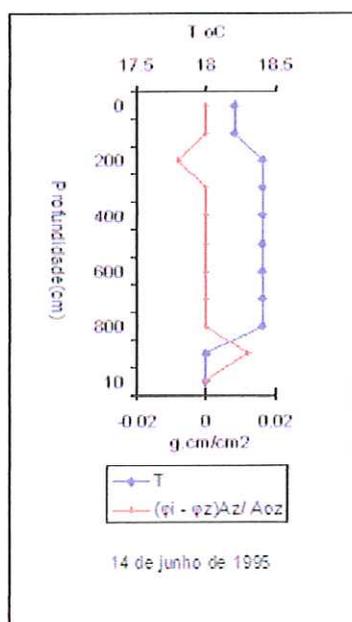
Figura 39 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 12/06/1995, no reservatório da UHE Carlos Botelho.



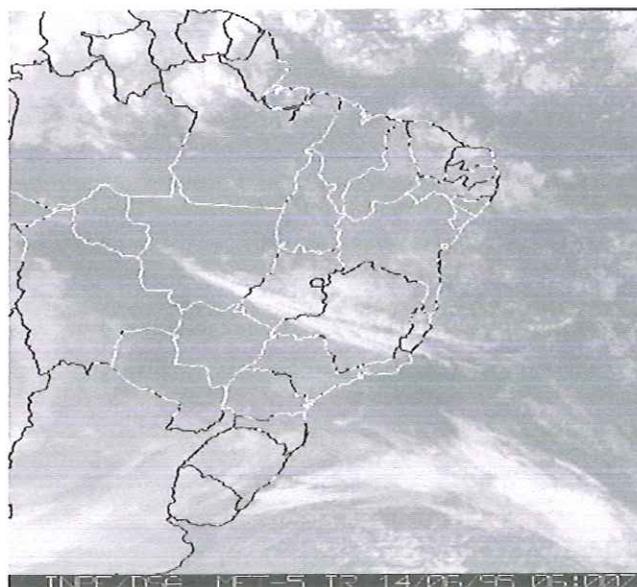
D Resistência térmica à circulação

Na figura 39 (12/06/95), pode ser vista a permanência de uma ZCAS( Zona de Convergencia Atlântico Sul) com intensidade e grande área de instabilidade e vários núcleos de desenvolvimento vertical. Sobre o oceano Atlântico, observa-se outro núcleo de desenvolvimento vertical, no qual podem ocorrer chuvas esparsas e isoladas (chuvas

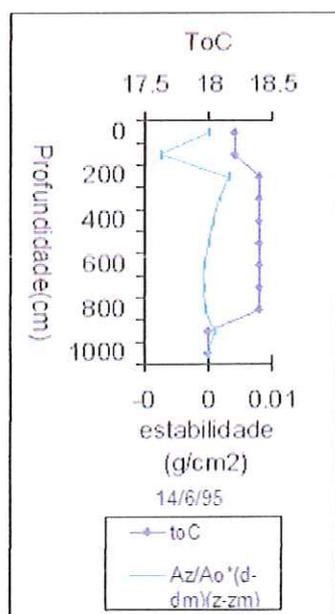
fracas e pancadas de chuvas); no sul do Brasil (sobre o Rio Grande do Sul) e Uruguai, pode ser vista uma massa de ar instável com chuvas fortes e pancadas de chuvas. Sobre São Paulo, há escassez de nuvens. As conseqüências sobre o reservatório são estratificação com formação de RTC de  $5,68 \cdot 10^{-16}$  Joule ; um trabalho de vento de  $14,38 \cdot 10^{-6}$  g.cm/cm<sup>2</sup> e uma estabilidade de  $32,43$  g.cm/cm<sup>2</sup>; o vento de  $2,71$  km/h ( $0,75$  m/s) e temperatura do ar  $20,2^\circ$  C sem chuva.



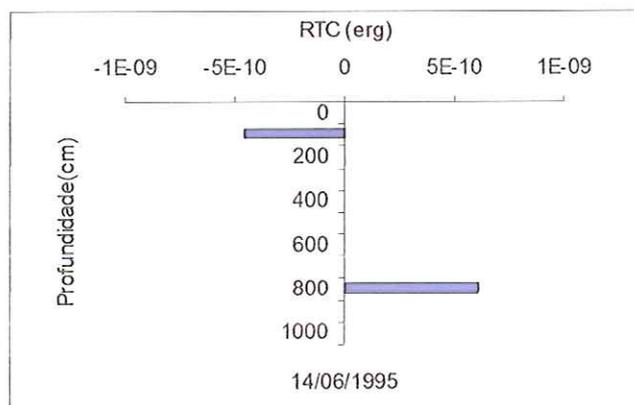
A Trabalho do vento



B imagem 14/06/95 V = 1,51 km/h



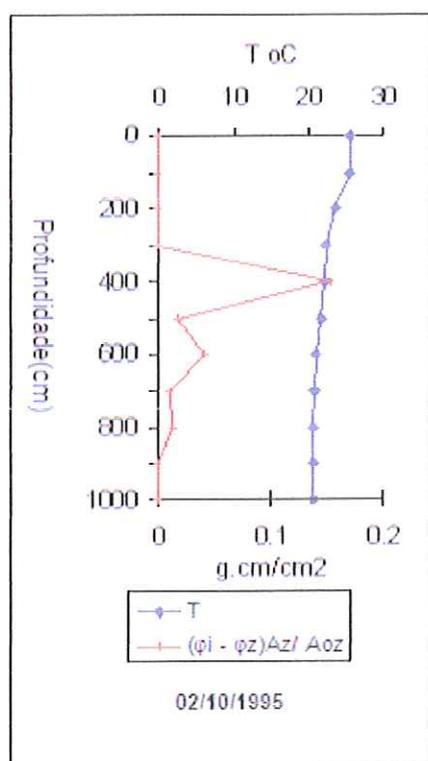
C Estabilidade



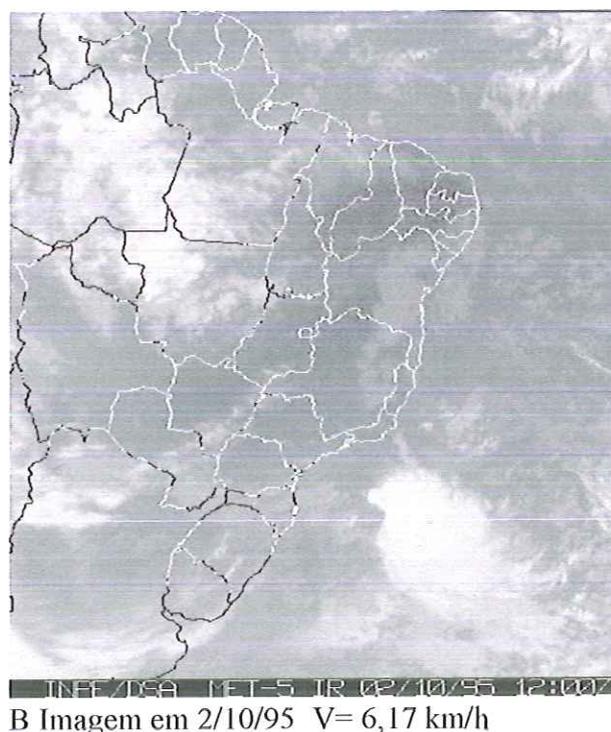
D Resistência térmica à circulação

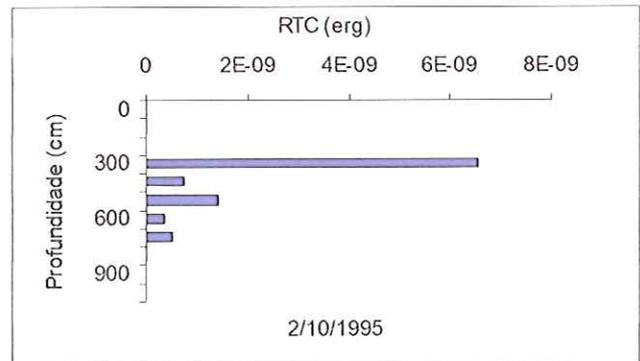
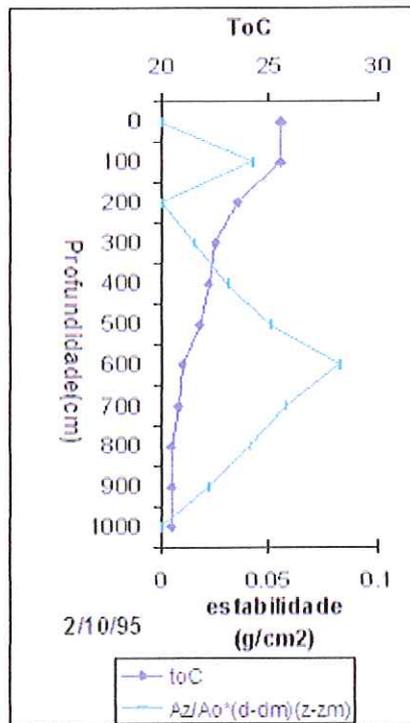
Figura 40 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água (C), resistência térmica à circulação (D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 14/06/1995, no reservatório da UHE Carlos Botelho.

A figura 40 mostra as variações climáticas e suas conseqüências sobre o reservatório Carlos Botelho (Lobo-Broa). Em 14/06/95, a imagem da figura 40 B mostra um jato subtropical nesta região. A frente em SP não deve ser intensa e bem definida e está associado a um cavado à superfície e a uma crista em altos níveis (atmosfera) formados pelo aumento do gradiente de temperatura e podendo provocar chuvas moderadas e fortes em virtude do deslocamento da massa de ar instável ( sobre o RS e Uruguai). Sobre a região, entretanto, passou uma massa de ar menos instável, podendo provocar chuvas menos intensas. Como conseqüência, a análise dos gráficos A;C e D mostra um perfil térmico com desenvolvimento de uma termoclina invertida, na superfície, e outra normal na profundidade de 8 m, protegendo uma zona isotérmica. A termoclina invertida indica uma perda de calor do reservatório para a atmosfera. A temperatura do ar no período foi de 18° C, diferente da temperatura da água (18,2° C) e a velocidade do vento de 1,51 km/h (0,41 m/s). Não houve registro de chuva sobre a microbacia do Broa. Os valores registrados foram:  $S = -0,21$ ;  $RTC = 3,25 \cdot 10^{-16}$  Joule;  $B = 2,08 \cdot 10^{-6}$  g.cm/cm<sup>2</sup>.



A Trabalho do vento e perfil térmico



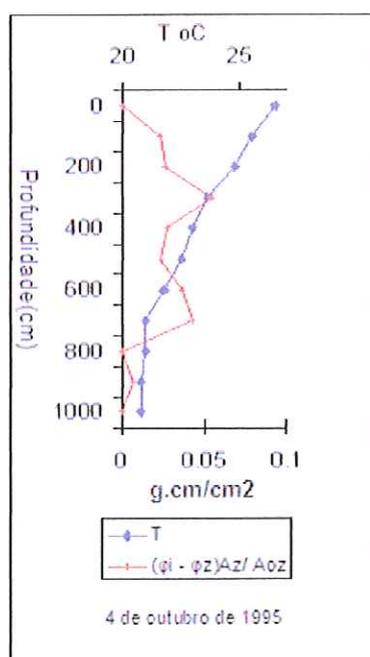


D: Resistência térmica à circulação

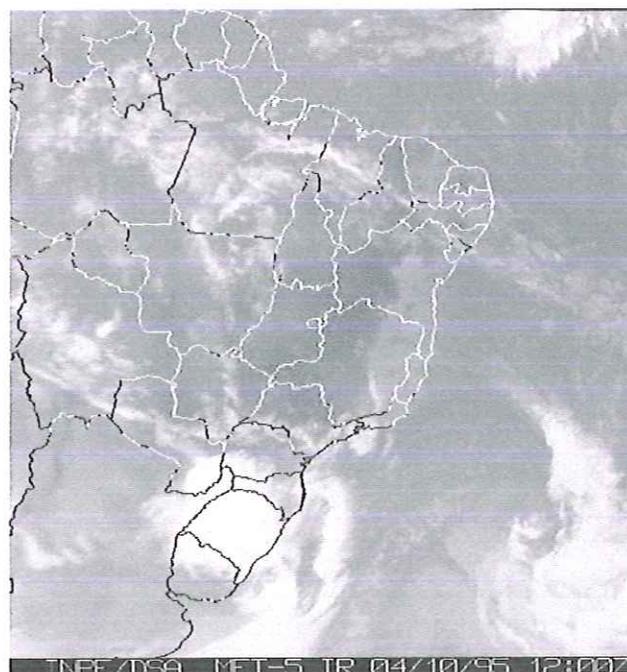
C: Estabilidade e perfil térmico

Figura 41 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água (C), resistência térmica à circulação (D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 2/10/1995, no reservatório da UHE Carlos Botelho.

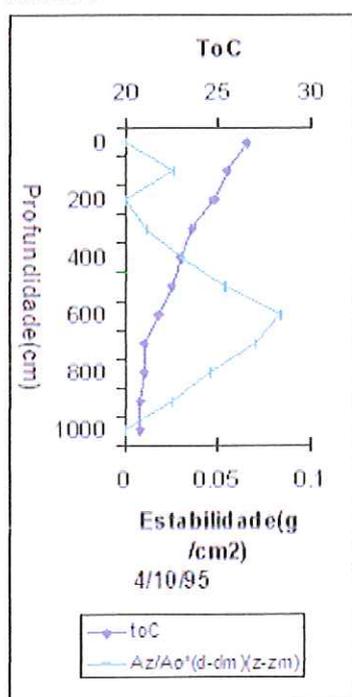
O episódio em 2/10/95 (figura 41) apresenta a ZCIT em aproximadamente 5°N e sem muita intensidade. Na costa leste do Brasil (de Pernambuco a Minas Gerais), observa-se a ocorrência de nuvens baixas, associadas a chuvas fracas, chuviscos. Na costa oeste da América do Sul, uma área de instabilidade, associada à Alta da Bolívia. Na região sul do Brasil, pode ser vista, também, uma área de instabilidade, sendo esta com menor intensidade, podendo ser associada à formação de nuvens baixas e médias, com chuvas fracas e chuviscos. O reservatório apresentou uma estratificação com uma camada superficial isotérmica. A temperatura do ar registrada foi de 24,4° C, uma velocidade de vento de 6,17 km/h e uma chuva de 22,1 mm. A temperatura da água foi de 25,2° C. A mistura da água de chuva com a água de temperatura elevada criou uma resistência térmica à circulação de  $9,58 \cdot 10^{-16}$  Joule; um trabalho de vento de 23,68 g.cm/cm<sup>2</sup> e uma estabilidade de 33,72 g.cm/cm<sup>2</sup>.



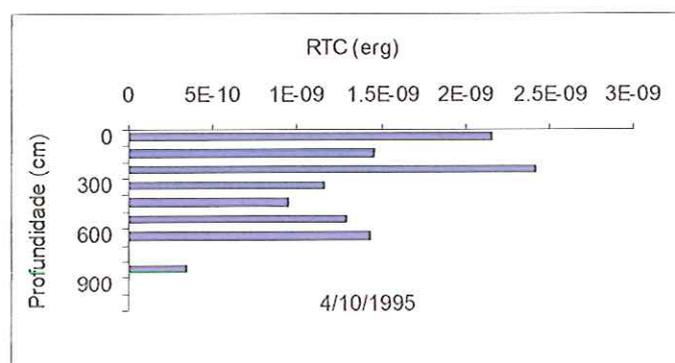
A: Trabalho do vento e perfil térmico



B: Imagem em 04/10/95 V=7,99 km/h



C: Estabilidade e perfil térmico

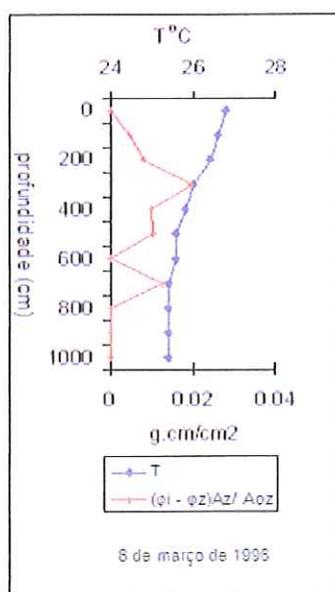


D: Resistência térmica à circulação

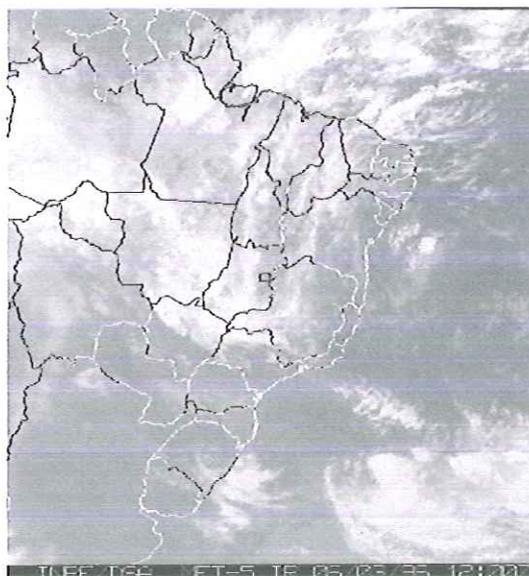
Figura 42 Trabalho do vento e temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água (C), resistência térmica à circulação (D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 4/10/1995, no reservatório da UHE Carlos Botelho.

A ZCIT em 4/10/95 (figura 42) apresenta-se estacionária com a mesma intensidade na costa leste do Brasil (do Ceará ao Rio de Janeiro). Na costa leste da América do Sul, observa-se a desintensificação da nebulosidade vista no dia anterior, mas podendo ocorrer chuvas fracas e fortes. No sul do Brasil, a chegada de um sistema

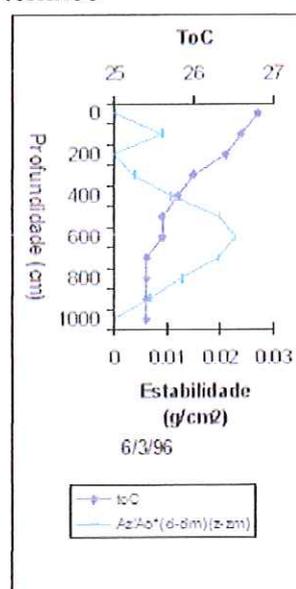
frontal, associada a nuvens de desenvolvimentos verticais (Cbs) e pancadas de chuvas é visível, também como os precedentes, sem grande influência sobre o reservatório. A temperatura do ar de  $23,5^{\circ}\text{C}$  contra uma temperatura de água de  $21^{\circ}\text{C}$  sem registro de chuva e uma velocidade de vento de  $7,99\text{ km/h}$  criaram uma resistência na coluna inteira do reservatório, que se apresentou estratificada. Os valores de RTC, B e S foram  $1,12 \cdot 10^{-15}\text{ Joule}$ ;  $6,54\text{ g.cm/cm}^2$  e  $10,43\text{ g.cm/cm}^2$ , respectivamente.



A: Trabalho do vento e perfil térmico

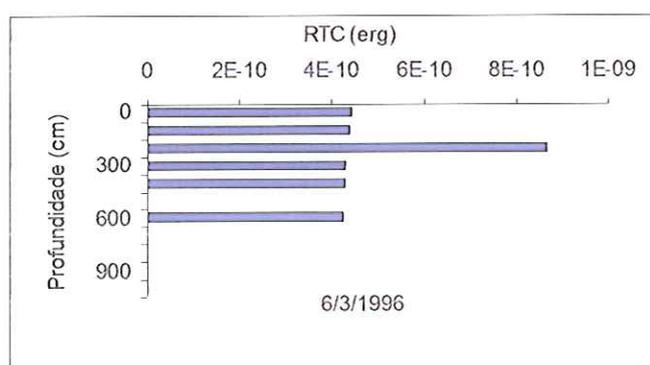


B: Imagem em 06/03/96  $3,67\text{ km/h}$



C:Est

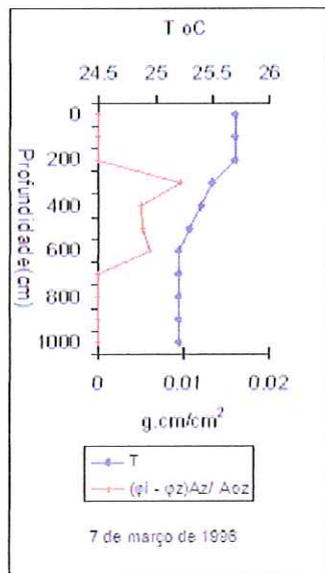
abilidade e perfil térmico



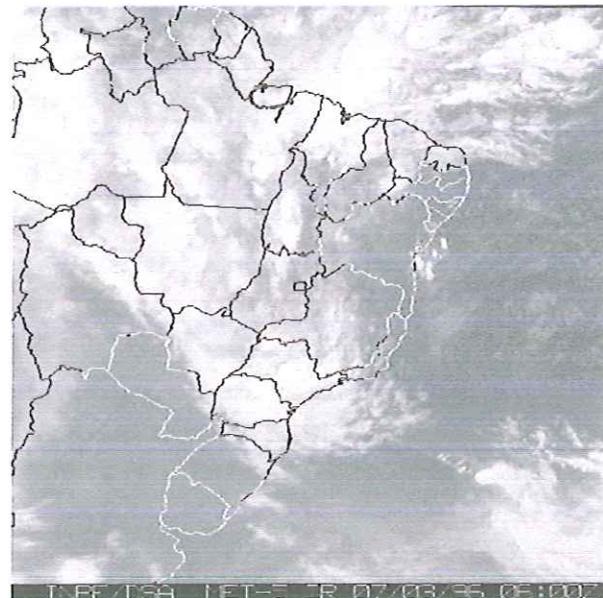
D: Resistência térmica à circulação

Figura 43 Trabalho do vento; temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica a circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 6/03/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho.

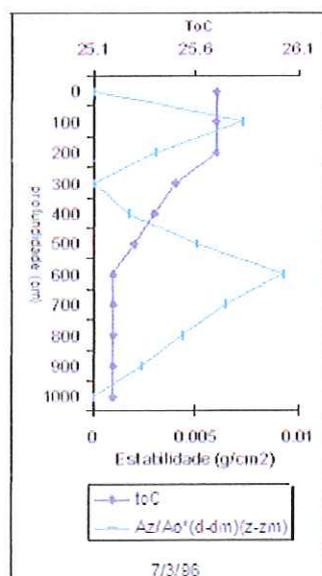
Em 6 de março de 1996, no sul do Brasil, na costa leste do Rio Grande do Sul, um grande núcleo de desenvolvimento vertical, associado a nuvens Cbs (chuvas fortes e pancadas de chuvas) aparece, podendo ainda ser vista uma frente fria (dissipada) estendendo-se do oceano Atlântico até aproximadamente a costa leste do Rio de Janeiro. A temperatura do ar manteve-se a  $25,2^{\circ}\text{C}$ , com velocidade de vento de  $3,67\text{ km/h}$  e uma radiação solar de  $2212,02\text{ Joule}$  sem chuva. A RTC criada foi de  $3,026 \cdot 10^{-16}\text{ Joule}$ , o trabalho do vento a  $6,54\text{ g}\cdot\text{cm}/\text{cm}^2$  e a estabilidade de  $10,34\text{ g}\cdot\text{cm}/\text{cm}^2$ . O ponto de estabilidade localiza-se a  $200\text{ cm}$  de profundidade.



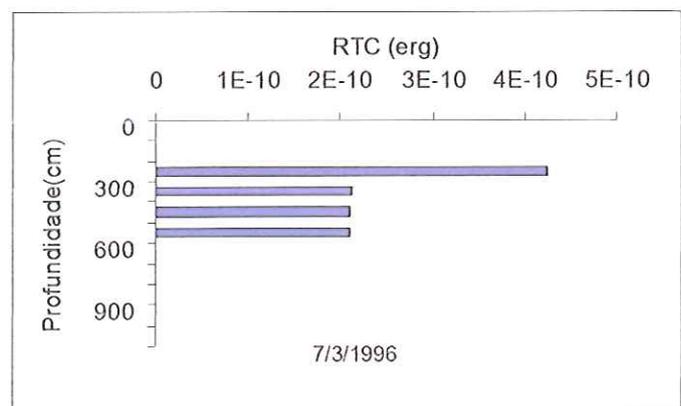
A: Trabalho do vento e perfil térmico



B: Imagem em 07/03/96  $V = 3,43\text{ km/h}$



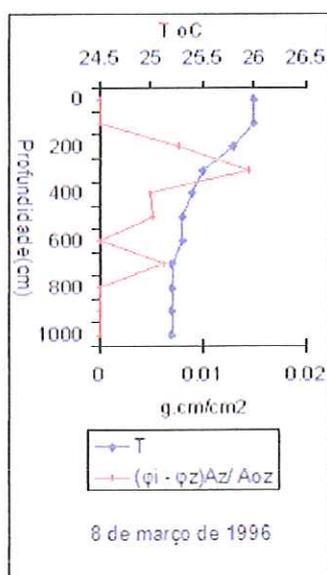
C: Estabilidade e perfil térmico



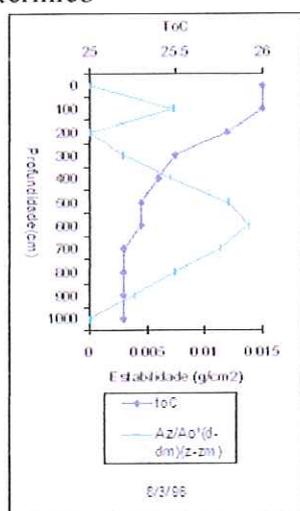
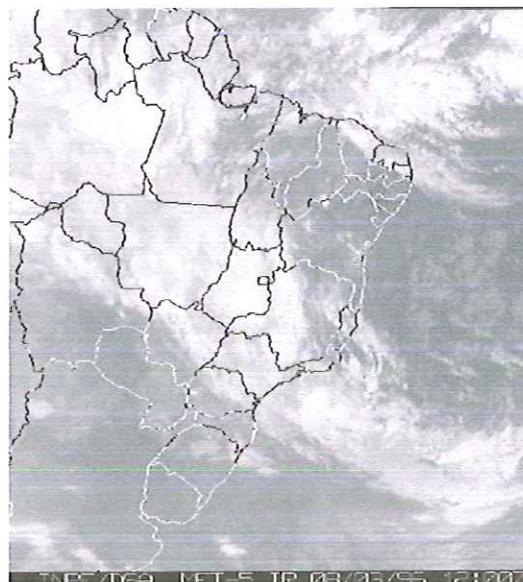
D: Resistência térmica à circulação

Figura 44 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 7/03/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho.

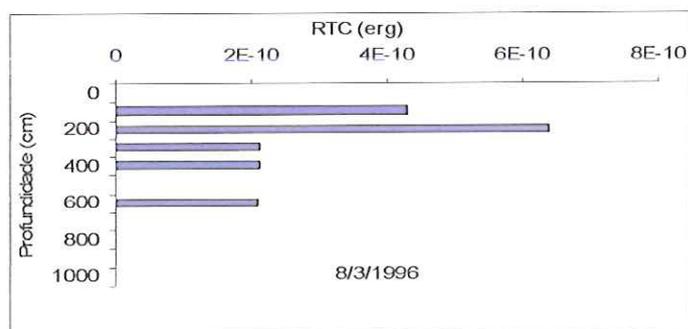
Na figura 44 (7/3/96), observa-se a intensificação da ZCIT, ZCAS e da nebulosidade, podendo ainda ser vista na costa leste do Rio Grande do Sul. Para o Nordeste, houve uma junção entre estas duas massas de ar. Esta instabilidade pode causar grandes problemas a estas regiões, caso estes sistemas permaneçam por um período maior. A frente fria vista no dia anterior deslocou-se mais para leste, situação sem grande mudanças notáveis. O reservatório apresentou uma camada superior e inferior isotérmica e a intermediária de 4 metros de espessura, microtermoclina com uma variação da temperatura de 25,8 para 25,1° C. A velocidade do vento registrada foi de 3,43 km/h, temperatura do ar 22,7° C e chuva de 1,4 mm, com redução da  $RTC = 1,056 \cdot 10^{-16}$  Joule; do  $B = 2,57 \text{ g.cm/cm}^2$  e do  $S = 3,92 \text{ g.cm/cm}^2$ .



A: Trabalho do vento e perfil térmico



C: Estabilidade e perfil térmico

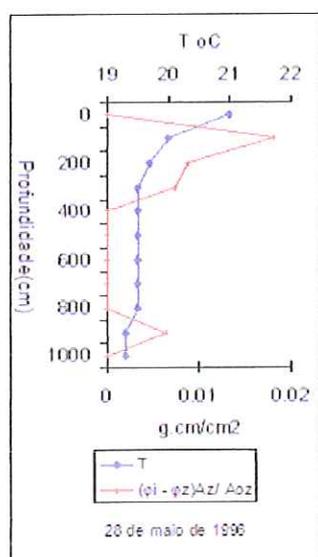


Resistência térmica à circulação

Figura 45 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva

imagem de satélite, no dia 8/03/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho.

Em 8/3/96 (figura 45), não houve grande mudança. O episódio apresentou um período semelhante ao do dia anterior, quando a única diferença foi a junção entre ZCIT e ZCAS, que pode ter ocorrido em virtude do deslocamento do centro do Vórtice Ciclônico de Alto Níveis (VCAN) para sul, podendo acarretar chuvas de grandes intensidades. Os parâmetros climatológicos foram: temperatura do ar 23,1 da água 26° C e uma velocidade de vento de 3,61 km/h. A diferença de temperatura decorrente de frente fria e a velocidade do vento associada à mistura de água de chuva (18mm) originaram o desenvolvimento de uma estabilidade. Esta junção provocou um aumento sensível da RTC de  $1,69 \cdot 10^{-16}$  Joule, um nível maior de estabilidade de  $6,55 \text{ g.cm/cm}^2$  e trabalho do vento de  $3,85 \text{ g.cm/cm}^2$ .



A: Trabalho do vento e perfil térmico

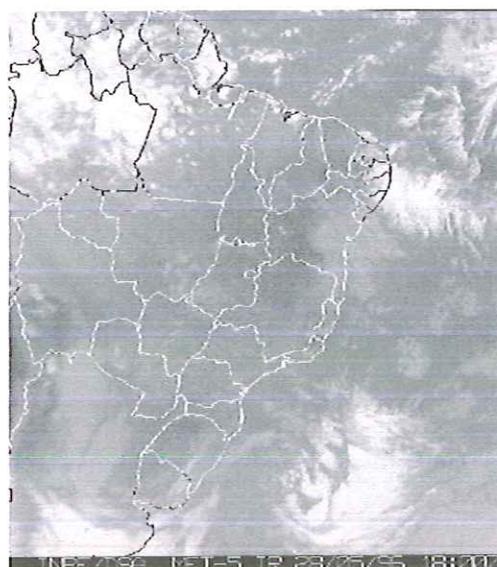
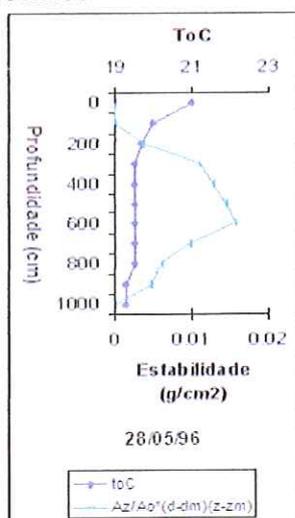
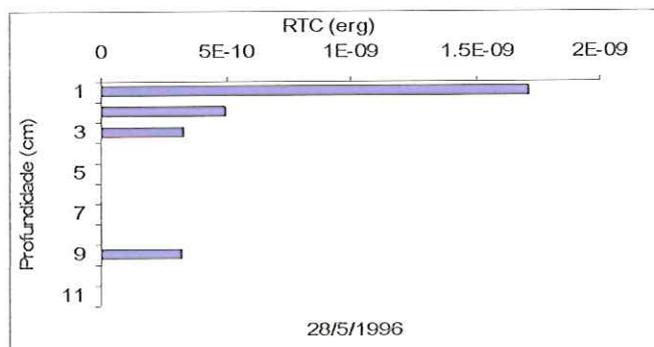


Imagem em 28/05/96 V= 1,55 km/h



C: Estabilidade e perfil térmico

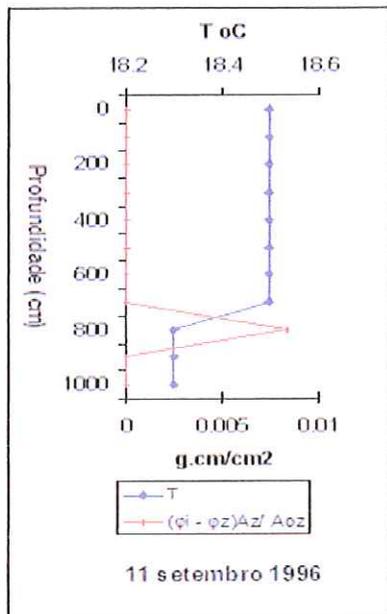


D: Resistência térmica à circulação

Figura 46 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva

imagem de satélite, no dia 28/05/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho

A figura 46 do dia 28/05/96 indica que quase todas as regiões da América do Sul estão sem muita nebulosidade. As regiões onde as nebulosidades estão mais significativas são: a costa leste, desde os Estados do Amazonas e Pará, com vários núcleos de desenvolvimento vertical, associados a chuvas fortes e a pancadas de chuvas. A temperatura do ar baixou consideravelmente para  $17,3^{\circ}\text{C}$  e da água  $21^{\circ}\text{C}$ . Este episódio aumentou ligeiramente a RTC, reduziu o trabalho do vento e a estabilidade. Os valores obtidos foram  $2,85 \cdot 10^{-16}$  Joule;  $4,09 \text{ g.cm/cm}^2$  e  $7,82 \text{ g.cm/cm}^2$ , respectivamente; situação favorecendo a formação de uma camada densa protetora de 3 m de espessura, um metalímnion de 6 m de espessura. O vento fraco  $1,55 \text{ km/h}$  não teve efeito desestratificante do reservatório.



A: Trabalho do vento e perfil térmico

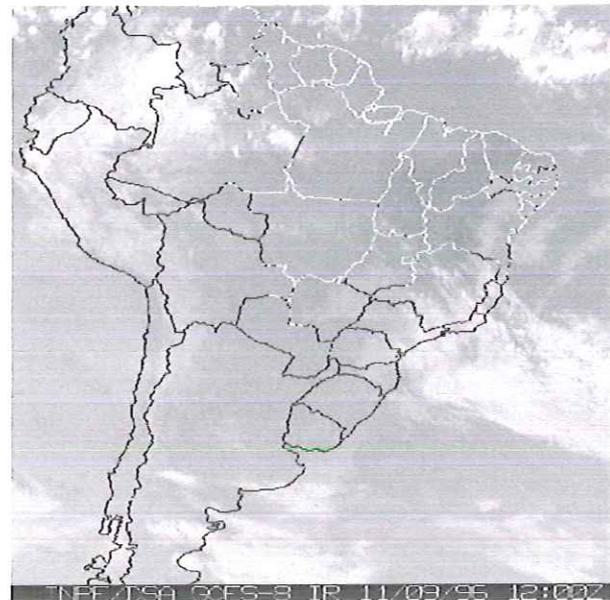
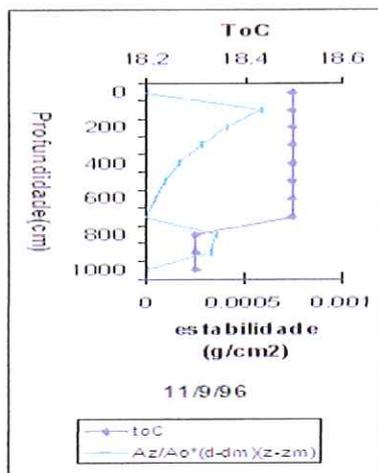
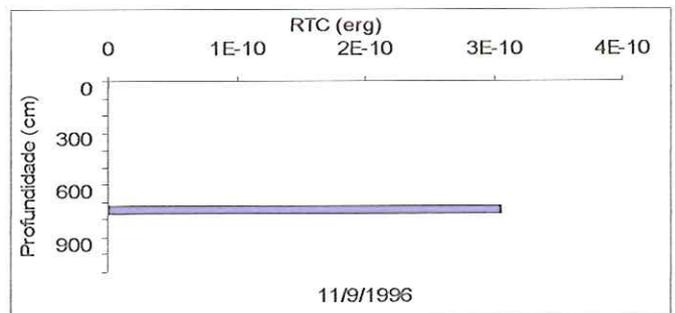


Imagem em 11/09/96 V=14,57 km/h



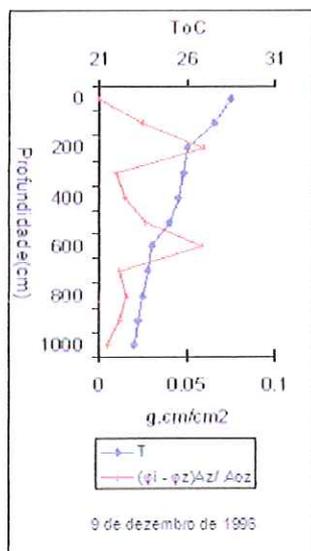
C: Estabilidade e perfil térmico



D: Resistência térmica à circulação

Figura 47 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 11/09/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho.

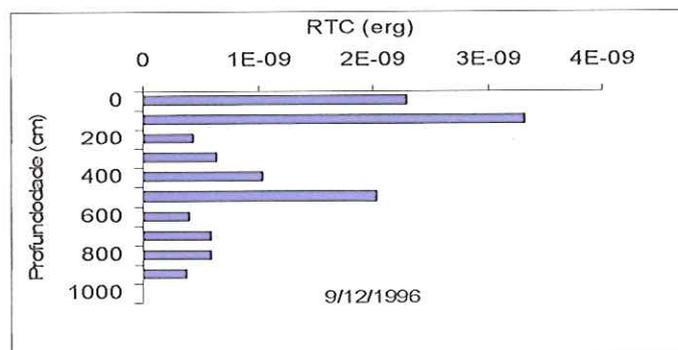
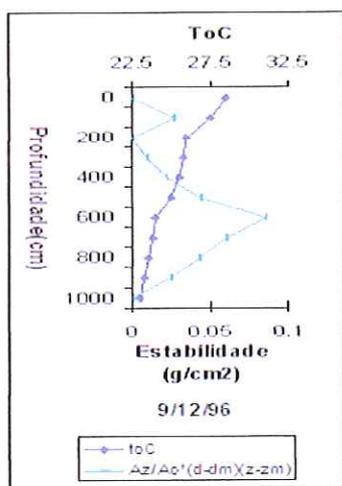
A figura 47 resume a situação em 11/9/96. A imagem da figura 47B apresenta um sistema frontal sem muita intensidade, em estado de dissipação, estendendo-se do oceano Atlântico até os Estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais, podendo acarretar chuvas fracas e moderadas. As outras regiões caracterizam-se por nebulosidade de nuvens baixas e médias, podendo acarretar chuvas fracas e chuviscos. A velocidade do vento registrada foi de 14,9 km/h; temperatura do ar de 14,9° C e uma chuva de 12,4mm causaram no reservatório a formação de uma camada epilímnica isotérmica da superfície de 7m de espessura, onde se desenvolveram uma termoclina e uma fina camada de hipolímnio. A radiação solar do dia foi de 1333,7 Joule. Em razão da diferença de 3,9° C entre a temperatura do ar e da água, formou-se uma camada protetora densa com uma resistência térmica à circulação empurrada a 7 metros em virtude dos ventos fortes de 14,9 km/h ( figura 47) e movimentos de turbulência originados no epilímnion. É a circulação de primavera. A estabilidade calculada foi de  $S=99 \text{ g.cm/cm}^2$ , o trabalho de vento =  $0,83 \text{ g.cm/cm}^2$  e a RTC  $3,06 \cdot 10^{17}$  Joule.



A: Trabalho do vento e perfil térmico



B: Imagem em 09/12/96 V= 3,51 km/h

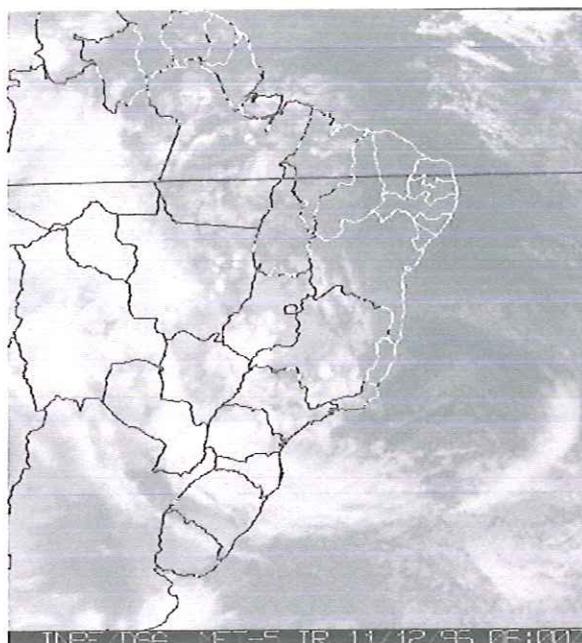
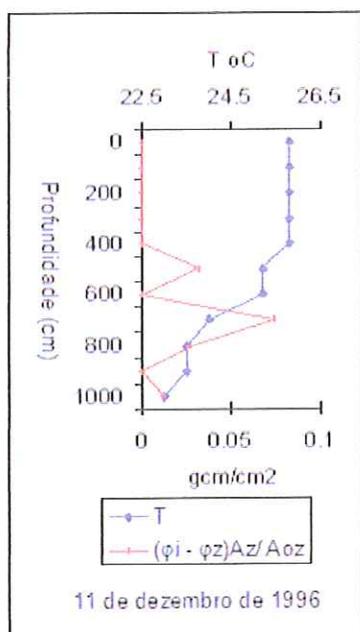


D: Resistência térmica à circulação

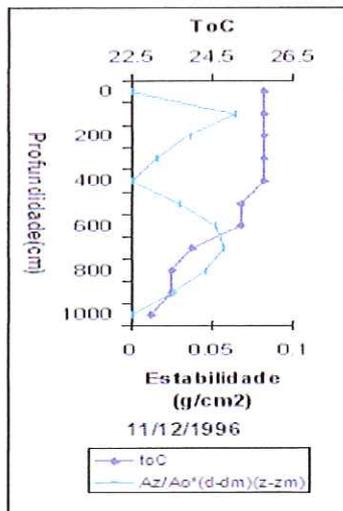
C: Estabilidade e perfil térmico

Figura 48 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 09/12/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho.

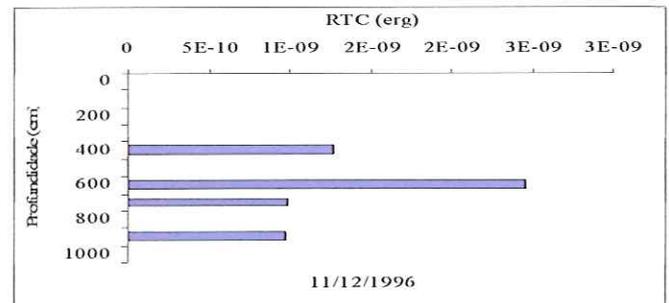
Na figura 48 (9/12/96), observa-se um sistema frontal estendendo-se do oceano Atlântico até a região central da Bahia, podendo acarretar chuvas fortes e pancadas de chuvas(fig 48B). São também observados vários núcleos de desenvolvimento vertical sobre toda a América do Sul associados a chuvas fortes e pancadas de chuvas. Do ponto de vista hidrológico, as figuras 48 A,C e D mostram um reservatório muito estratificado com estabilidade aos 200cm devido a ventos fracos de 3,51 km/h, sem chuva, radiação solar de 2142 Joule, temperatura do ar 25,7° C e da água 27,6° C. Os valores calculados da  $RTC = 1,17 \cdot 10^{-15}$  Joule;  $B = 23,72 \text{ g.cm/cm}^2$  e  $S = 31,41 \text{ g.cm/cm}^2$ . Velocidade do vento não suficiente para homogeneizar a coluna da água.



A: Trabalho do vento e perfil térmico



B: Imagem em 11/12/96  $V = 2,86$  km/h



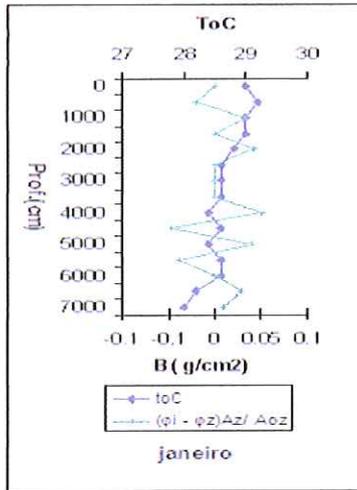
Resistência térmica à circulação

C: Estabilidade e perfil térmico

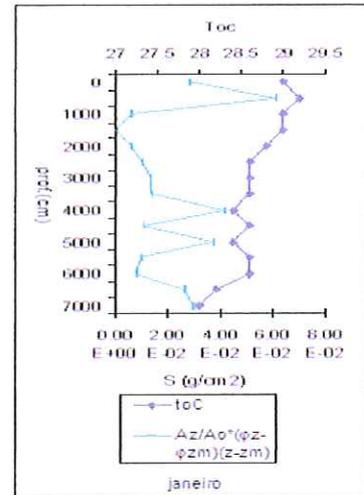
Figura 49 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade e temperatura de água(C), resistência térmica à circulação(D) em função da profundidade do reservatório e sua respectiva imagem de satélite, no dia 11/12/1996, no reservatório da UHE Carlos Botelho.

No dia 11/12/96, as variações climatológicas são observadas em quase toda a América do Sul com massas de ar instável e alguns núcleos de desenvolvimento vertical. A resposta do reservatório é a obtenção de um perfil térmico com um epilímnio homogêneo. Os parâmetros climatológicos registrados foram velocidade do vento 2,86 km/h, temperatura do ar 23,5° C e da água 26° C, 4,1mm de chuva e radiação solar de 1058,89 Joule. Observou-se, ao nível do reservatório, uma estratificação com epilímnio de 400cm de espessura, onde se iniciou uma RTC de  $5,68 \cdot 10^{-16}$  Joule, um aumento da estabilidade para 32,43 e do trabalho do vento B de  $14,38 \text{ g.cm/cm}^2$ . Houve circulação parcial do reservatório em razão da velocidade fraca de vento

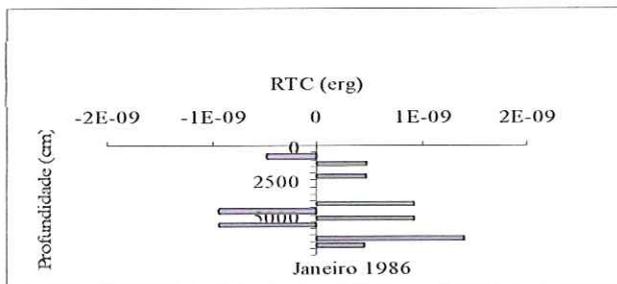
3.3.3 Limnologia física: perfil térmico, resistência térmica à circulação, estabilidade, trabalho do vento no reservatório de Tucuruí



A Trabalho do vento

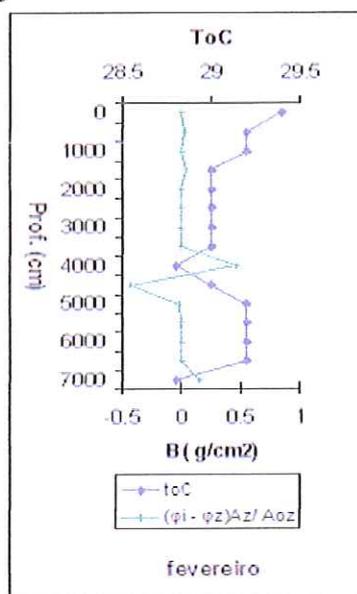


B Estabilidade

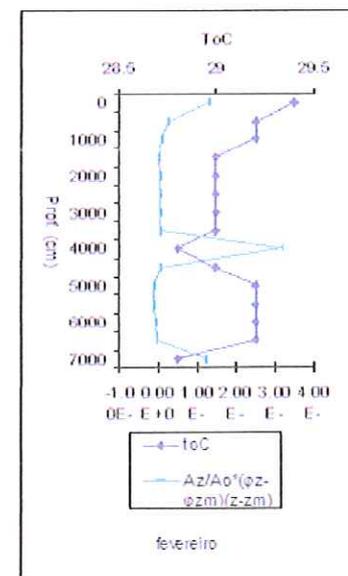


C Resistência térmica à circulação

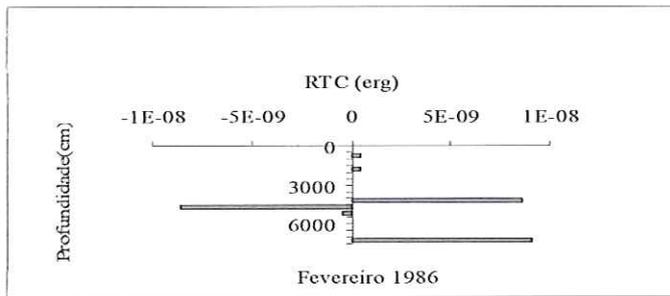
Figura 50 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em janeiro de 1986.



A Trabalho do vento

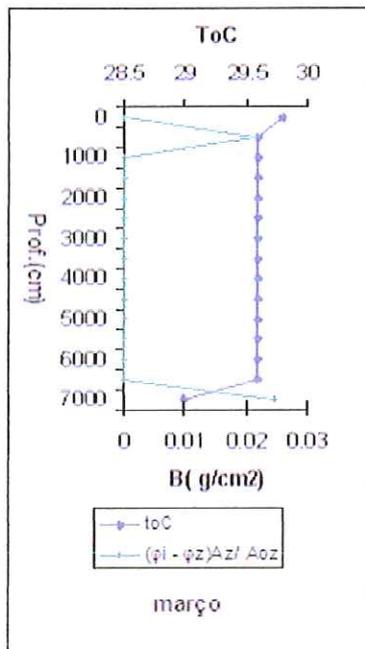


B Estabilidade

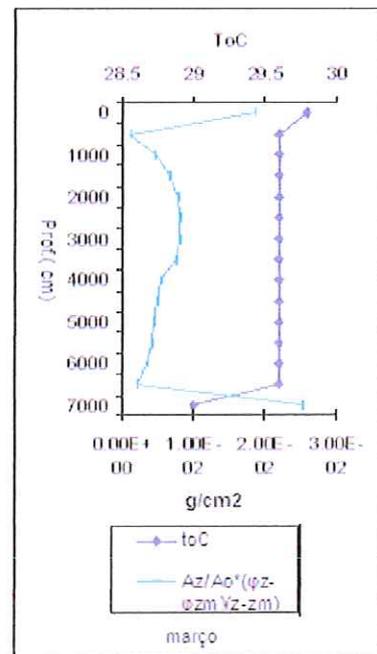


C Resistência térmica à circulação

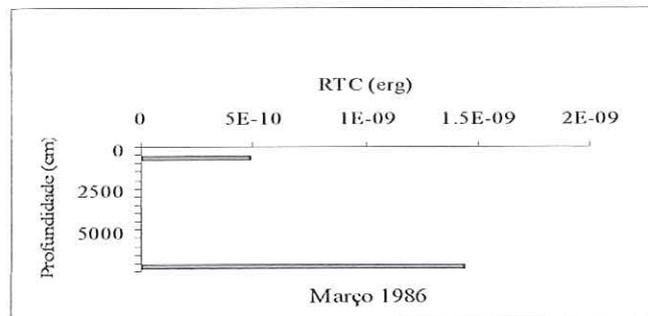
Figura 51 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em fevereiro de 1986.



A: Trabalho do vento

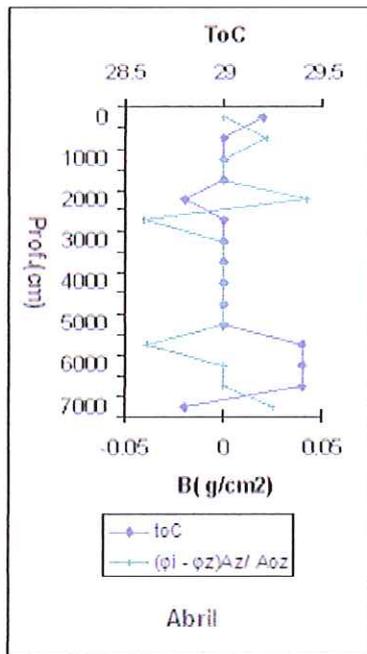


B: Estabilidade

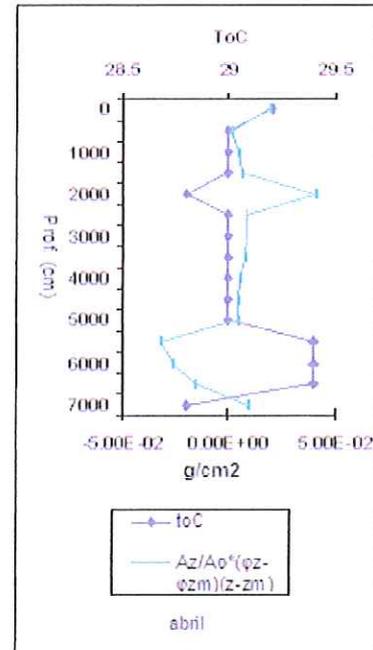


C: Resistência térmica à circulação

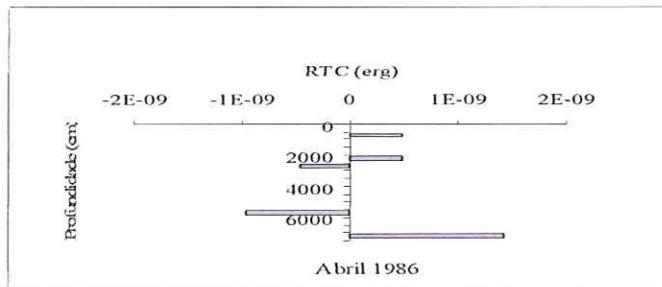
Figura 52 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em março de 1986.



A: Trabalho do vento

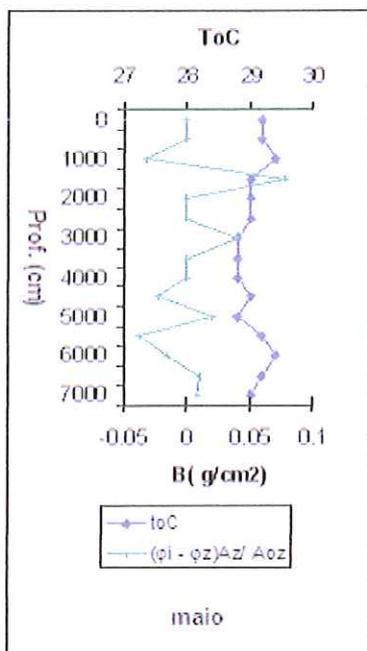


B Estabilidade

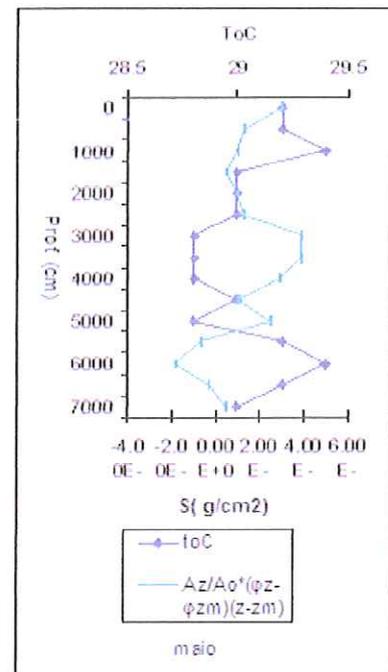


C: Resistência térmica à circulação

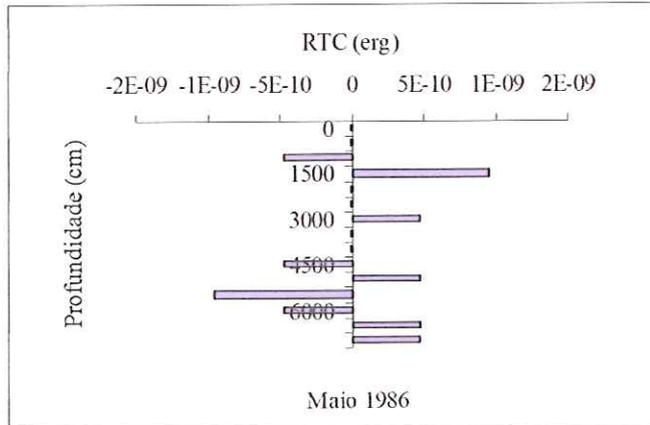
Figura 53 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em abril de 1986.



A: Trabalho do vento

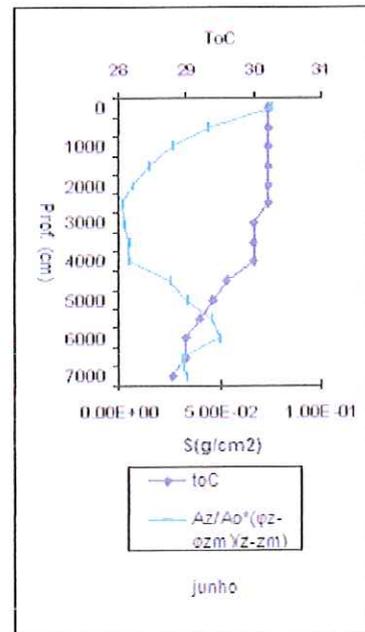
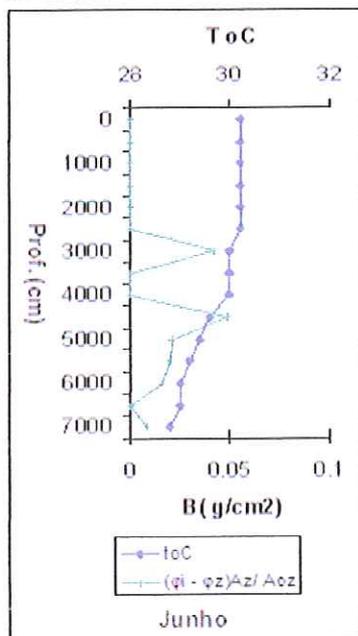


B: Estabilidade



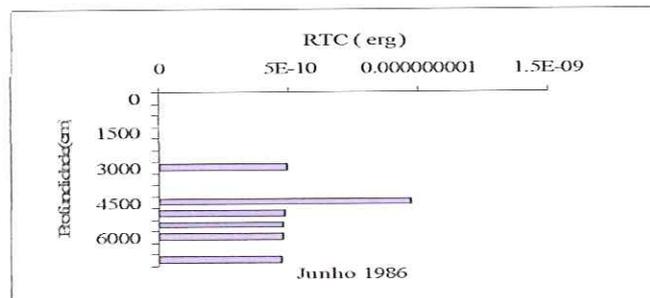
C: Resistência térmica à circulação

Figura 54 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em maio de 1986.



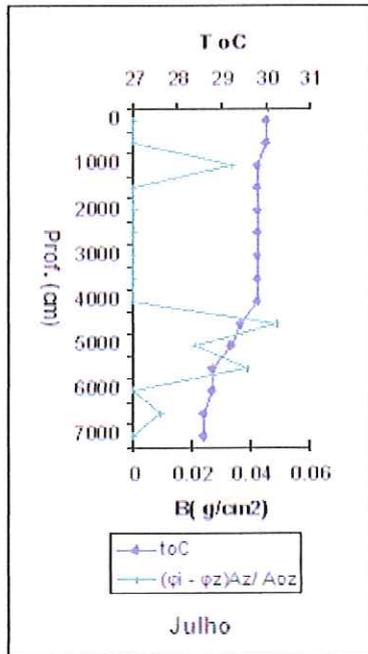
A: Trabalho do vento

B: Estabilidade

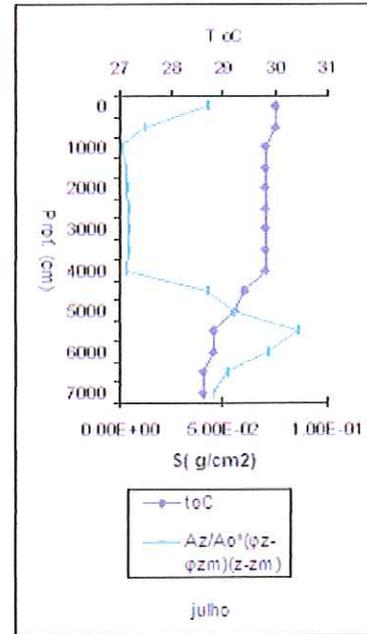


C: Resistência térmica à circulação

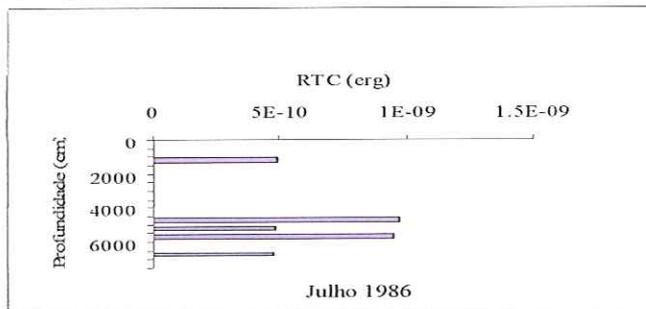
Figura 55 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em junho de 1986.



A: Trabalho do vento

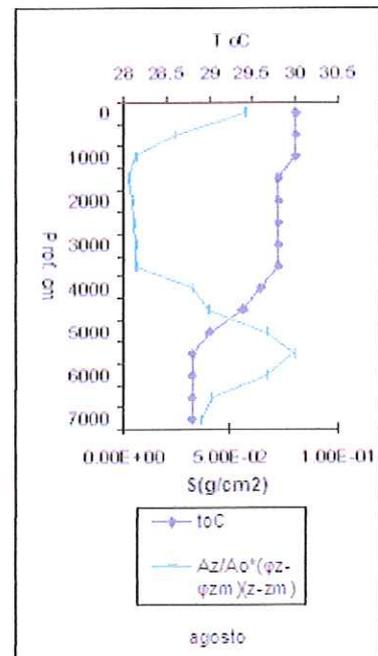
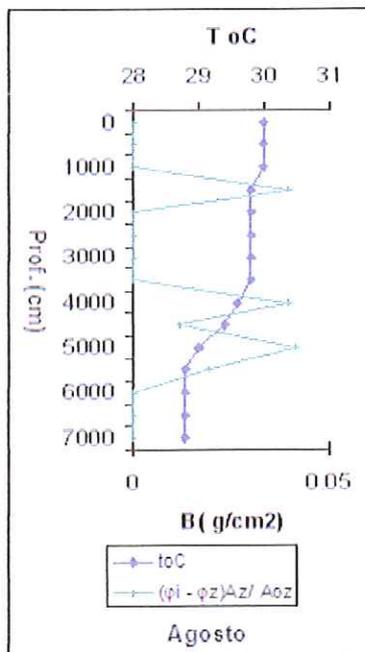


B: estabilidade

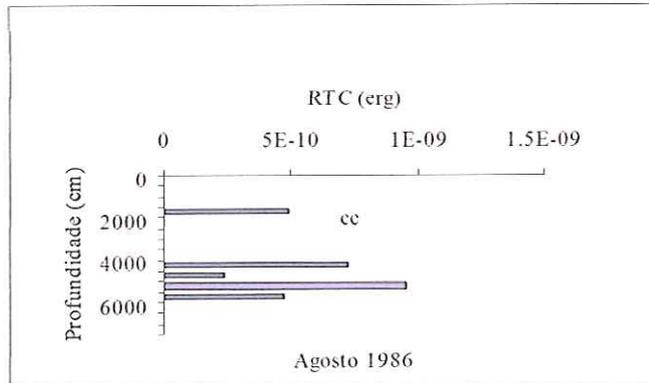


C: Resistência térmica à circulação

Figura 56 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em julho de 1986.



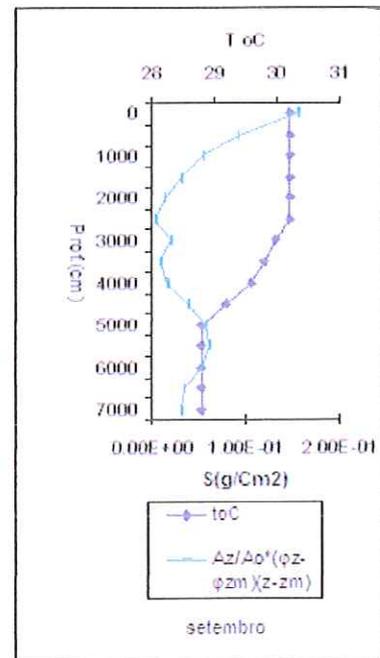
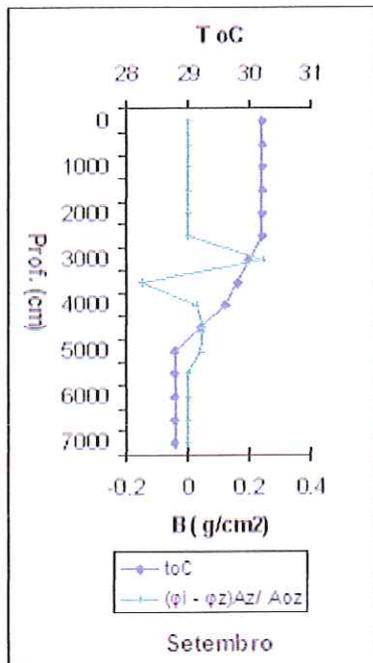
A: Trabalho do vento



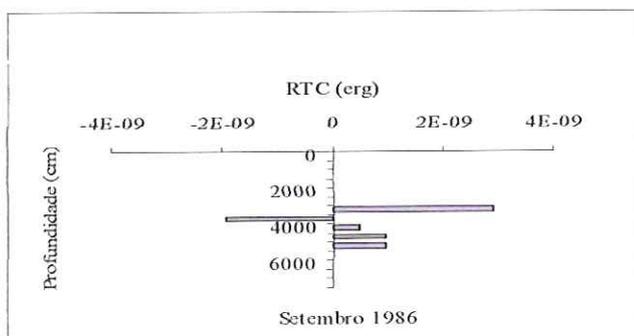
B: Estabilidade

C: Resistência térmica à circulação

Figura 57 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em agosto de 1986.



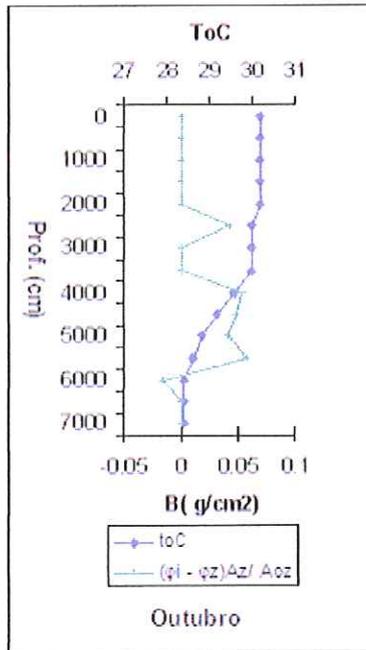
A: Trabalho do vento



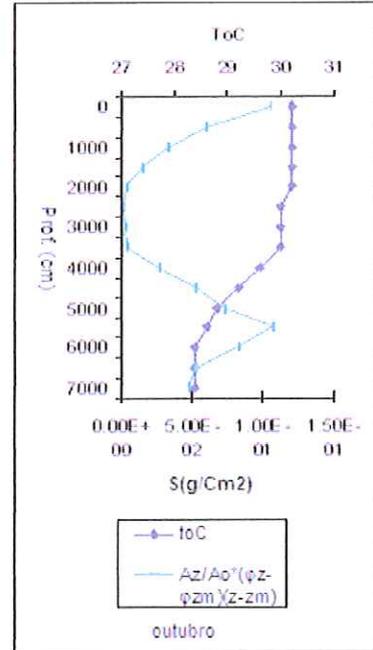
B: Estabilidade

C: Resistência térmica à circulação

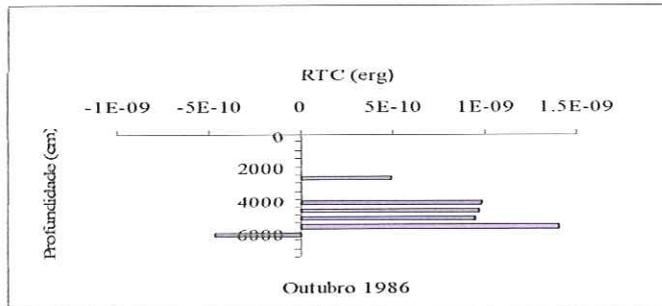
Figura 58 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em setembro de 1986.



A: Trabalho do vento

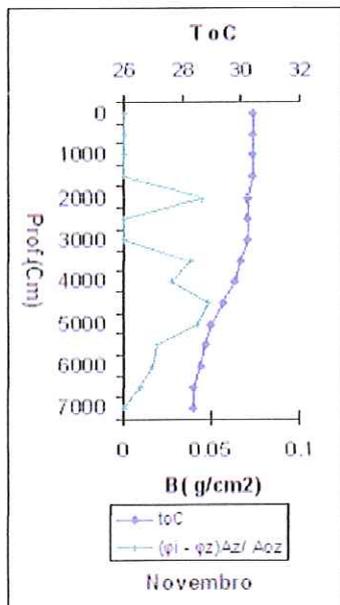


B Estabilidade

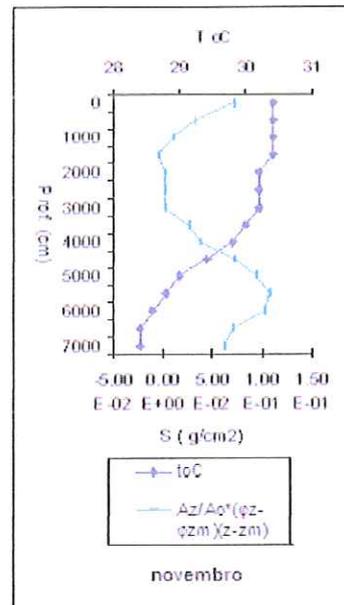


C: Resistência térmica à circulação

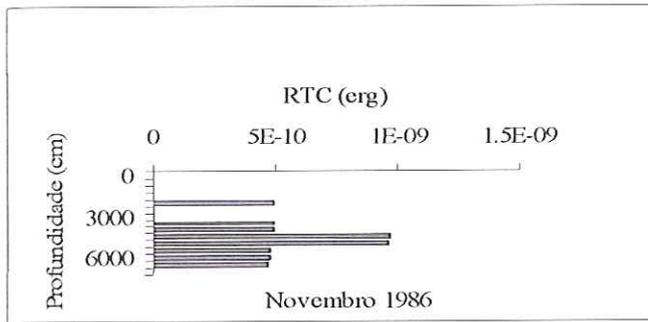
Figura 59 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em outubro de 1986.



A: Trabalho do vento

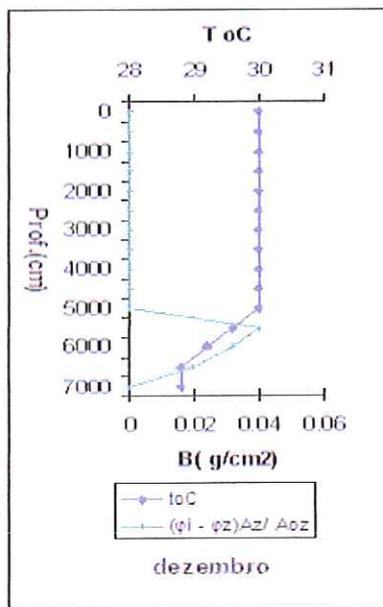


B: Estabilidade

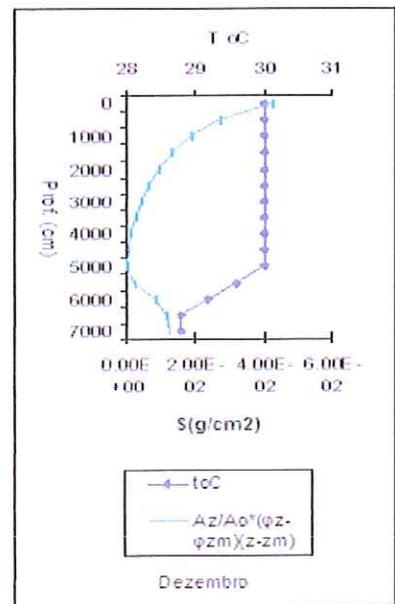


C: Resistência térmica à circulação

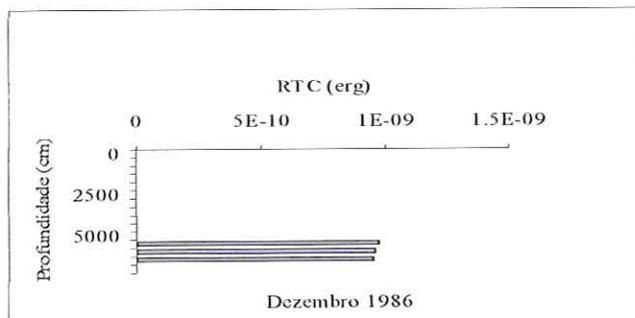
Figura 60 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em novembro de 1986.



A: Trabalho do vento



B: Estabilidade



C: Resistência térmica à circulação

Figura 61 Trabalho do vento, temperatura da água (A), estabilidade(B) e resistência térmica à circulação(C) em função da profundidade, no reservatório de Tucuruí, em dezembro de 1986.

O estudo limnológico do reservatório de Tucuruí não teve o auxílio das imagens de satélite. As ferramentas do estudo foram a estabilidade, o trabalho do vento, a resistência térmica à circulação e o perfil térmico. Os resultados estão nas figuras 50 a 61. As Figuras 50,

51, 53, 54, 58 e 59 apresentam o trabalho do vento (A), a estabilidade (B) e a resistência térmica à circulação (C). Estes gráficos revelam uma estrutura estratificada do reservatório com termoclinas inversas caracterizadas por valores negativos da resistência térmica à circulação, indicando uma perda de calor para a camada superior. Os valores positivos de RTC caracterizam os locais de formação de termoclina em virtude da variação da temperatura e densidade na coluna de água. O reservatório de Tucuruí, em virtude de sua profundidade e dos ventos fracos, desenvolveu estruturas estratificadas. Também as temperaturas do ar próximas da temperatura da água não favoreceram a formação de RTC forte, podendo proteger a camada de metalimnion.

As Figuras 52, 55, 56, 57, 58 e 59 ao contrário das precedentes, apresentaram um perfil sem inversão de termoclina. O reservatório apresentou-se parcialmente estratificado com circulação parcial na superfície em razão dos ventos fracos e mínima diferença entre a temperatura do ar e a temperatura da água.

### 3.3.4 Estudo comparativo das características físicas dos três reservatórios

#### 3.3.4.1 Conteúdo de calor

Tabela 3 Valores de conteúdo de calor dos três reservatórios com seus valores médios, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação

|       | Barra<br>Bonita | Tucuruí  | Broa     |
|-------|-----------------|----------|----------|
| Jan   | 30963.62        | 52977.35 | 10982.73 |
| Fev   | 32220.47        | 53414.43 | 10722.07 |
| Mar   | 29143.66        | 54330.16 | 10772.25 |
| Abr   | 27320.76        | 53222.1  | 8319.30  |
| Mai   | 27440.61        | 53379.11 | 8274.03  |
| Jun   | 25467.84        | 55202.48 | 7702.734 |
| Jul   | 23959.31        | 54660.57 |          |
| Ago   | 22021.04        | 54701.99 |          |
| Set   | 23867.84        | 55102.15 | 7769.86  |
| Out   | 25467.84        | 55068.38 | 10081.84 |
| Nov   | 26851.3         | 55377.91 | 10949.37 |
| Dez   | 30012.34        | 54971.46 | 10729.03 |
| Media | 27061.39        | 54367.34 | 9630.32  |
| Desvp | 3096.16         | 876.08   | 1422.47  |
| Var   | 9586211         | 767518.3 | 2023444  |
| Cv    | 0.11            | 0.01     | 0.14     |

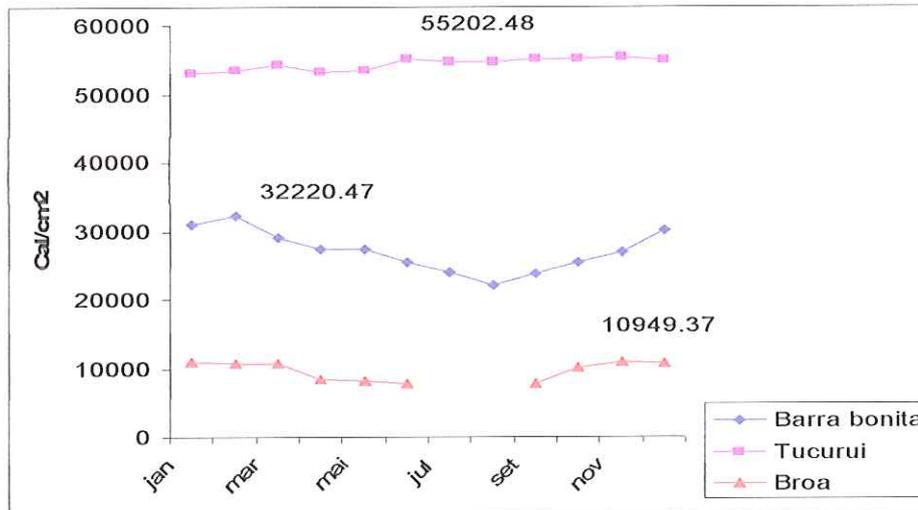


Figura 62 Conteúdo de calor nos três reservatórios, indicando o reservatório da UHE Carlos Botelho com o menor índice de calor.

Os dados analisados foram para Barra Bonita, de 1983 a 1984, de Carlos Botelho, de 1996, e de Tucuruí, de 1989. O cálculo do conteúdo de calor apresentou uma pequena variabilidade em Tucuruí e grande variabilidade para de Carlos Botelho e Barra Bonita que ficaram próximo um do outro com valor de coeficiente de variação de 1%, 11 e 14 %. Estas diferenças são decorrentes da localização geográfica dos reservatórios. No reservatório de Tucuruí, a pequena variação decorre do armazenamento de calor nas profundidades e na massa de água. Os valores quase constantes são resultados de temperatura elevada o ano inteiro com pequenas variações. Nos reservatórios de Barra Bonita e Carlos Botelho, as variações são conseqüências de variação climática e também por serem de menor tamanho, rasos e pequeno volume acumulado.

#### 3.3.4.2 Trabalho do vento

Tabela 4 Valores do trabalho do vento nos três reservatórios com seus valores médios, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação

|     | B Tu   | B BB  | B Broa   |
|-----|--------|-------|----------|
| Jan | 48.13  | 30.24 | 2.08E-06 |
| Fev | 116.52 | 45.99 | 0.41     |
| Mar | 23.22  | 11.77 | 23.68    |
| Abr | 4.15   | 12.45 | 24.15    |
| Mai | 22.54  | 15.55 | 6.54     |
| Jun | 77.45  | 0     | 2.58     |
| Jul | 75.53  | 18.31 |          |
| Ago | 75.97  | 11.24 |          |
| Set | 106.63 | 56.78 | 3.85     |
| Out | 113.05 | 12.17 | 4.09     |
| Nov | 121.33 | 62.49 | 23.73    |
| Dez | 45.40  | 94.66 | 14.38    |

|        |         |        |        |
|--------|---------|--------|--------|
| Media  | 69.16   | 30.97  | 10.34  |
| Var    | 1633.47 | 795.83 | 102.86 |
| desviP | 40.426  | 28.21  | 10.14  |
| CV     | 0.58    | 0.91   | 0.98   |

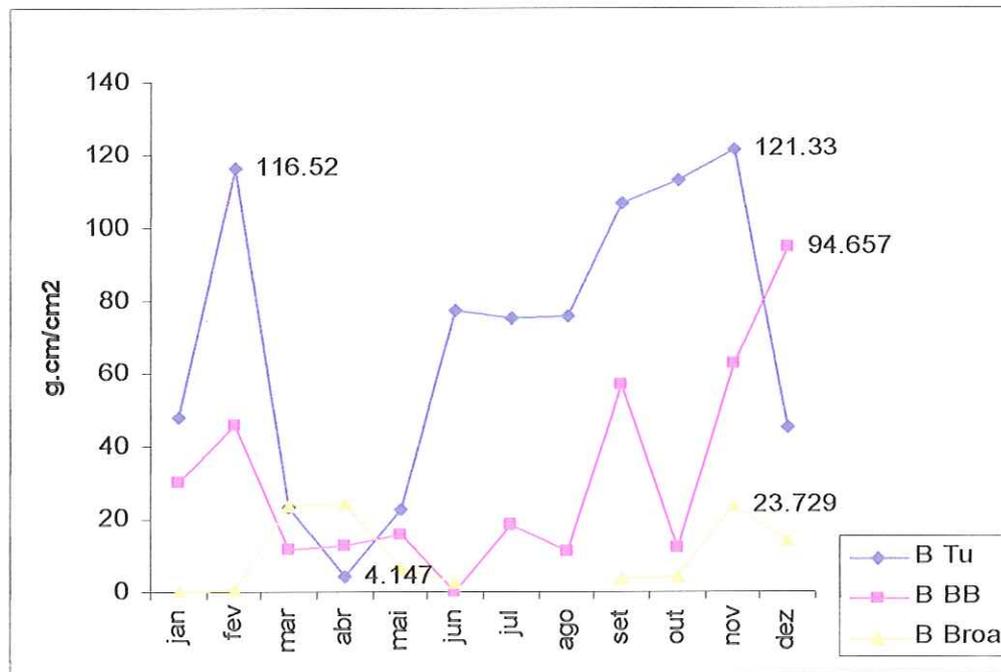


Figura 63 Trabalho do vento nos três reservatórios, ilustrando o reservatório de Tucuruí como o de maior variação de trabalho do vento.

Os resultados do cálculo do trabalho de vento dos três reservatórios estão na Figura 63 e Tabela 4. Destes resultados, podem-se observar os períodos de valores elevados de setembro a fevereiro quando o Tucuruí teve maior trabalho em decorrência da ação do vento o ano inteiro, principalmente no período de junho a fevereiro, seguido da Barra Bonita, de setembro a fevereiro, e do Broa. Da análise estatística, foram obtidas médias gerais de  $69,16 \text{ g.cm/cm}^2$  em Tucuruí,  $30,96 \text{ g.cm/cm}^2$  em Barra Bonita e  $10,34 \text{ g.cm/cm}^2$  no Broa. Os coeficientes de variação foram 0,58; 0,91 e 0,98, respectivamente, indicando grande variabilidade da ação do vento nos reservatórios de Barra Bonita e Carlos Botelho e uma pequena variabilidade em Tucuruí. Estes resultados são decorrentes da localização geográfica. O reservatório de Tucuruí por ser profundo e com uma grande quantidade de água funciona como um sistema tampão amortizando os efeitos do trabalho do vento. Os valores elevados são decorrentes do volume, necessitando maior ação do vento. Nos reservatórios de Barra Bonita e Carlos Botelho, a grande variabilidade observada decorre do tamanho menor, do pequeno volume e da localização (latitude alta), fazendo deles sistemas mais sensíveis.

## 3.3.4.3 Estabilidade

Tabela 5 Valores da estabilidade nos três reservatórios com seus valores médios, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação.

|       | S <sub>BB</sub> *200 | S <sub>TU</sub> * 500 | S Broa |
|-------|----------------------|-----------------------|--------|
| jan   | 649.64               | 150                   | 10.44  |
| fev   | 85.31                | 299                   | 3.93   |
| mar   | 13.66                | 55.5                  | 6.55   |
| abr   | 26.26                | 20.4                  | 7.82   |
| mai   | 30.17                | 97.5                  | 10.80  |
| jun   | 0                    | 199                   | -0.22  |
| jul   | 48.15                | 212.5                 |        |
| ago   | 25.72                | 234                   |        |
| set   | 106                  | 337.5                 | 99.85  |
| out   | 156.20               | 330.5                 | 34.56  |
| nov   | 33.41                | 341.2                 | 31.41  |
| dez   | 199.58               | 80                    | 32.44  |
| media | 114.53               | 196.43                | 23.76  |
| varia | 32118.44             | 13397.95              | 878.22 |
| desp  | 179.22               | 115.75                | 29.63  |
| cv    | 1.56                 | 0.59                  | 1.25   |

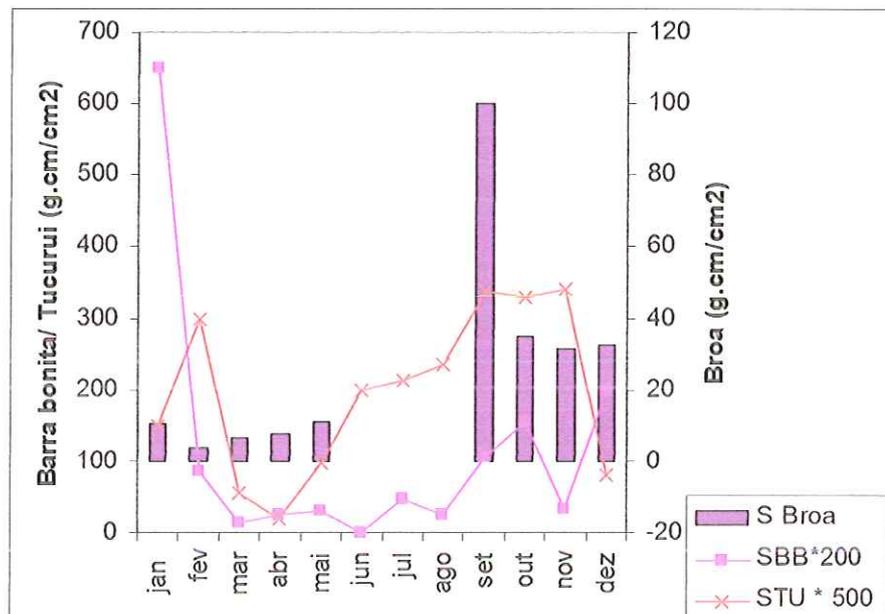


Figura 64 Estabilidade nos três reservatórios, indicando um período de maior estabilidade na UHE Carlos Botelho e Barra Bonita, de março a junho e de agosto a dezembro, no Tucuruí, e um período de baixa estabilidade, de julho a fevereiro, no Broa e Barra Bonita, e de março a julho, em Tucuruí.

O gráfico comparativo da estabilidade nos três reservatórios encontra-se na Figura 64 e Tabela 5. A observação deste gráfico mostra que ambos apresentaram um período de estabilidade máxima no verão e mínima no outono. As médias gerais foram 114,52 g.cm/cm<sup>2</sup> em Barra Bonita, 196,42 g.cm/cm<sup>2</sup> em Tucuruí e 23,75 g.cm/cm<sup>2</sup> no Broa. Os coeficientes de variação foram 1,56; 0,58 e 1,24, respectivamente. A análise

das variâncias e o coeficiente de variação mostram grande variabilidade ao longo do ano da estabilidade na Barra Bonita e Carlos Botelho, mais sensíveis por serem pouco profundos por terem menos volume de água e em virtude da localização geográfica sujeitos as mudanças climáticas. Em Tucuruí, a variabilidade foi menor em razão do tamanho e profundidade, funcionando como um sistema-tampão. Então, a sensibilidade da estabilidade está relacionada à profundidade e aos agentes climatológicos.

#### 3.3.4.4 Resistência térmica à circulação ( RTC)

Tabela 6 Valores da resistência térmica à circulação nos três reservatórios com seus valores-médios, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação

|         | Tucuruí  | Barra Bonita | Broa     |
|---------|----------|--------------|----------|
| Jan     | 2.33E-09 | 3.32E-09     | 3.03E-09 |
| Fev     | 9.53E-09 | 2.25E-09     | 1.06E-09 |
| Mar     | 1.92E-09 | 1.03E-09     | 1.7E-09  |
| Abr     | 9.50E-10 | 9.7E-10      | 2.86E-09 |
| Mai     | 4.77E-10 | 1.96E-09     | 3.25E-09 |
| Jun     | 3.37E-09 | 0            | 1.51E-10 |
| Jul     | 3.35E-09 | 1.71E-09     |          |
| Ago     | 2.88E-09 | 7.81E-10     |          |
| Set     | 3.37E-09 | 5.13E-09     | 3.06E-10 |
| Out     | 4.31E-09 | 9.08E-10     | 9.59E-09 |
| Nov     | 4.80E-09 | 7.99E-09     | 1.17E-08 |
| Dez     | 2.88E-09 | 8.3E-09      | 5.68E-09 |
| Media   | 3.35E-09 | 2.86E-09     | 3.94E-09 |
| Var     | 5.34E-18 | 7.92E-18     | 1.54E-17 |
| Desvpad | 2.31E-09 | 2.81E-09     | 3.93E-09 |
| CV      | 0.68     | 0.98         | 0.99     |

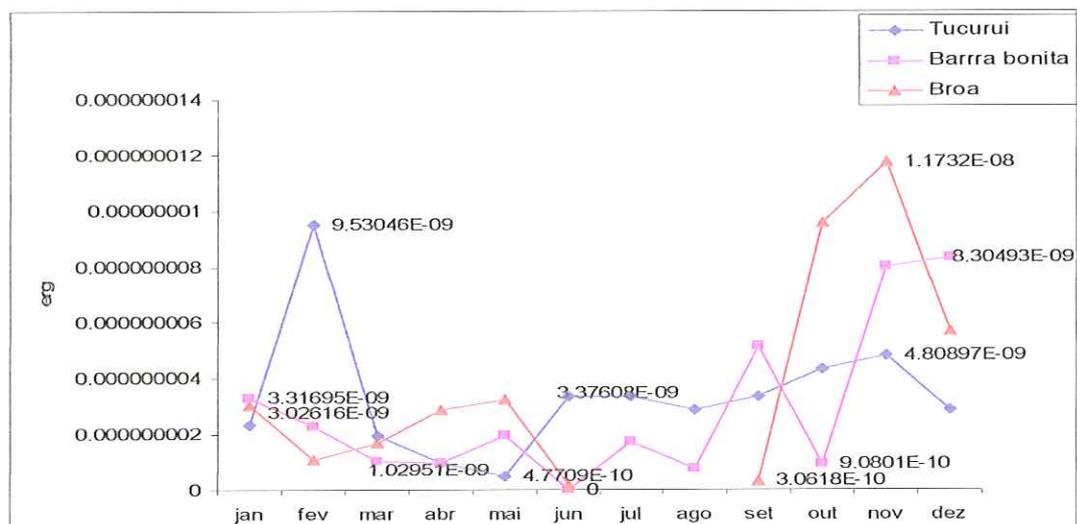


Figura 65 Resistência térmica à circulação nos três reservatórios, ambos apresentando um período de máxima resistência de agosto a março e mínima resistência de abril a julho.

O estudo comparativo mostra um período de resistência elevada de agosto a fevereiro nos reservatórios de Broa e Barra Bonita e de janeiro a março em Tucuruí. A comparação com auxílio da determinação de variância e dos coeficientes de variação deram os seguintes resultados de coeficiente de variação 0,99; Barra Bonita 0,98 Carlos Botelho e Tucuruí 0,68. Estes resultados estão relacionados a dimensão. Barra Bonita e Carlos Botelho, considerados rasos, são sensíveis às mudanças climáticas, enquanto Tucuruí amortiza as variações com um sistema-tampão

### 3.4 Caracterização biológica

#### 3.4.1 Distribuição dos parâmetros biológicos, nutrientes do reservatório da UHE de Barra Bonita

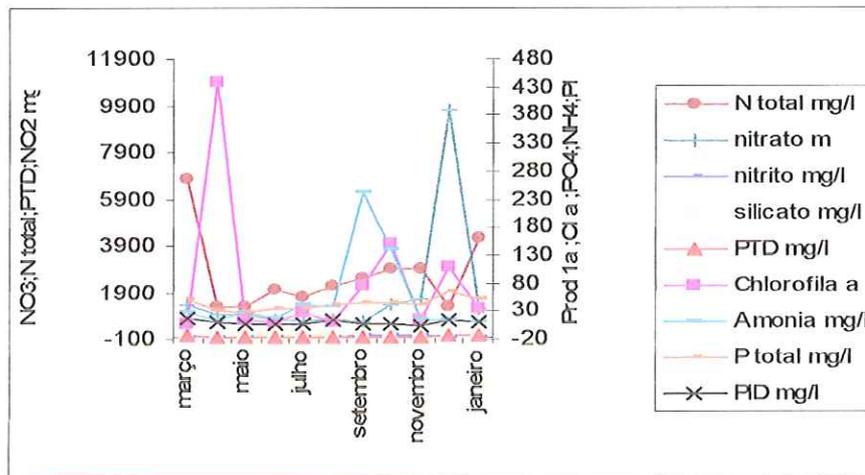


Figura 66 Flutuações das variáveis químicas no período de inverno (maio –setembro) e no verão (novembro-abril), no reservatório da UHE de Barra Bonita. Calijuri(1999) pesquisa realizada em 1983-1984.

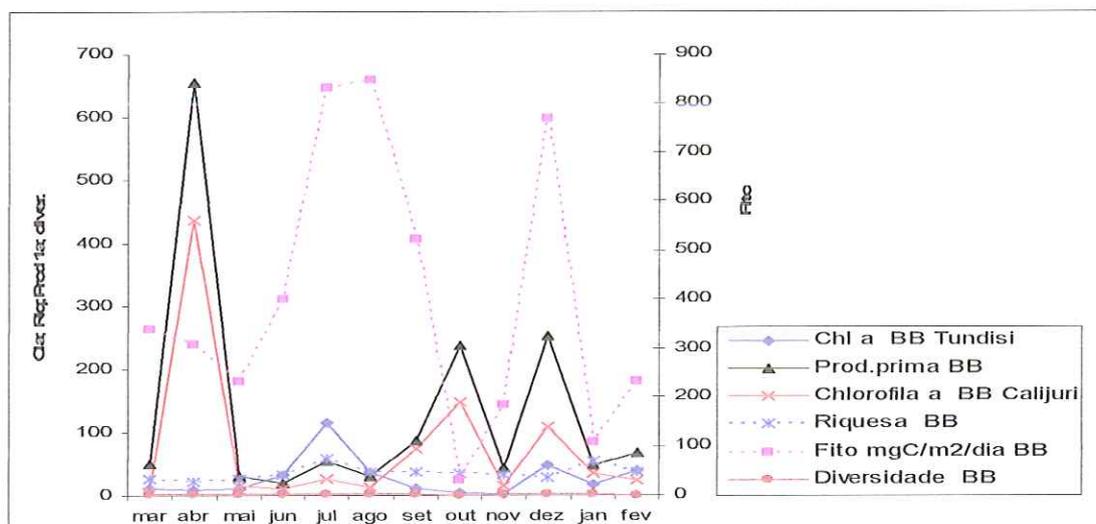


Figura 67 Parâmetros biológicos (clorofila a; produção primária; diversidade, riqueza e fitoplâncton) nos meses de outubro a abril (verão) e de maio a setembro (inverno), caracterizando a maior e menor ocorrência de produção primária no reservatório da

UHE de Barra Bonita. CALIJURI (1999) em pesquisa realizada em 1984, (TUNDISI E MATSUMURA TUNDISI, 1990, pesquisa 1983-84).

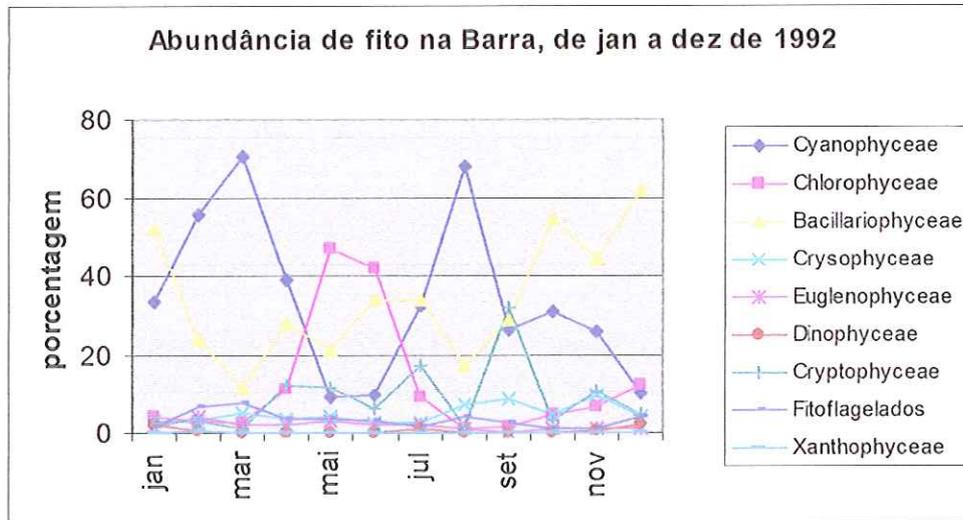


Figura 68 Flutuação de fitoplâncton no reservatório da UHE de Barra Bonita, no período de janeiro a dezembro de 1992, mostrando a abundância de fitoplâncton, *Cyanophyceae* na primavera e outono e a variação de *Chlorophyceae* com abundância no inverno e pobreza no verão, além da abundância de *Bacillariophyceae* no inverno. De acordo com Rietzler(1995).

Os resultados de estudo das variáveis químicas no reservatório de Barra Bonita podem ser visualizados na figura 66. O gráfico revela maior concentração de nitrato, fósforo total e clorofila, de setembro a maio, período de maior chuva no reservatório. Com relação à *Clorofita*, clorofila e produção primária, as maiores concentrações foram observadas de outubro a maio (fig 68). A figura 68 apresentou a abundância dos gêneros com ocorrência de *Cyanofyceae* de março e julho, os *Chlorophyceae* em maio, os *Bacillariophyceae* de setembro a fevereiro e de maio a julho e a maior reprodução de zooplâncton julho a outubro( figura 69).

A abundância de fitoplâncton está relacionada à interação dos fatores físicos, como radiação solar, luz, temperatura da água, as misturas por turbulências ou estrutura estratificada do reservatório e fatores químicos, como conteúdo de nutrientes na zona eufótica. A análise deste gráfico revelou o pico de ocorrência de *cyanophyceae* em março e agosto no final do verão e final do inverno durante os períodos inter-sazonais.

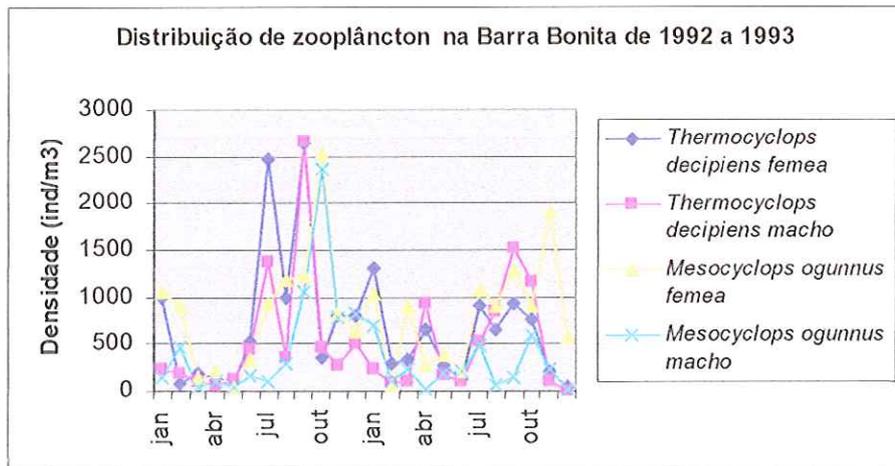


Figura: 69 Distribuição de zooplâncton no reservatório da UHE de Barra Bonita, no período de janeiro a dezembro de 1992-1993, mostrando a variação da distribuição de organismos zooplanctônicos ao longo do ano, com maior abundância nos períodos de inverno de maio a outubro e baixa densidade no verão de novembro a abril, segundo dados de Rietzler (1995) corrigidos por Matsumura-Tundisi e Silva, 2002.

### 3.4.2 Índice de estado trófico do reservatório da UHE de Barra Bonita

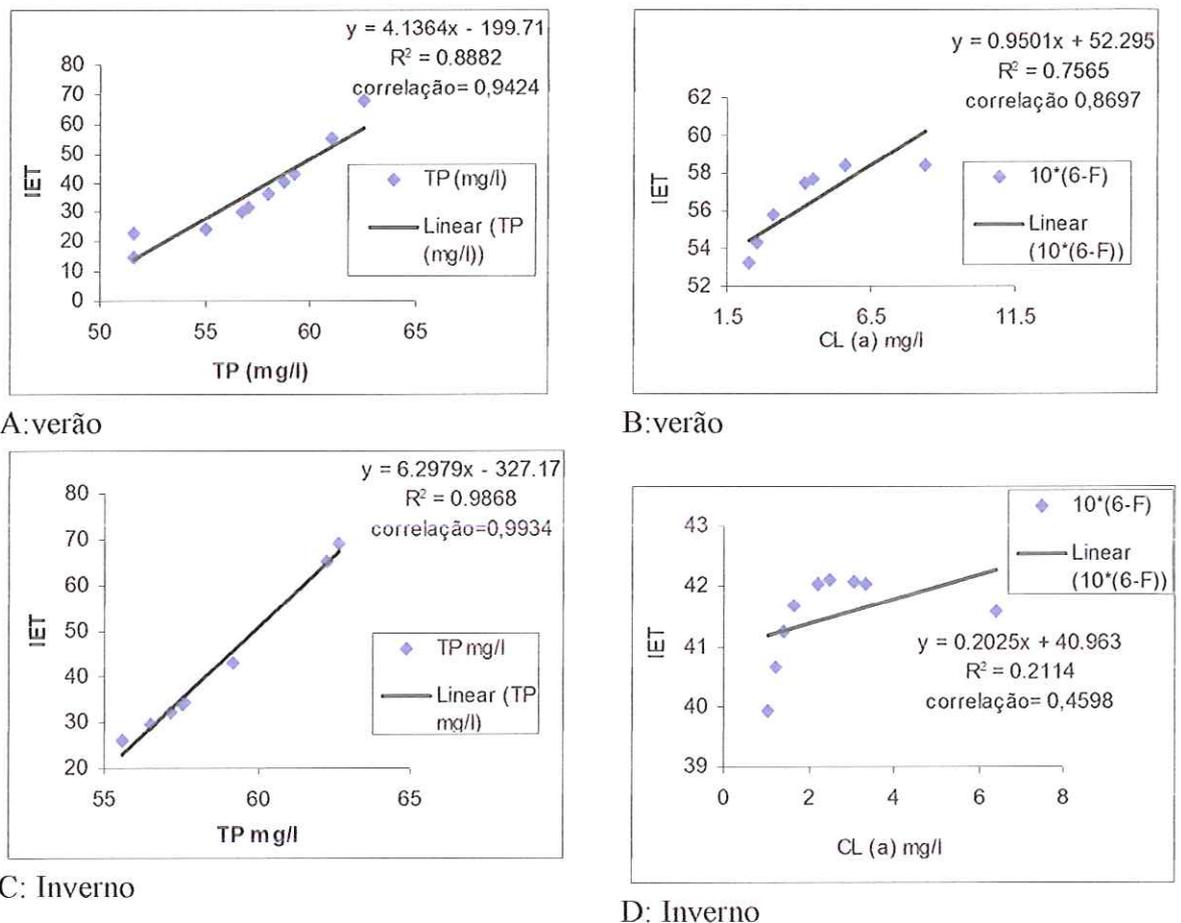


Figura 70 Estado trófico do reservatório da UHE de Barra Bonita em função de TP (A e C) e clorofila a (B e D) no verão e inverno com seus respectivos coeficientes de correlação e coeficientes de determinação.

A determinação do Índice do Estado Trófico(IET) no reservatório de Barra Bonita foi feito em relação aos compostos fósforo total e clorofila no inverno e no verão. Os gráficos de coeficiente de determinação e coeficiente de correlação podem ser conferidos na figura 70. Os modelos utilizados foram lineares tanto na regressão quanto na correlação; no verão, os IET demonstraram uma correlação positiva e significativa com valores  $r = 0,94$  e  $0,86$  para o fósforo e a clorofila. Os resultados obtidos indicam que a partir da clorofila o reservatório segundo o Índice de Carlson modificado por Kratzer e Brezonik (1981) é classificado como eutrófico, enquanto que com o fósforo total ele varia de oligotrófico a eutrófico no verão. Estas variações estão relacionadas aos agentes climatológicos, como a chuva. No inverno, a classificação a partir do fósforo conferiu ao reservatório um estado oligotrófico a hipertrófico, enquanto a clorofila mostrou um estado mesotrófico; no entanto, no inverno, somente o fósforo total demonstrou uma correlação positiva e significativa, tendo um valor de  $0,99$ .

### 3.4.3 Distribuição dos parâmetros biológicos, nutrientes do reservatório de UHE Carlos Botelho ( Lobo-Broa )

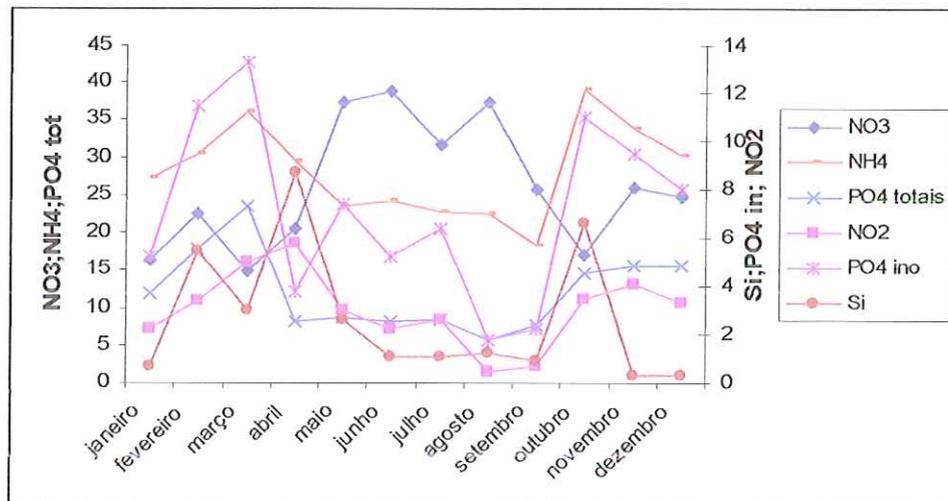


Figura 71 Distribuição dos nutrientes no reservatório da UHE Carlos Botelho em função dos meses do ano . Fonte: Tundisi e Hino, 1979.

A distribuição das variáveis químicas na figura 71 indicam períodos de ocorrência diferentes dependendo do composto. O  $\text{NO}_3$  tem maior ocorrência de abril a setembro, enquanto o  $\text{NH}_4$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{PO}_4$  in, Si,  $\text{NO}_2$  têm maiores incidências de setembro a abril. Estas variações estão relacionadas ao uso do tipo de defensivos agrícolas e de fertilizantes e o tipo de cultura no período do ano.

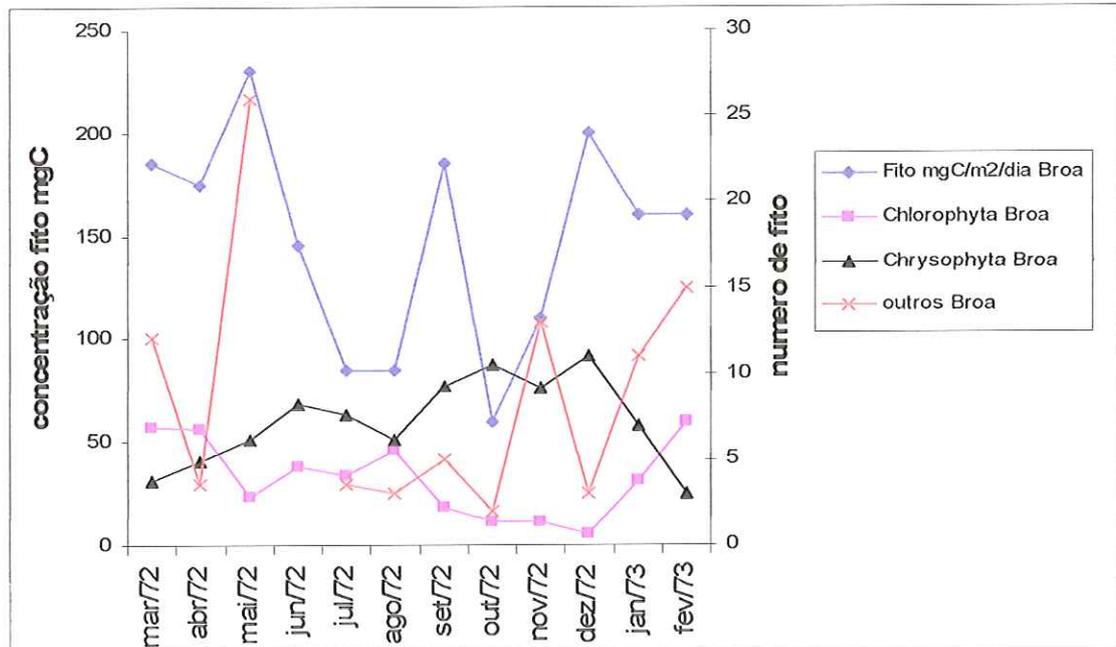


Figura 72 Flutuação de fitoplâncton, *Chlorophyta* e *Chrysophyta* em função dos meses do ano no reservatório da UHE Carlos Botelho com suas respectivas equações de ajuste e coeficiente de determinação, no período de março de 1972 a janeiro de 1973. (TUNDISI, HINO, 1979).

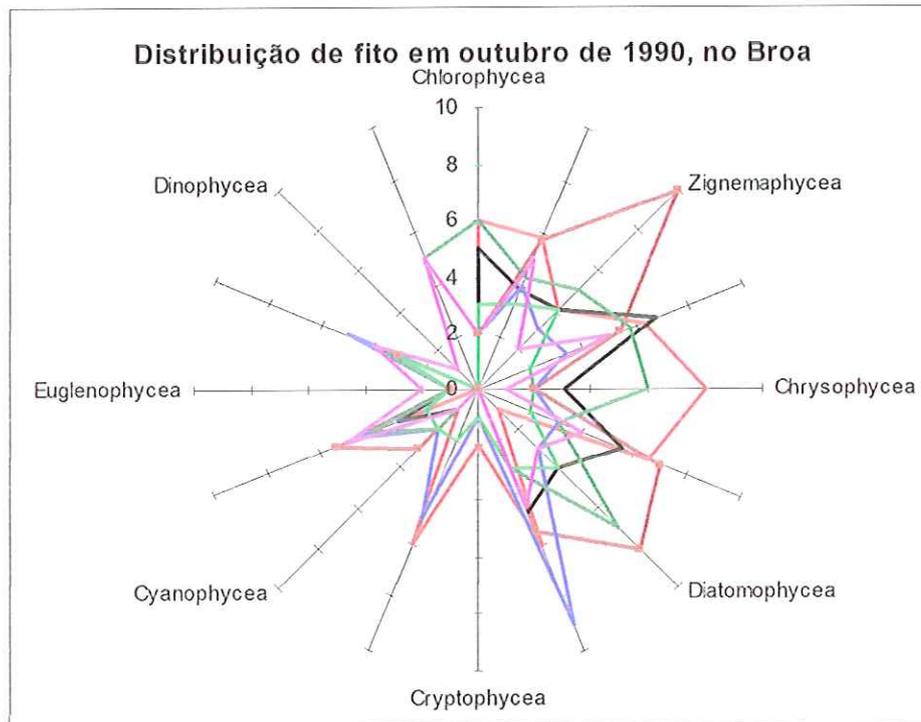


Figura 73 Distribuição da abundância da classe de fitoplâncton no reservatório da UHE Carlos Botelho, em outubro (primavera) de 1990.

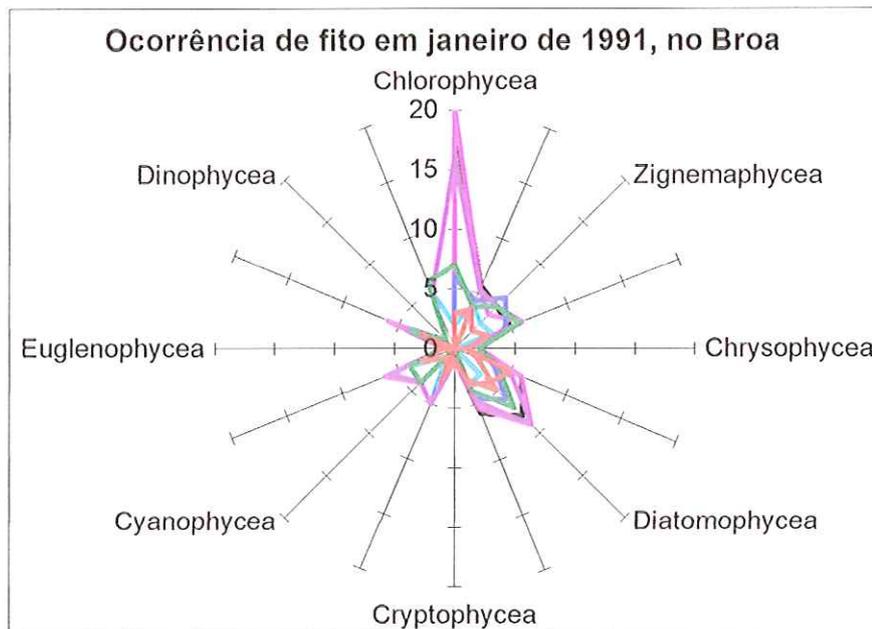


Figura 74 Distribuição da abundância da classe de fitoplâncton no reservatório da UHE Carlos Botelho, em janeiro (verão) de 1991.

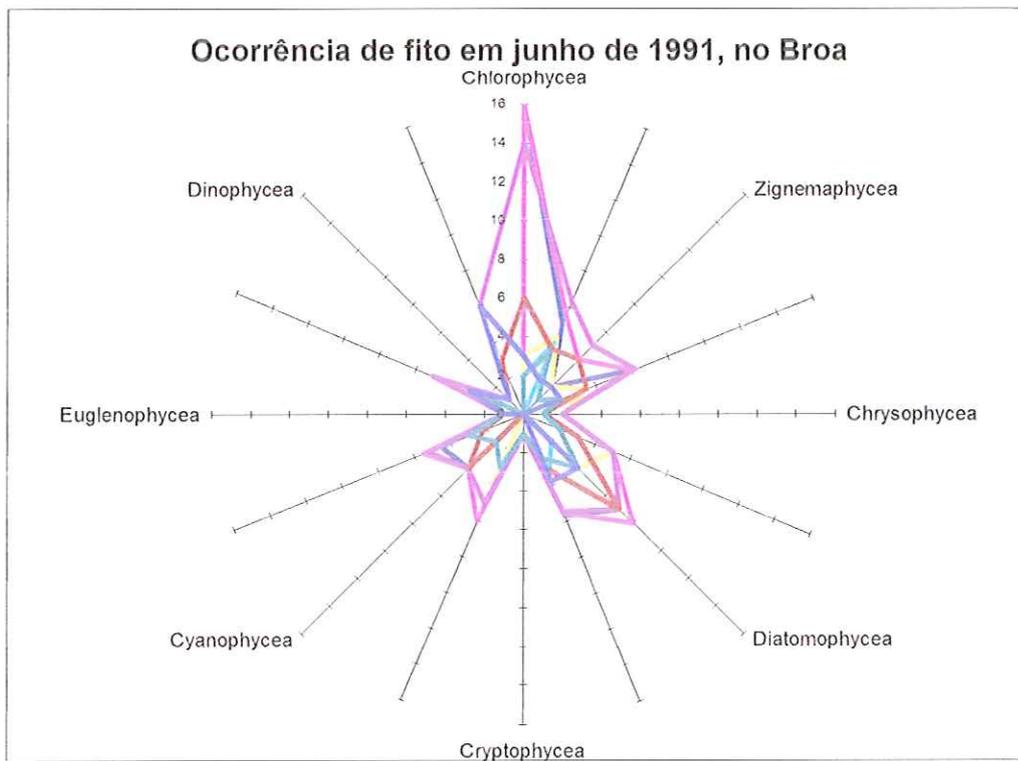


Figura 75 Distribuição da abundância da classe de fitoplâncton no reservatório da UHE Carlos Botelho em junho (inverno) de 1991.

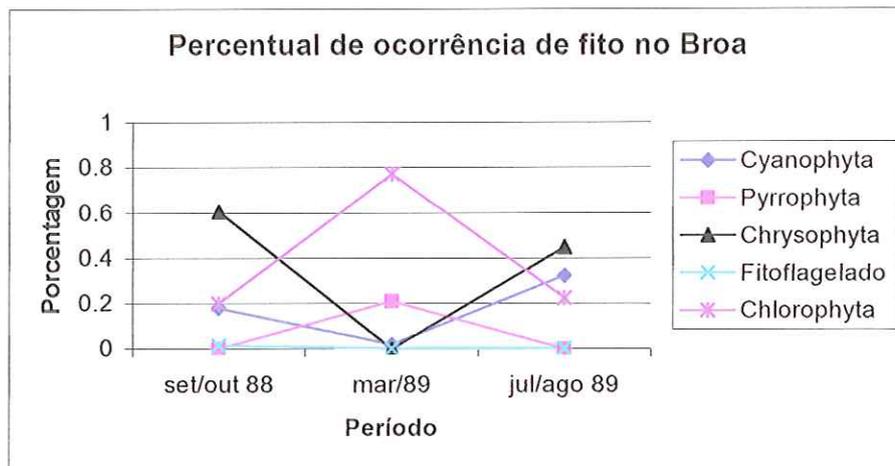


Figura 76 Variação percentual das classes de fitoplâncton, *Cyanophyta*, *Pyrrophyta*, *Chrysophyta*, fitoflagelado, *Chlorophyta* no período de setembro/outubro( primavera), março (verão) e julho/agosto( inverno), no reservatório da UHE Carlos Botelho.

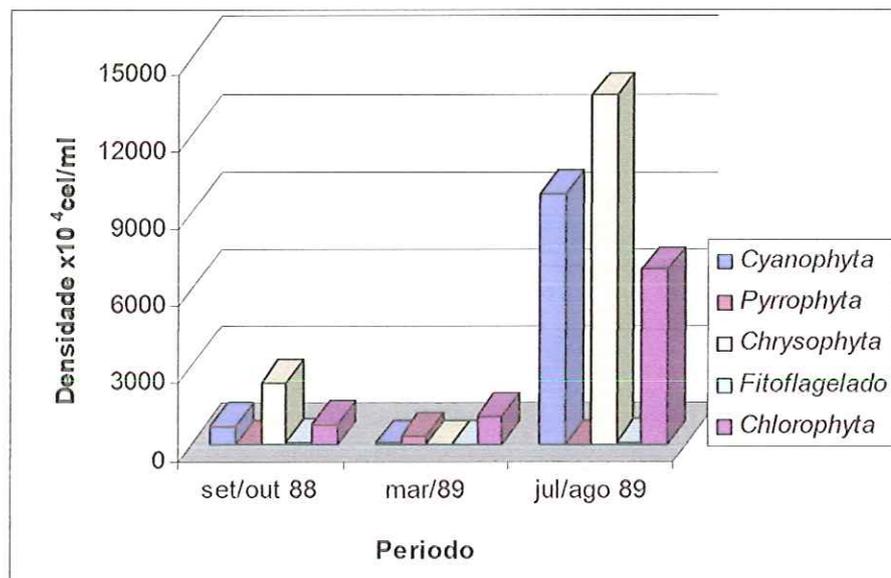


Figura 77 Densidade das classes de fitoplâncton, *Cyanophyta*, *Pyrrophyta*, *Chrysophyta*, fitoflagelado, *Chlorophyta* no período de setembro/outubro (primavera), março (verão) e julho/agosto (inverno), no reservatório da UHE Carlos Botelho (RIETZLER, 1991).

#### Índice de Estado Trófico

No Broa, as figuras 72 a 77 apresentam as flutuações ao longo do ano dos fitoplânctons. Neste estudo, é possível observar uma ocorrência de *Chrysophyta* de setembro a janeiro e de julho agosto coincidindo com a primavera verão e inverno enquanto que outros como *Chlorophyta* apresentaram maior densidade em janeiro, março e junho correspondendo ao verão e ao outono.

### 3.4.4 Índice de estado trófico do reservatório da UHE Carlos Botelho (Lobo-Broa)

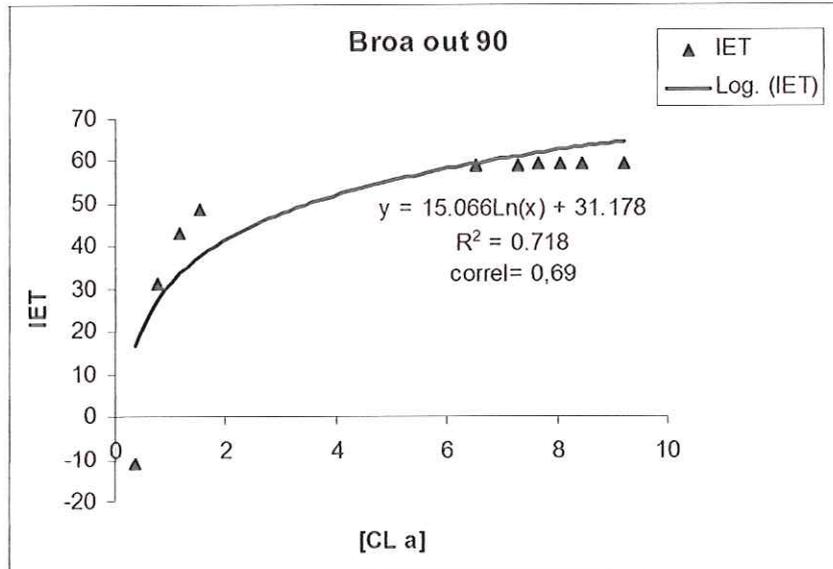


Figura 78 Índice de Estado Trófico em função da concentração de Cl e seus respectivos ajuste de curva, coeficiente de determinação e coeficiente de correlação, em outubro de 1990.

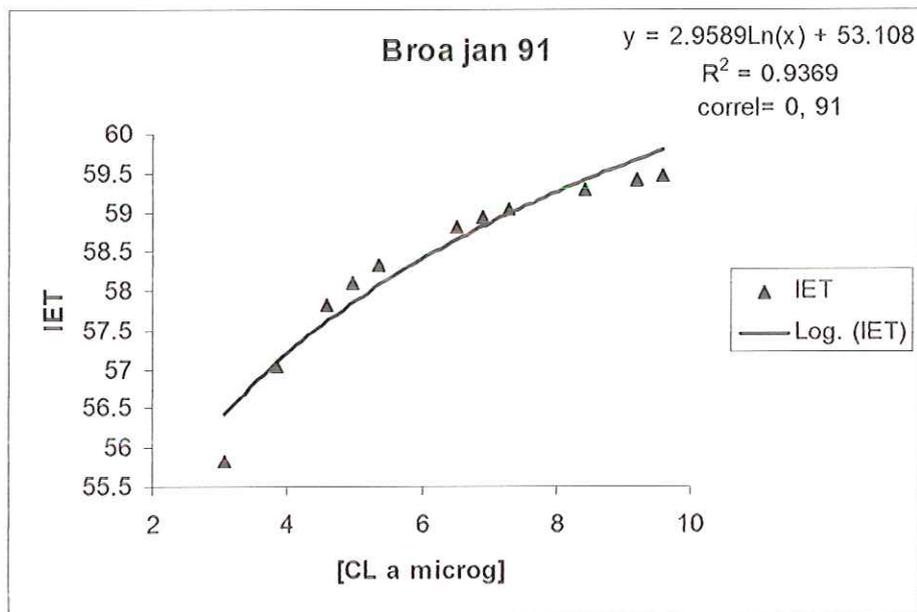


Figura 79 Índice de Estado Trófico em função da concentração de Cl e seus respectivos ajuste de curva, coeficiente de determinação e coeficiente de correlação, em janeiro de 1991.

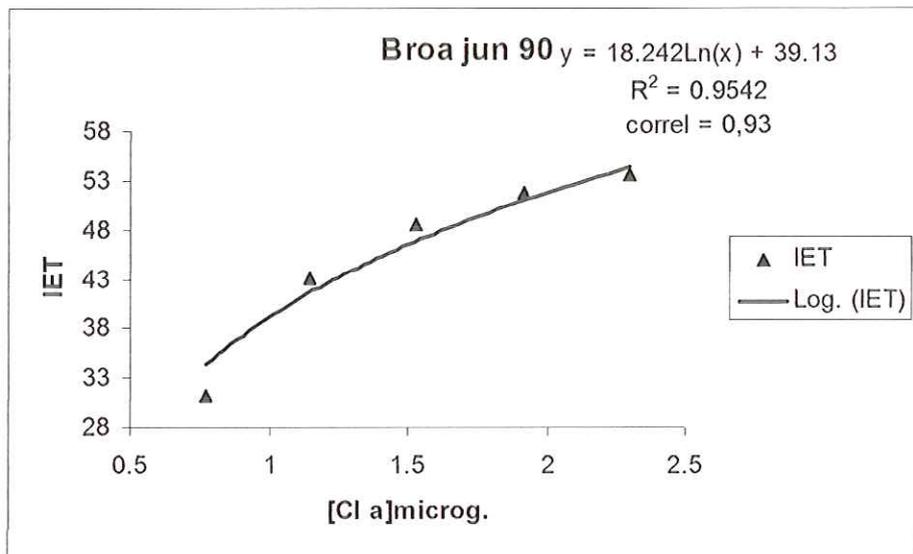


Figura 80 Índice de Estado Trófico em função da concentração de Cl e seus respectivos ajuste de curva, coeficiente de determinação e coeficiente de correlação em junho de 1990.

No Broa, o estudo feito com a clorofila nos períodos de outubro janeiro e junho estão nas Figura 78 a 80 . Os coeficientes de correlação feitos a partir de modelo linear foram positivos e bastante significativos, tendo valores  $r = 0,69$ ;  $0,91$  e  $0,93$ , respectivamente. Os ajustes de curva feitos com modelo logarítmico apontaram coeficientes de determinação positivos e significativos. A partir deste estudo pode se concluir que em junho de 1990, o reservatório apresentou um estado mesotrófico enquanto em outubro de 1990 e janeiro de 1991 classificou-se como oligotrófico e eutrófico respectivamente.

### 3.4.5 Distribuição dos parâmetros biológicos, nutrientes do reservatório da UHE de Tucuruí

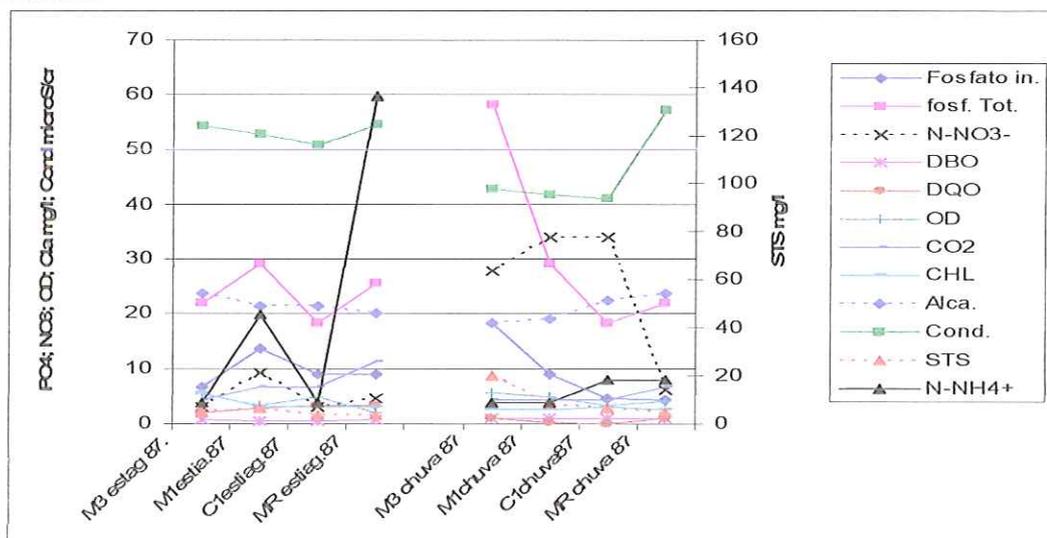
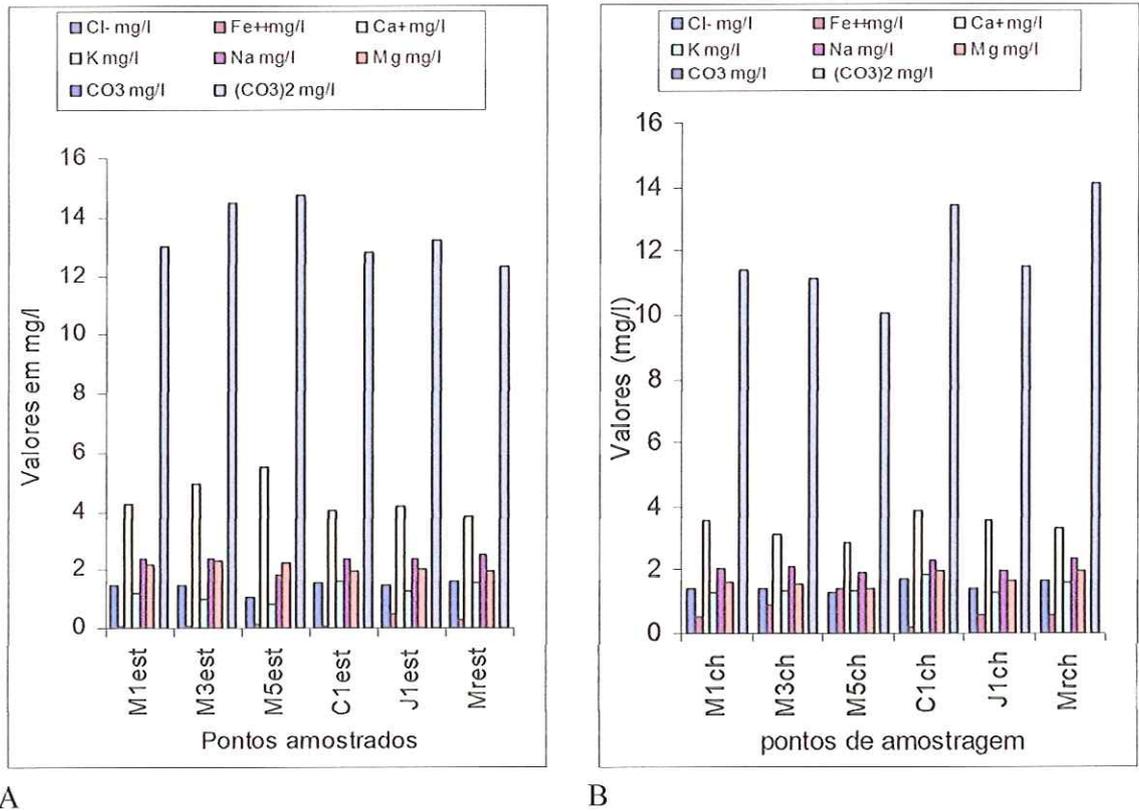


Figura 81 Variação do ciclo biogeoquímico no período de estiagem e período chuvoso, no reservatório de Tucuruí, no ano de 1987 (PEREIRA *et al.*, 1987).



A

B

Figura 82 Variação do ciclo biogeoquímico no reservatório de Tucuruí, no período de estiagem (A) e período chuvoso (B), em diferentes pontos de amostragem (PEREIRA *et al.* 1987).

As figuras 81 e 82 apresentam as variáveis químicas nos períodos de estiagem e chuvosos no reservatório de Tucuruí. Estes gráficos mostram que, na estiagem os compostos como amônia e condutividade tornam-se elevados, enquanto que o fosfato total, nitrato, alcalinidade e STS encontram-se elevados no período de chuva. Neste gráfico, o fosfato inorgânico e a amônia ( $N-NH_4$ ) foram mais significativos no período de estiagem do que no período chuvoso, enquanto o fosfato total  $N-NO_3$  e STS significativos no período chuvoso.

### 3.4.6 Índice do Estado Trófico do reservatório da UHE de Tucuruí

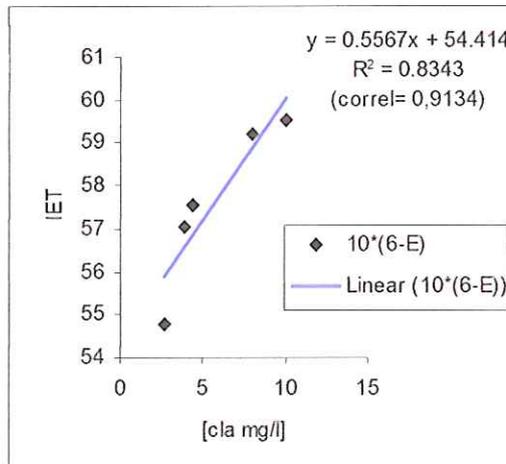


Figura 83 Variação do Índice do Estado Trófico do reservatório de Tucuruí em função da concentração de clorofila e de seus respectivos coeficientes de determinação e de correlação.

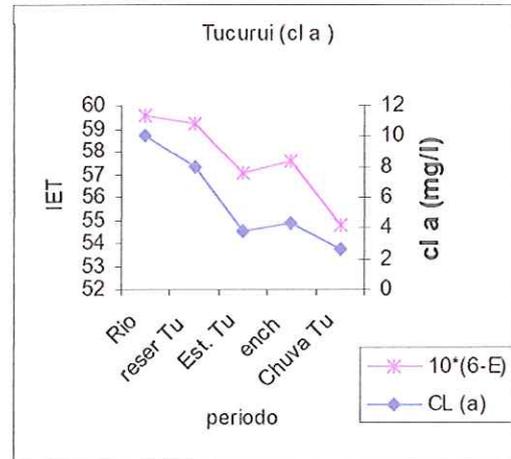


Figura 84 Variação de Índice de Estado Trófico e da concentração de clorofila em função do período chuvoso e de estiagem, no reservatório de Tucuruí. (reser. = reservatório; Est. = Estiagem; ench= Enchente).

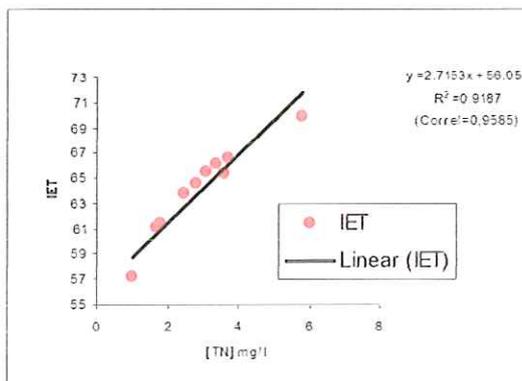


Figura 85 Variação do Índice do Estado Trófico do reservatório de Tucuruí, em função da concentração de TN e de seus respectivos coeficiente de determinação e de correlação.

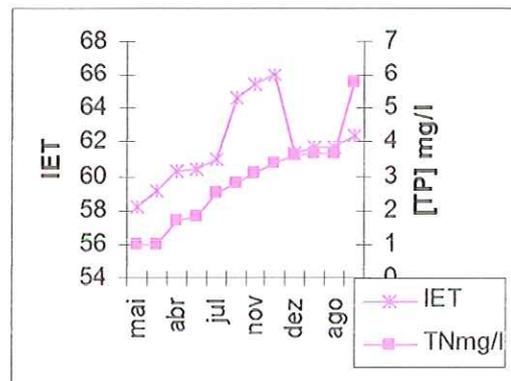


Figura 86 Variação de Índice de Estado Trófico e da concentração de fósforo total, em função dos meses do ano, no reservatório de Tucuruí.

A análise do estado trófico nos diversos pontos de coleta do reservatório de Tucuruí encontra-se nas Figuras 83 a 86. O cálculo dos índices do estado trófico a partir das concentrações de clorofila e de nitrogênio indicam uma variação do estado trófico de eutrófico a hipertrófico, de acordo com Kratzer e Brezonik (1981). Independentemente do ponto e do período de coleta, uma concentração acima de 2 mg/l de clorofila e 1 mg de nitrogênio indica um estado eutrófico.

### 3.5 Parâmetros físico-químicos

#### 3.5.1 Parâmetros físico químico na Barra Bonita

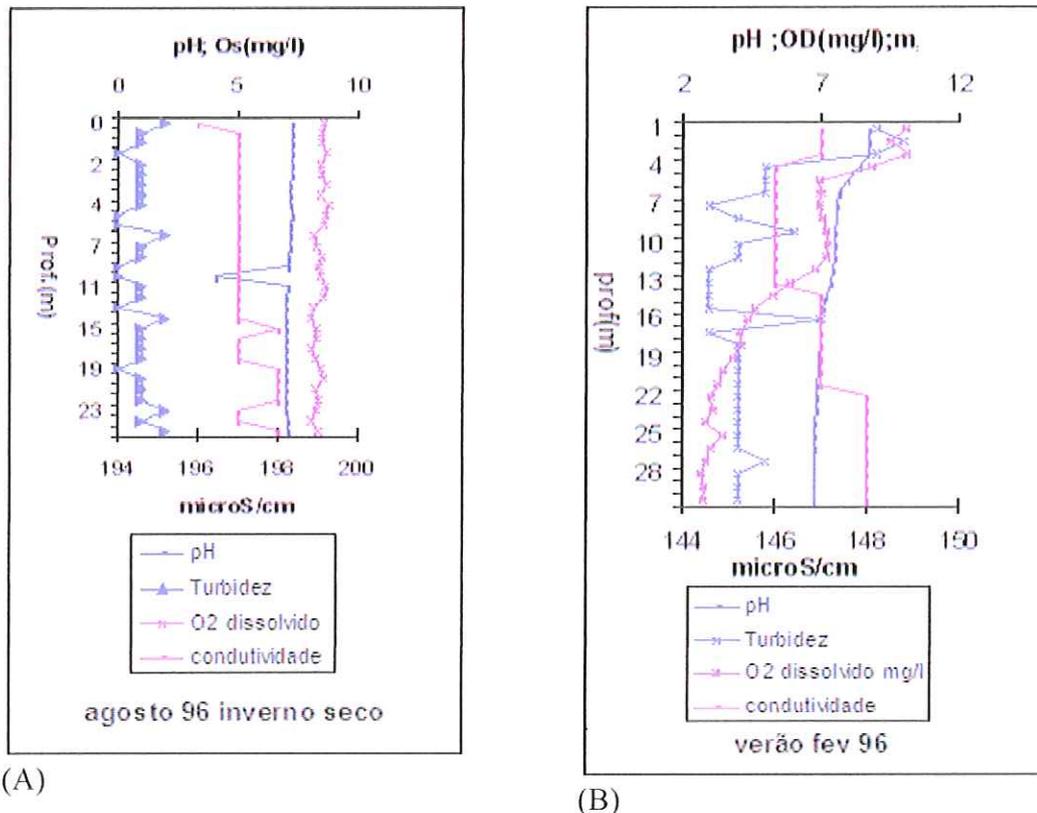


Figura 87 Parâmetros pH, condutividade, oxigênio dissolvido e turbidez em função da profundidade do reservatório da UHE de Barra Bonita (A) inverno seco e (B) verão chuvoso.

Como já discutido, o reservatório de Barra Bonita, considerado raso, é sensível às variações de pressão ou temperatura, conferindo-lhe uma estrutura estratificada ou de circulação. A figura 87 apresenta o perfil do reservatório sujeito a diversos valores de pH, diferente concentração de matéria orgânica, variação de oxigênio dissolvido e condutividade no verão e inverno. A análise destes gráficos indica no verão uma estrutura estratificada como aconteceu e é discutida com o perfil térmico. No verão, o oxigênio dissolvido mostra uma situação de circulação. Os perfis de turbidez e pH no inverno caracterizam as entradas de água de concentração diferentes em material em suspensão por infiltração.

### 3.5.2. Parâmetro de oxigênio dissolvido no reservatório da UHE Carlos Botelho

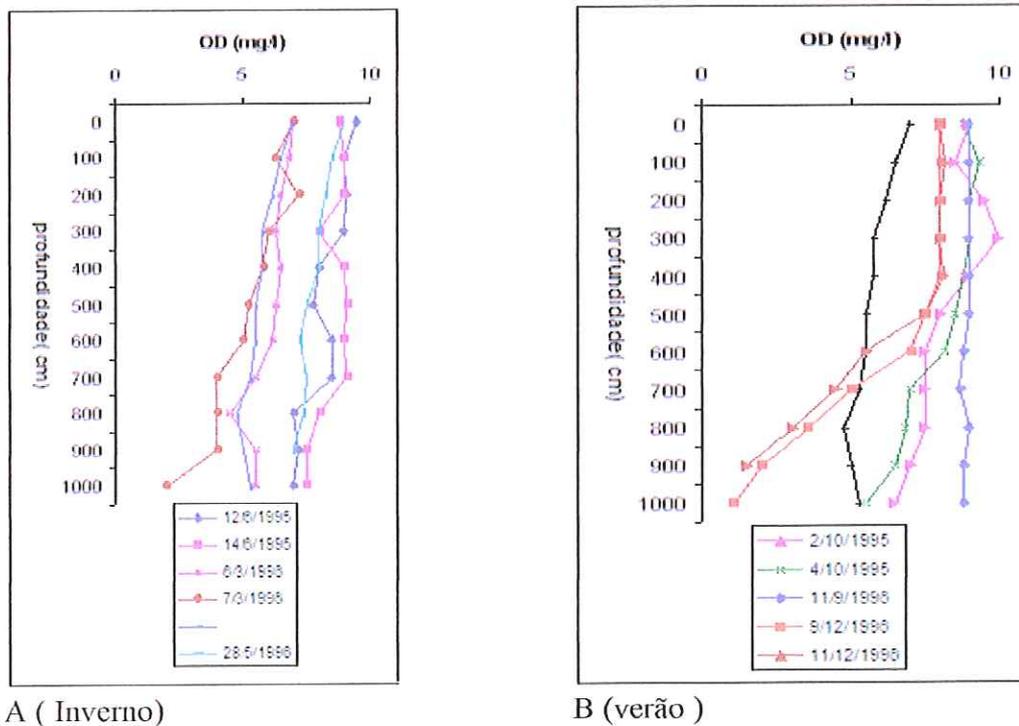


Figura 88 Variação do oxigênio dissolvido no reservatório da UHE Carlos Botelho, no período de inverno(A) e no verão(B) em função da profundidade.

A Figura 88 apresenta os perfis de oxigênio dissolvido no reservatório nos meses correspondendo ao verão e inverno. A análise destes gráficos mostra um perfil mais retilíneo mostrando uma situação de circulação no inverno. No verão, a descontinuidade dos perfis traduz uma situação de estratificação em dezembro e outubro. Estes resultados confirmam a estrutura estratificada, já discutida com o perfil térmico.

### 3.6 Os número adimensionais

#### 3.6.1. Número de Froude

Tabela 7 Valores do número de Froude ( $Fo$ ) nos três reservatórios com seus valores médios, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação

|     | Fo Tucú | Fo BB  | Broa |
|-----|---------|--------|------|
| Jan | 714.40  | 269.95 | 2.7  |
| Fev | 2908.10 | 308.80 | 1.55 |
| Mar | 588.43  | 434.04 | 2.17 |
| Abr | 290.42  | 84.23  | 1.73 |
| Mai | 145.80  | 169.30 | 3.41 |
| Jun | 1032.20 | 0      | 0.59 |
| Jul | 1026.50 | 158.21 |      |
| Ago | 882.42  | 75.55  |      |
| Set | 1032.10 | 420.49 | 0.42 |
| Out | 1319.20 | 81.49  | 5.93 |
| Nov | -87463  | 460.88 | 6.51 |
| Dez | 882.41  | 534.70 | 4.88 |

|       |           |          |      |
|-------|-----------|----------|------|
| Media | -6386.75  | 249.80   | 2.99 |
| Var   | 652380949 | 32369.77 | 4.62 |
| Desv  | 25541.74  | 179.92   | 2.15 |
| CV    | -3.99     | 0.72     | 0.72 |

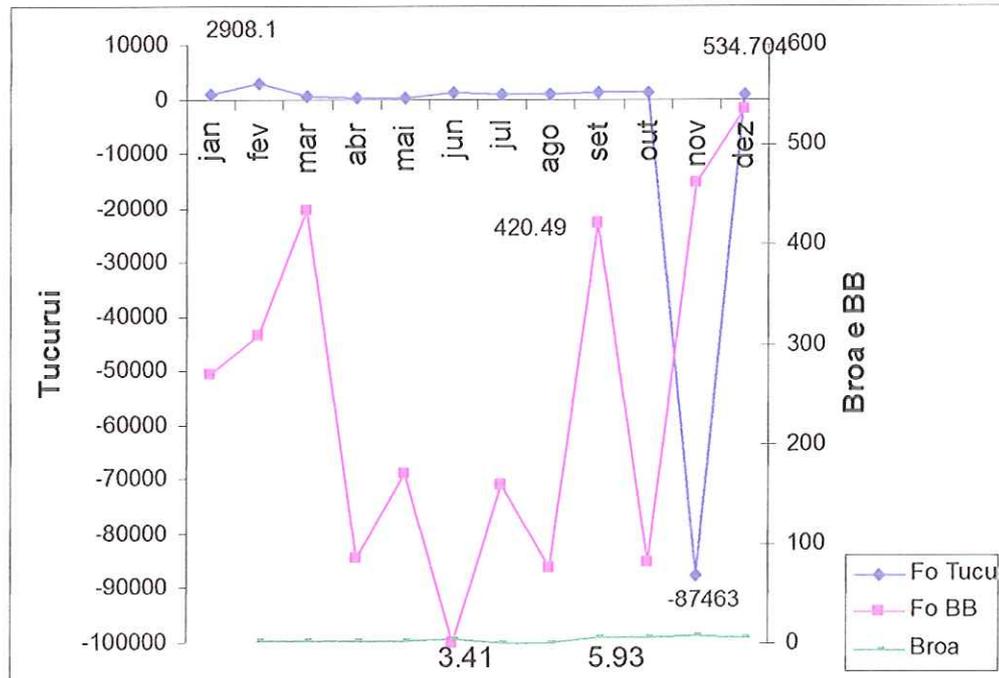


Figura 89 Comparação do número de Froude nos três reservatórios, mostrando o Tucuruí com o maior número de Froude.

O resultado está na Figura 89. A análise deste gráfico mostra que, no reservatório de Barra Bonita, o  $Fo$  é elevado nos meses de setembro a abril e coincide com o período de chuva. No Broa, os valores são próximos de zero, enquanto, em Tucuruí, valor negativo foi observado no mês de dezembro, coincidindo com o período chuvoso. O valor máximo em Tucuruí foi de 2908,1 enquanto que no Broa e Barra Bonita os valores máximos foram 5,93 e 534,7, respectivamente. Os coeficientes de variância de 3,99; 0,71 e 0,72 encontrados mostram uma variação na mesma ordem para Barra Bonita e Carlos Botelho.

3.6.2 Números de Wedderburn e Richardson

Tabela 8 Valores dos números adimensionais de Wedderburn e Richardson nos três reservatórios, com seus valores médios, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação

|       | Broa<br>Wed | Broa<br>Ri | BB<br>Wed | BB<br>Ri*E-07 | Tucu<br>Wed | Tucu<br>Ri |
|-------|-------------|------------|-----------|---------------|-------------|------------|
| Jan   | 0.0037      | 5.95       | 5.33      | 4.77E-05      | 12.74       | 2580.86    |
| Fev   | 0.0015      | 2.56       | 10.65     | 6.72E-05      | 69.25       | 13181.91   |
| Mar   | 28.8069     | 502.65     | 9.97      | 4.48E-05      | 11.81       | 2278.12    |
| Abr   | 0.0024      | 2.82       | 5.66      | 3.28E-05      | 8.20        | 1075.85    |
| Mai   | 0.0043      | 7.05       | 9.479     | 4.70E-05      | 0.817       | 2.16       |
| Jun   | 0.0036      | 2.79       | 0         | 0             | 17.24       | 4271.83    |
| Jul   |             |            | 5.34      | 3.70E-05      | 15.65       | 3875.43    |
| Ago   |             |            | 3.34      | 2.26E-05      | 10.39       | 2854.22    |
| Set   | 0.0015      | 1.41       | 12.92     | 9.80E-05      | 8.51        | 2729.26    |
| Out   | 0.0166      | 23.45      | 2.7       | 2.19E-05      | 11.10       | 3203.58    |
| Nov   | 0.0208      | 25.83      | 5.58      | 8.02E-05      | 10.66       | 2765.76    |
| Dez   | 0.0371      | 43.43      | 46.85     | 2.45E-04      | 13.52       | 2965.75    |
| Media | 2.88        | 61.79      | 9.81825   | 6.2E-05       | 15.82       | 3482.06    |
| Var   | 82.92       | 24187.44   | 149.6627  | 4.02E-09      | 300.25      | 10622244   |
| Desv  | 9.10        | 155.52     | 12.23367  | 6.34E-05      | 17.32       | 3259.17    |
| CV    | 3.15        | 2.52       | 1.246013  | 1.02          | 1.09        | 0.94       |

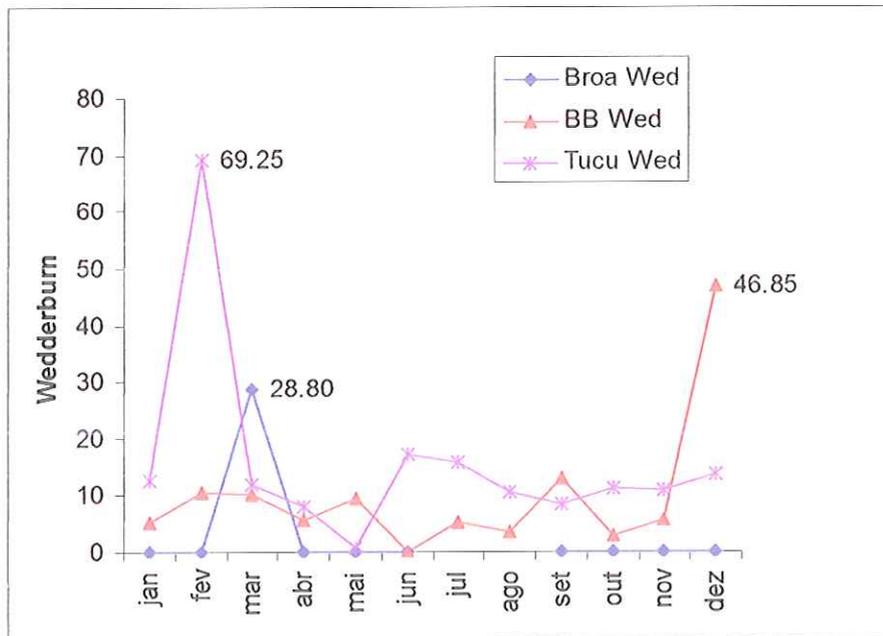


Figura 90 Comparação dos números de Wedderburn determinando o reservatório de Tucuruí como o de maior índice do Wedderburn.

Wedderburn

O resultado do número de Wedderburn dos três reservatórios encontra-se na figura 90. Este gráfico revela a existência de 2 períodos em ambos os reservatórios. Os maiores valores foram obtidos nos meses de fevereiro (69,25), dezembro (46,85) e abril

(28,80) em Tucuruí, Barra Bonita e Broa, respectivamente. Comparando os gráficos, observou-se que, em Tucuruí, Barra Bonita e Broa, os valores médios foram 15,82; 9,81 e 2,88, e os coeficientes de variação foram 1,09; 1,24 e 3,15, respectivamente.

### Richardson

Os gráficos do número de Richardson estão na Figura 91 e Tabela 9, onde os maiores valores são observados de janeiro a maio e os menores de junho a dezembro. O Ri no reservatório de Tucuruí é muito superior ao dos outros reservatórios. Os valores máximos registrados em cada um foram: Tucuruí- 3482,05; Barra Bonita-  $6,2 \cdot 10^{-5}$ ; Broa- 2,88 e os coeficientes de variação na mesma ordem foram 0,93; 1,02 e 2,51.

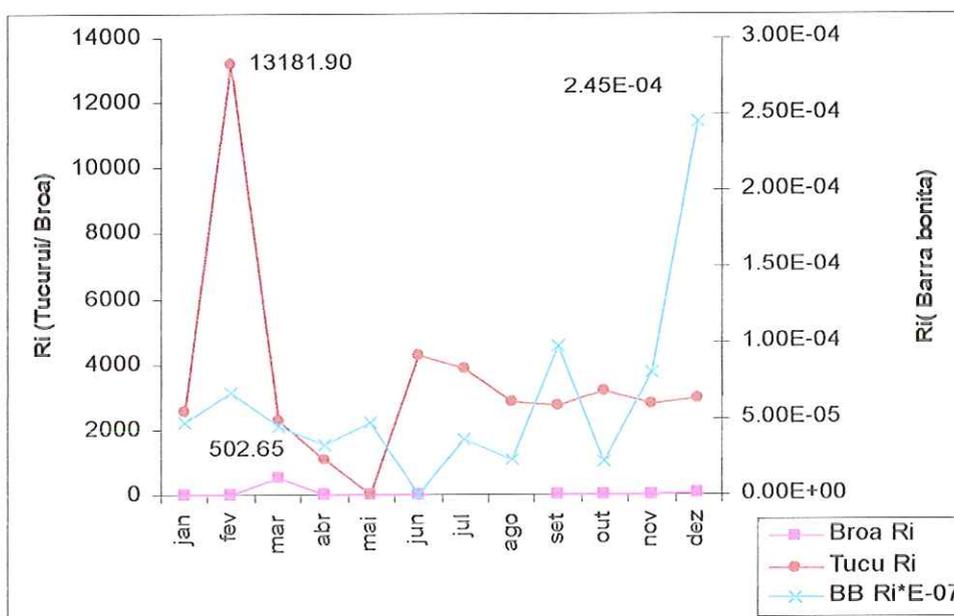


Figura 91 Comparação dos números de Richardson nos três reservatórios, observando um período de maiores valores até maio e um período de menor valor de junho a dezembro.

### 3.6.3 Lake number

Tabela 9 Valores do *Lake number* dos três reservatórios com seus valores médios, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação.

|     | UHE          |                        |
|-----|--------------|------------------------|
|     | Barra Bonita | Carlos Botelho Tucuruí |
| Jan | 4.87E-04     | 3.69E-04               |
| Fev | 8.13E-04     | 3.17E-04               |
| Mar | 1.76E-03     | 3.69E-05               |
| Abr | 8.78E-04     | 9.60E-05               |
| Mai | 2.17E-03     | 9.47E-05               |

|         |          |          |          |
|---------|----------|----------|----------|
| Jun     | 2.80E-03 | 1.92E-04 | 2.37E-02 |
| Jul     | 6.27E-04 |          | 2.30E-02 |
| Ago     | 5.42E-04 |          | 1.55E-02 |
| Set     | 4.06E-04 | 1.03E-03 | 8.82E-03 |
| Out     | 1.54E-04 | 7.10E-04 | 7.81E-03 |
| Nov     | 6.64E-04 | 2.04E-05 | 8.51E-03 |
| Dez     | 6.03E-04 | 7.52E-05 | 8.77E-03 |
| Media   | 9.92E-04 | 2.95E-04 | 1.37E-02 |
| desvpad | 8.08E-04 | 3.34E-04 | 0.0070   |
| Var     | 6.53E-07 | 1.12E-07 | 4.99E-05 |
| CV      | 8.15E-01 | 1.13E+00 | 5.15E-01 |

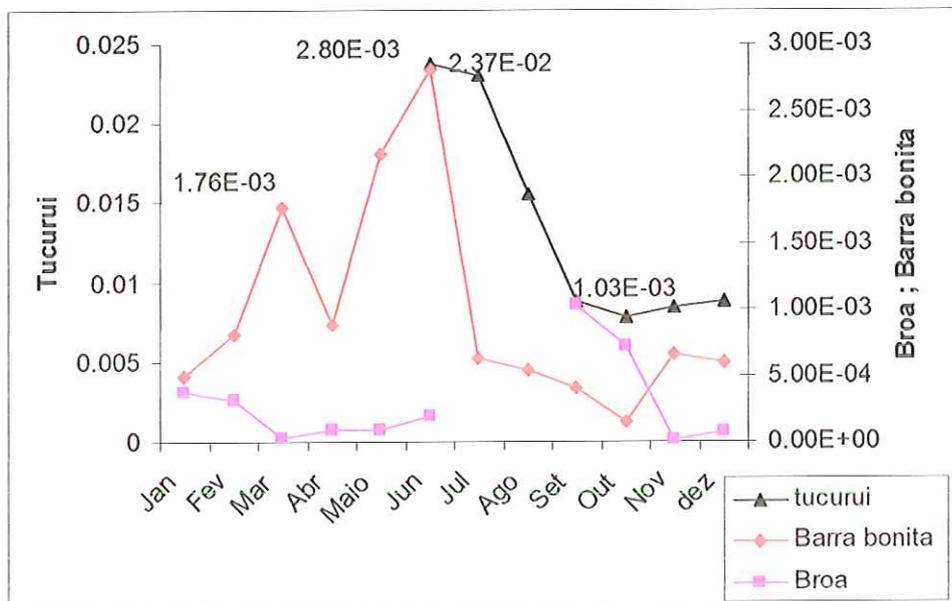


Figura 92 Comparação dos números de *Lake number* nos três reservatórios, observando um período de maiores valores, de junho a outubro, e um período de menor valor de novembro a maio.

Os números densimétricos de Froude, de Wedderburn e Richardson no reservatório de Barra Bonita encontram-se nas Figuras 89 a 92, acoplados aos perfis térmicos. A observação destes gráficos revela que os valores de Froude ( $F_i$  e/ou  $F_o$ ), Richardson ( $R_i$ ) e Wedderburn ( $W$ ) apareceram todas as vezes que ocorreu uma variação de temperatura, densidade ou termoclina. Suas amplitudes (largura) dependem da espessura da termoclina. No reservatório de Barra Bonita, os valores de  $F_i/F_o$  foram superiores a 1, mostrando que em todo o período do ano, o reservatório apresentou-se estratificado; entretanto, em junho (20/6/84), o valor de  $F_i/F_o = 0 < 1$  indicou uma circulação completa. Com relação a  $R_i$ , os gráficos da Figura 91 e a Tabela 8 mostraram que todo o período  $R_i < 0,25$  confere ao reservatório pouca mistura das camadas então

fluxos estáveis. Somente em junho,  $Ri = 0 < 0,25$  caracterizou a instabilidade em virtude da microturbulência. Como consequência, criou-se uma turbulência de grande remoinhos associados ao fluxo instável.

O número de Wedderburn (W) na Tigura 90 e na Tabela 8 mostrou que, nos meses de março, abril, junho, julho e outubro,  $W < 3$  caracterizou uma mistura por ventos fortes ou por mistura da densidade como em junho e julho: no resto do período, o valor de  $W > 3$  indicando ventos fracos com termoclina próximo à superfície. As misturas horizontais são importantes diariamente, não podendo afetar o reservatório na sua totalidade e, como resultado final, formou-se uma estrutura estratificada. Numero de lago (*Lake number* LN) acusou valores maiores do que 1, tratando-se de uma estratificação. Somente em junho,  $LN=0$  apresentou reservatório em circulação.

Na represa Carlos Botelho, as respostas do reservatório às ações do vento estão também nas figuras 89 a 92. O número densimétrico de Froude( $Fo$ ) apresentou valor maior de que 1 em todo o período, mostrando estratificação intensa. Somente nos dias 11/09/96 e 14/6/95 os valores foram abaixo de 1. Neste períodos, as velocidades do vento foram 2,81 e 1,51 km/h, respectivamente . Com relação às velocidades de vento, sendo fracas, a estrutura estratificada do reservatório foi conservada.

O número de Wedderburn apresentou valor  $3 < W < 10$ , nos dias 7/3/96 e 8/3/96, com velocidade de vento de 3,43 e 3,61 e valor de Wedderburn 6,75 e 8,45, respectivamente, sendo forte a estratificação diária. A termoclina de superfície formada por esfriamento da água de superfície é movida sob efeito do vento, produzindo efeito de turbulências superficiais, mas a estrutura estratificada do reservatório é mantida .No dia 11/9/96, a velocidade de 14,57 km/h produziu  $W = 1,55 < 3$ , indicando vento forte . Mistura horizontal importante, a termoclina levada nas profundidades destruiu a estrutura estratificada do reservatório. Nos outros dias, o W foi maior do que 10. Os ventos fracos, forte estratificação do reservatório, o LN calculado apresentou o ano inteiro valor menor do que 1, mostrando um reservatório com estrutura estratificada. Em Tucuruí, o estudo dos números adimensionais encontra-se nas Figuras 89 a 92 e os valores nas Tabela 7;8 e 9. Uma análise global mostra que os números de  $Fo/Fi$  são bastante elevados. Valores positivos indicam entrada importante de água no reservatório. Os números de lago (*Lake number*), ao contrário acusam valores menores, abaixo de 1 . Estes valores induzem uma estratificação periódica para se opor aos ventos fracos. Quanto aos números de Wedderburn, os resultados foram dominados por valores elevados, acima de 10, confirmando forte estratificação diária e ventos fracos.

Somente nos meses de abril e setembro, os valores ficaram entre  $3 < W < 10$ , mostrando uma estratificação diária marcada por deslocamento da termoclina sob efeito de ventos fortes. Somente no mês de maio o valor de  $W = 0,81 < 3$  indicou vento forte.

O estudo da determinação do número de Froude indicou claramente que os pontos de inversão de temperatura caracterizam as entradas de água de temperatura e densidade baixas por infiltração.

A avaliação da entrada de água por infiltração nos reservatórios é feita pelo número de Froude. Quando o rio deságua num lago, a água que acaba de entrar dirige-se para a camada de densidade mais próxima da sua densidade. Este processo depende da temperatura, dos materiais dissolvidos e dos suspensóides.

A confirmação da estrutura estável do reservatório pode ser feita por outras ferramentas como os números adimensionais, dependendo do valor que esses números assumem. O número de Froude expresso por  $F_o/F_i$ , caracterizando as entradas e saídas de água, altera a estrutura física do reservatório. Quando é superior a 1 ( $F_o > 1$ ), o reservatório apresenta uma estratificação intensa (estabilidade). Os valores de  $F_o$  entre 0,1 e 1 caracterizam uma estratificação moderada e o valor de  $F_o$  menor que 0,1 ( $F_o < 0,1$ ) indica mistura completa da coluna da água. A Tabela 7 mostra que o reservatório Carlos Botelho (Broa), em junho e setembro, apresentou  $F_o = 0,59$  e  $0,42 < 1$ , confirmando uma estratificação moderada do reservatório. No reservatório de Barra Bonita, somente no mês de junho, o valor de  $F_o=0$  ficou abaixo de 0,1, confirmando a instabilidade ou mistura completa. No caso do reservatório de Tucuruí, a variação da temperatura nas profundidades de 35 a 70 m provocada pela entrada de água subterrânea criou uma resistência muito elevada e um  $F_o$  muito menor que 1 ( $F_o \lll 1$ ), indicando forte estratificação em novembro. O reservatório apresentou a maior estabilidade e maior trabalho de vento. De acordo com Salençon e Thebault (1997), o fluxo superior dá-se quando a densidade da água que entra é inferior à densidade da água do lago. Fala-se de fluxo inferior quando a densidade da água do influxo é superior à densidade da água do lago. Pode haver fluxo intermediário quando  $\rho_{ep} < \rho_{in} < \rho_{hipo}$ , onde  $\rho_{ep}$  é a densidade da água no epilimnion,  $\rho_{in}$  a densidade a água entrando e  $\rho_{hipo}$  a densidade da água no hipolimnion. A água que desce à medida que entra na baía e a velocidade do influxo vão sendo reduzidas gradualmente até ser atingida uma seção de profundidade crítica caracterizada pelo número densimétrico de Froude ( $F_o$ ). A



circulação convectiva ocasionada pela diferença de temperatura provoca a transferência de calor da superfície da água para a atmosfera por causa de uma redução da temperatura e um aumento de sua densidade da água. A inversão da densidade é logo desfeita com o deslocamento para baixo da camada superficial mais densa. Fenômenos semelhantes ocorreram durante a estiagem de 1987 a 1989, no reservatório de Tucuruí, uma vez que esse local é diretamente influenciado pela exuberância da floresta, favorecendo as infiltrações e as observações comprovadas pelos estudos realizados por Pereira (1989).

O número de Wedderburn é utilizado para julgar se a existência da estrutura pode acomodar a profundidade da camada de mistura (ELLIOTT *et al.*, 2001). Aplicado aos reservatórios, o número de Wedderburn mostrou que Barra Bonita sofreu mais a ação do vento. Dependendo do valor assumido, ele caracteriza a intensidade do vento atuante. Na Barra Bonita nos meses de fevereiro, setembro e dezembro, ele assumiu valores de 10,65, 12,92 e 46,85, respectivamente. Segundo Salençon e Thebault (1997), valor maior do que 10 indica forte estratificação do reservatório com camada de mistura dominada por turbulências produzidas na superfície e transportadas na base. A estrutura do reservatório é dominada pela ação do vento fraco nos meses de janeiro, março, abril, maio, julho, agosto e novembro. O número de Wedderburn assumiu valor entre 3 e 10, apresentando forte estratificação. Houve uma circulação parcial vertical; e nos meses de junho e outubro os valores de Wedderburn foram zero (0) e 2,7, respectivamente, indicando ventos forte ou termoclina próxima de superfície. A estrutura do reservatório em 20 de junho não pode ser explicada por esta afirmação pelo fato de que, naquele dia, não foi constatado registro de vento pelo método utilizado. Então a análise deste resultado mostra que o vento não é o único responsável pela instabilidade do reservatório. No Broa, somente em 8 de março de 1996, vento = 3,61 km/h e chuva 18 mm, o número de Wedderburn assumiu valor de 28,80 > 10. No resto do tempo, os valores foram menores do que 3. Teoricamente, estes períodos deveriam apresentar uma circulação ou estabilidade moderada, mas na realidade foi apresentada uma estabilidade, fenômeno confirmando que o vento não é o único fator de instabilidade. Em Tucuruí, somente em abril e setembro, os números de Wedderburn acusaram valores entre 3 e 10, tendo valores de 8,2 e 8,5, respectivamente, caracterizando forte estratificação; no mês de maio, o valor foi 0,81 menor que 3 ( $0,81 < 3$ ). Em consequência disso, a termoclina localizou-se próxima da superfície. O resto do tempo  $W \gg 10$ , em razão do vento fraco

e estrutura estratificada . Também este resultado expressa perda de calor ou aumento de trabalho do vento e aumento da espessura da termoclina.

O número de Richardson (Ri) expressa a resistência fluante acumulada como sendo decorrente da diferença de densidade entre as águas nas camadas superiores e as camadas inferiores. O número de Richardson(Ri), na Barra Bonita, mostrou que o ano inteiro o Ri acusou valor  $Ri < 0,25$ , confirmando a estrutura estratificada sujeito a corrente tangencial, caracterizando um fluxo instável em virtude de microturbulências de grande remoinhos associados ao fluxo instável. Como consequência, os componentes solúveis (nutrientes) e os suspensóides (microalgas, microfaunas) são transportados em conjunto com a dispersão da água para a camada mais espessa de densidade, velocidade menor. O valor  $Ri > 0,25$  indica fluxo estável, pouca mistura e fricção entre as camadas. No reservatório de Broa, ao contrário, todos os valores são menores do que 0,25, caracterizando um fluxo estável com pouca mistura entre as camadas.

### 3.7 Estudo das correlações e regressões

#### 3.7.1 Estudo das correlações e regressões no reservatório de Barra Bonita

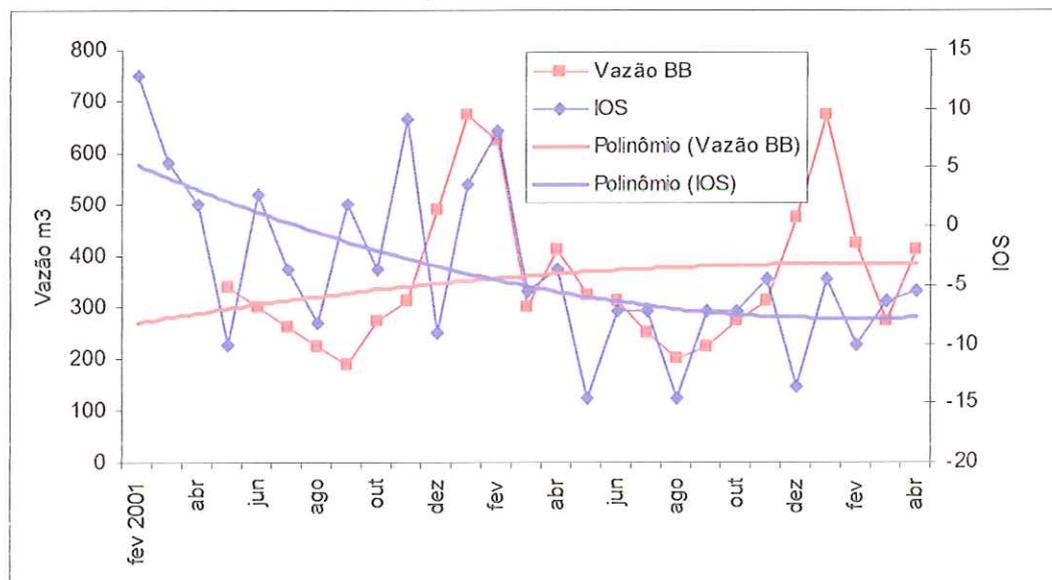


Figura 93 Vazão e Índice de Oscilação Sul (IOS) em função dos meses do ano, de abril a agosto( inverno) e setembro a março( verão), no período de fevereiro de 2001 a abril de 2003, no reservatório de Barra Bonita.

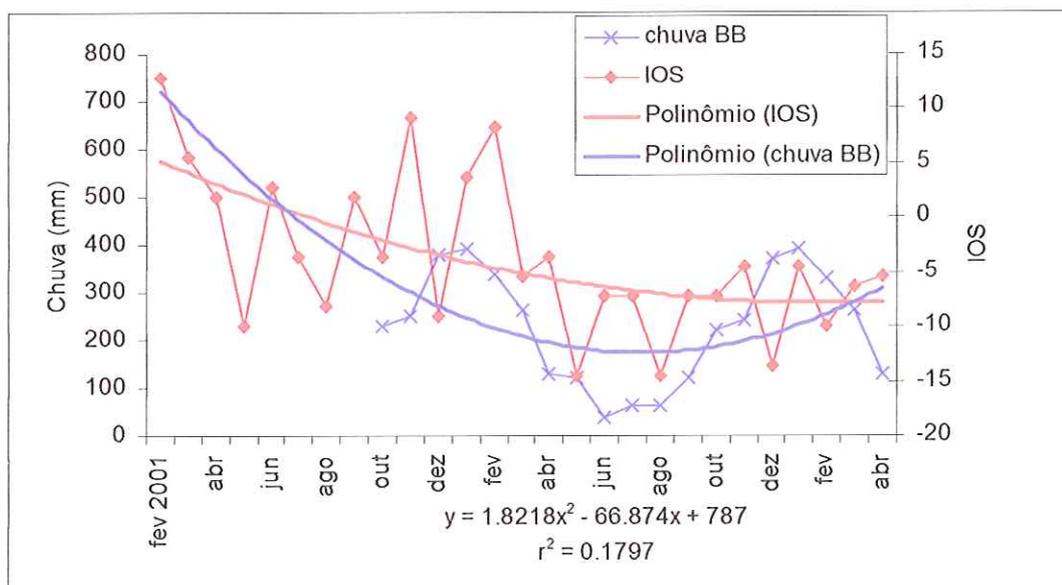


Figura 94 Chuva e IOS em função dos meses do ano no reservatório da UHE de Barra Bonita, nos períodos de abril a agosto (inverno) e setembro a março (verão), com seus respectivos coeficientes de determinação e equação de ajuste, no reservatório de Barra Bonita, de fevereiro de 2001 a abril de 2003 (CPTEC,) 2004.

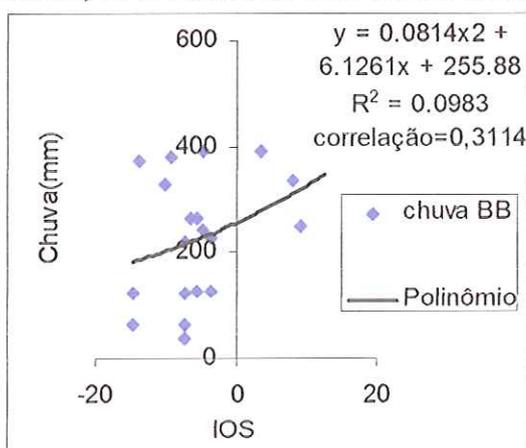


Figura 95 Chuva em função do IOS com os coeficientes de correlação e de determinação.

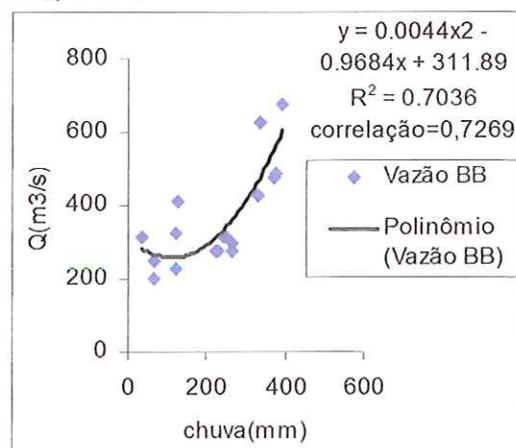


Figura 96 Vazão em função da chuva com os coeficientes de correlação e de determinação.

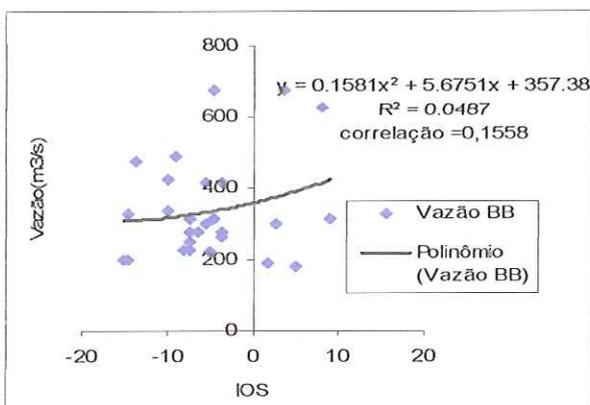


Figura 97 Vazão em função do IOS com os coeficientes de correlação e de determinação.

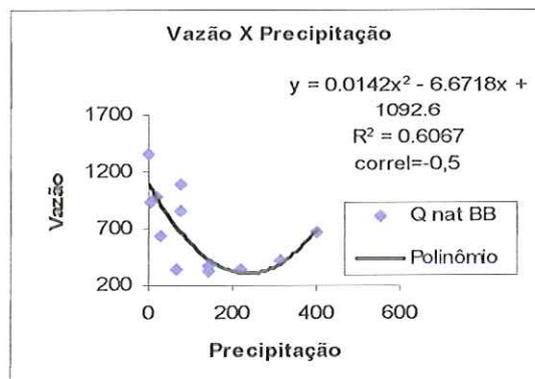


Figura 98 Vazão em função da precipitação com seus coeficientes de determinação e de correlação.

Correlação volume X chuva 0.58123

Correlação volume X IOS = -0,16

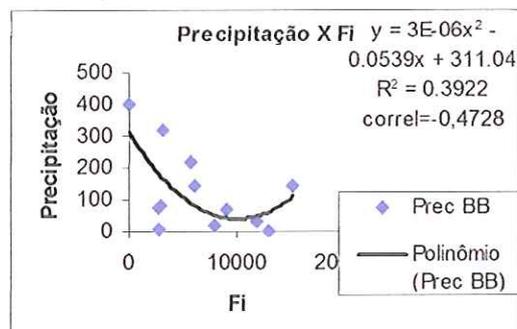


Figura 99 Precipitação em função de Fi com seus respectivos coeficientes de correlação e de determinação.

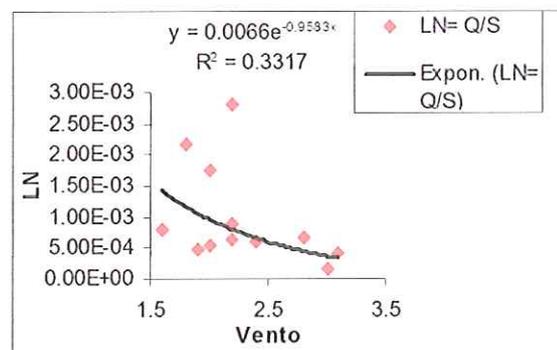


Figura 100 lake number em função de velocidade do vento com seus respectivos coeficientes de correlação e de determinação.

Tabela 10 Correlação significativa entre características físicas e nutrientes, no reservatório da UHE de Barra Bonita.

|                   | Conteúdo de calor | Trabalho vento | RTC      | Estabilidade |
|-------------------|-------------------|----------------|----------|--------------|
| Amônia            | -0.50557          |                |          |              |
| P total           | 0.507791          | 0.51848        | 0.519778 |              |
| PTD               | 0.84021           | 0.833328       |          |              |
| Nitrato           |                   |                | 0.635862 |              |
| Riqueza biológica |                   |                |          | 0.515596     |

Tabela 11 Correlação significativa entre números adimensionais e nutrientes no reservatório da UHE de Barra Bonita

|         | Froude (Fo) | Wedderburn | Richardson |
|---------|-------------|------------|------------|
| Nitrato | 0.552017    | 0.951108   | 0.914761   |
| P total | 0.671052    | 0.712002   | 0.681      |
| PTD     |             | 0.594309   |            |

Tabela 12 Correlação entre fatores biológicos e os números adimensionais e características físicas do reservatório da UHE Barra Bonita

|                          | B(vento) | estabilidade | RTC      | Fo       | W        | Richardson |
|--------------------------|----------|--------------|----------|----------|----------|------------|
| <i>Cyanophyceae</i>      | 0.10268  | -0.10693     | -0.3844  | 0.002301 | -0.28777 | -0.32119   |
| <i>Chlorophyceae</i>     | -0.08344 | -0.26239     | -0.22495 | -0.39601 | -0.09496 | -0.16874   |
| <i>Bacillariophyceae</i> | 0.149177 | 0.568038     | 0.545671 | 0.205632 | 0.482498 | 0.486897   |
| <i>Crysophyceae</i>      | -0.40998 | -0.24646     | 0.529065 | 0.46137  | -0.01789 | 0.189724   |
| <i>Euglenophyceae</i>    | 0.571671 | -0.18592     | -0.35538 | -0.19798 | -0.12224 | -0.20962   |
| <i>Dinophyceae</i>       | 0.443924 | 0.734883     | 0.546243 | 0.431461 | 0.839554 | -0.20962   |
| <i>Cryptophyceae</i>     | -0.46543 | -0.20089     | 0.243933 | 0.139733 | -0.04219 | 0.090895   |
| Fitoflagelados           | 0.438981 | -0.31778     | -0.25004 | 0.209147 | 0.192757 | 0.07819    |

Tabela 13 Correlação entre parâmetros hidrológicos (RT; precipitação e vazão total ) e nutrientes, no reservatório da UHE de Barra Bonita

|                          | RT       | preci.   | vazão T  |
|--------------------------|----------|----------|----------|
| Fito mgC/m2/dia          | 0.325869 | 0.213257 | -0.25099 |
| Prod.prima               | 0.070216 | 0.3205   | 0.116399 |
| Clorofila a              | 0.091825 | 0.241557 | 0.082921 |
| Riqueza                  | -0.07682 | -0.29674 | -0.07611 |
| Diversidade              | 0.277285 | 0.321911 | -0.37549 |
| N total µg/l             | -0.24316 | 0.07766  | 0.237933 |
| nitrato µ                | -0.37291 | 0.721346 | 0.056507 |
| nitrito µg/l             | -0.59068 | 0.100663 | -0.51954 |
| Amônia µg/l              | -0.43212 | 0.034188 | -0.52756 |
| P total µg/l             | -0.68772 | 0.628688 | 0.389275 |
| silicato mg/l            | 0.820997 | -0.25265 | 0.180867 |
| PTD µg/l                 | -0.15403 | 0.213685 | 0.707431 |
| PID µg/l                 | 0.122526 | 0.327392 | 0.600393 |
| <i>Cyanophyceae</i>      | 0.137205 | 0.010328 | 0.487457 |
| <i>Chlorophyceae</i>     | 0.504869 | -0.41341 | -0.19334 |
| <i>Bacillariophyceae</i> | -0.62837 | 0.419148 | -0.21116 |
| <i>Crysophyceae</i>      | -0.43407 | 0.39719  | -0.43915 |
| <i>Euglenophyceae</i>    | 0.486426 | -0.53471 | 0.598288 |
| <i>Dinophyceae</i>       | -0.40504 | 0.496336 | 0.143153 |
| <i>Cryptophyceae</i>     | -0.06209 | -0.12665 | -0.55912 |
| Fitoflagelados           | 0.272448 | 0.031705 | 0.656776 |

Tabela 14 Correlação entre fatores operacionais do reservatório, nutrientes e IOS

| 1998 2000 Barra Bonita |          |
|------------------------|----------|
| prec x nit tot         | 0.357421 |
| prec x fos tol         | 0.404412 |
| prec x tur             | 0.370403 |
| Qtu x nit to           | 0.012207 |
| Qtu x fos to           | -0.42592 |
| Qtu x tub              | -0.19213 |
| Qv x nit               | 0.02647  |
| Qv x fos               | 0.205874 |
| Qv x tub               | 0.354354 |
| Qtot x nit to          | 0.018059 |
| Qtot x fos to          | 0.06396  |
| Qtot x Tub             | 0.259047 |
| TR x nit to            | 0.096325 |
| x fos to               | -0.24564 |
| TR x tur               | -0.40416 |
| correl Q x CH          | 0.726921 |
| correl Q x IOS         | 0.393697 |
| correl CH xIOS         | 0.311389 |

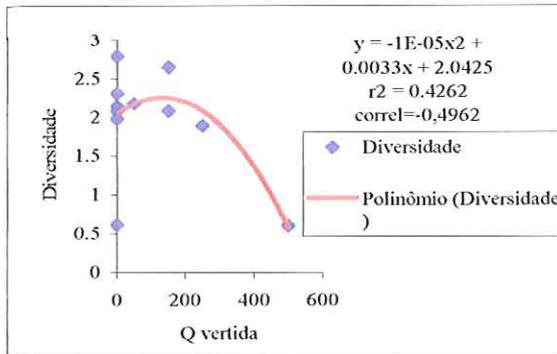


Figura 101 Variação da diversidade biológica em função da vazão vertida com seus respectivos coeficiente de correlação e de determinação.

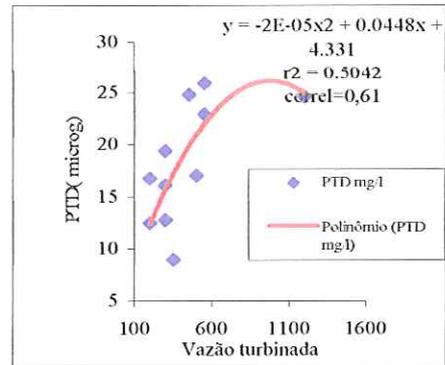


Figura 102 Variação do PTD em função da vazão turbinada com seus respectivos coeficientes de correlação e de determinação.

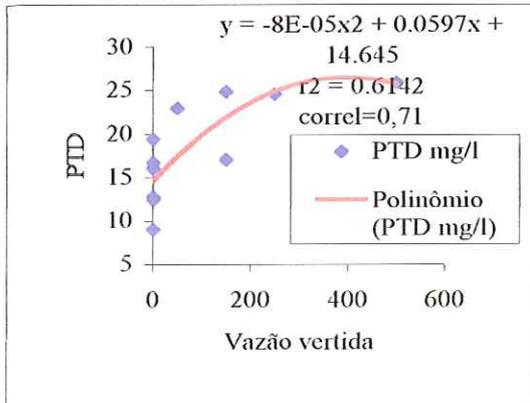


Figura 103 Variação do PTD em função da vazão vertida com seus respectivos coeficiente de correlação e de determinação.

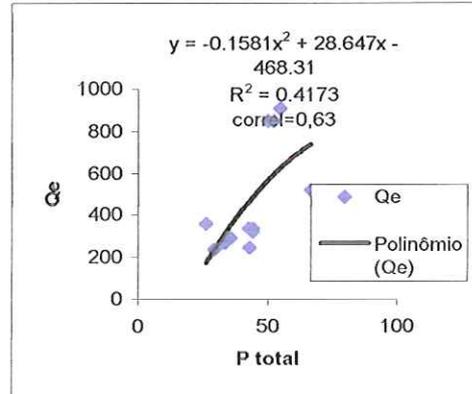


Figura 104 Variação da Ptotal em função da vazão de entrada com seus respectivos coeficiente de correlação e de determinação.

3.7.2 Estudo das correlações e regressões, no reservatório Carlos Botelho ( Lobo- Broa )

Tabela 15 Correlação entre nutrientes e números adimensionais (W, Ri, Fo ) e características físicas (B), S e conteúdo de calor no reservatório da UHE Carlos Botelho

|                          | conteúdo de calor |          | B(vento) | estabilidade | RTC      | Wedd         | Ri       | Fo           |
|--------------------------|-------------------|----------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|
| NO <sub>3</sub>          | -0.81092          | -0.8083  |          | -0.25665     | -0.31072 | -0.259210764 | -0.28882 | -0.338726593 |
| NO <sub>3</sub> saída    | 0.675434          | 0.639772 |          | -0.15743     | 0.555819 | -0.155319774 | -0.11798 | 0.565074713  |
| NO <sub>2</sub>          | 0.678623          | 0.620867 |          | 0.552698     | -0.03213 | 0.557917444  | 0.566743 | 0.029282569  |
| NO <sub>2</sub> saída    | 0.397338          | 0.270772 |          | 0.082476     | 0.03651  | 0.086115828  | 0.090344 | 0.135551469  |
| NH <sub>4</sub>          | 0.593728          | 0.586139 |          | 0.054463     | 0.333751 | 0.056474543  | 0.084252 | 0.335244269  |
| NH <sub>4</sub> saída    | -0.00667          | -0.28917 |          | -0.18319     | 0.319668 | -0.180327236 | -0.17257 | 0.366180646  |
| PO <sub>4</sub> totais   | 0.676255          | 0.648994 |          | -0.24567     | 0.169582 | -0.241683923 | -0.223   | 0.212563079  |
| PO <sub>4</sub> t saída  | 0.707754          | 0.773819 |          | -0.22549     | 0.023676 | -0.222009266 | -0.19283 | 0.360378159  |
| PO <sub>4</sub> ino      | 0.469878          | 0.493106 |          | -0.30704     | 0.169582 | -0.301694194 | -0.29324 | 0.168576527  |
| PO <sub>4</sub> in saída | 0.568051          | 0.592911 |          | -0.03448     | 0.023676 | -0.029818271 | -0.03058 | 0.042045176  |
| Si                       | 0.388982          | 0.411405 |          | 0.680726     | -0.07995 | 0.68183013   | 0.666881 | -0.094220612 |

Tabela 16 Correlação entre o fitoplâncton e a temperatura da água.

| Classe de microalgas           | Correlação   |
|--------------------------------|--------------|
| <i>Cyanophyceae</i> x To água  | -0.860007404 |
| <i>pyrrophyceae</i> x To água  | 0.998727137  |
| <i>chrysophyceae</i> x To água | -0.978936081 |
| fitophyceae x T o água         | -0.619223501 |
| <i>Chlorophyceae</i> x T água  | 0.999975357  |

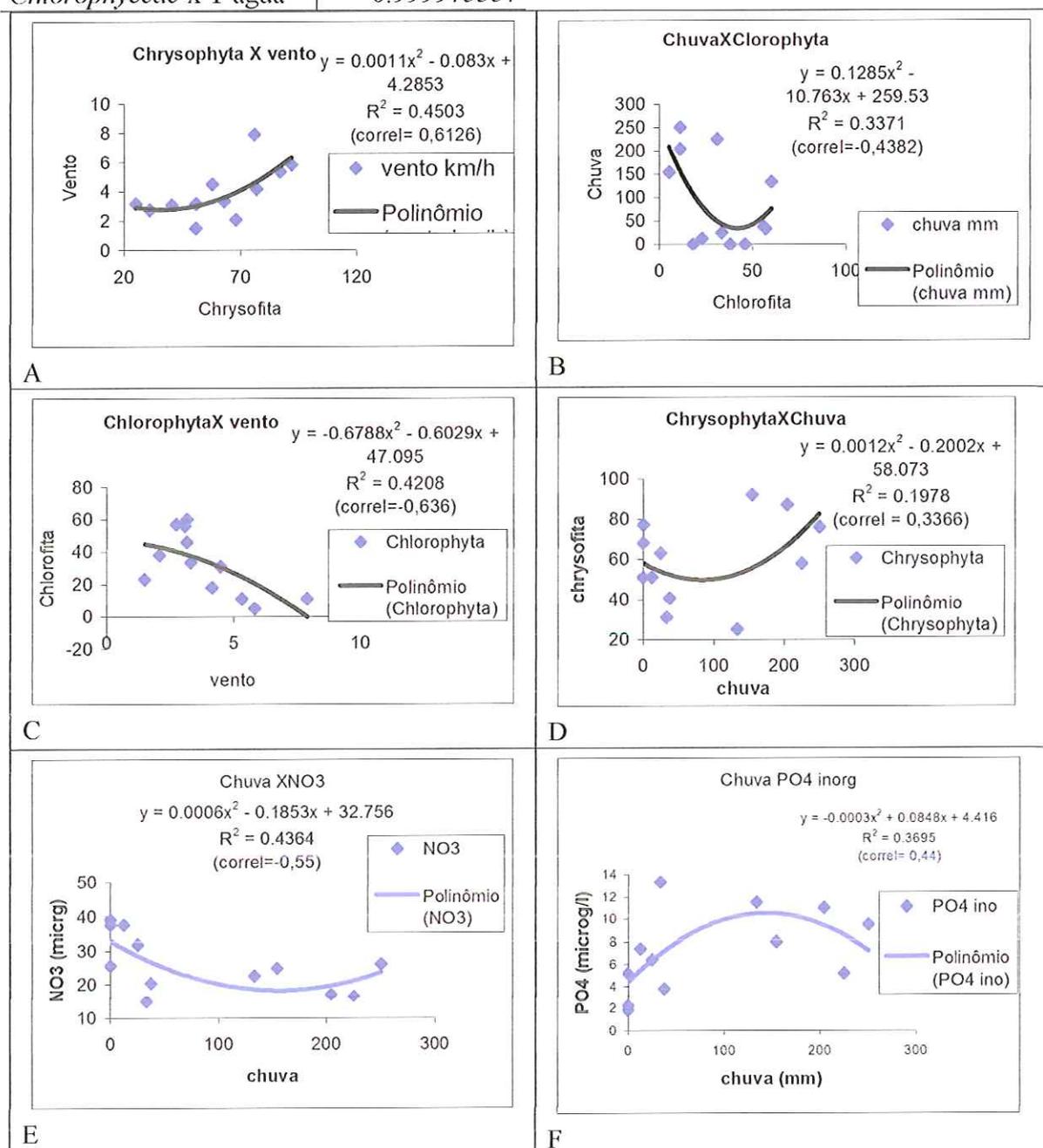


Figura 105 Coeficientes de determinação e coeficientes de correlação: (A) *Chrysophyta* em função de vento; (B) *Chlorophyta* em função da chuva; (C) *Chlorophyta* em função do vento; (D) *Chlorophyta* em função da chuva; (E) nitrato em função da chuva e (F) fósforo em função da chuva.

3.7.3 Estudo das correlações e regressões, em Tucuruí

Correlação volume útil em função da precipitação = - 0,78

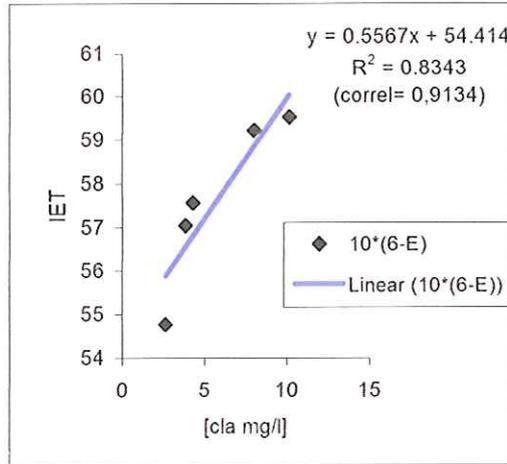


Figura 106 Variação do Índice do Estado Trófico do reservatório de Tucuruí em função da concentração de clorofila e de seus respectivos coeficientes de determinação e de correlação.

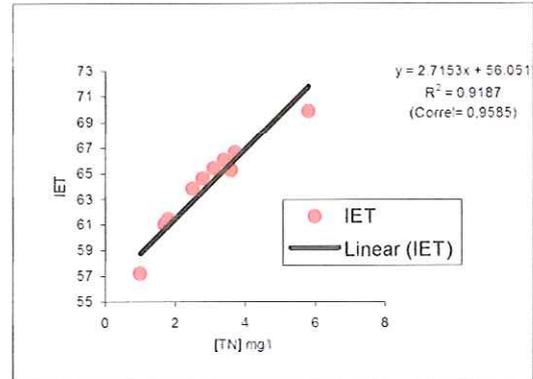


Figura 107 Variação de Índice de Estado Trófico e da concentração de fósforo total em função dos meses do ano no reservatório de Tucuruí.

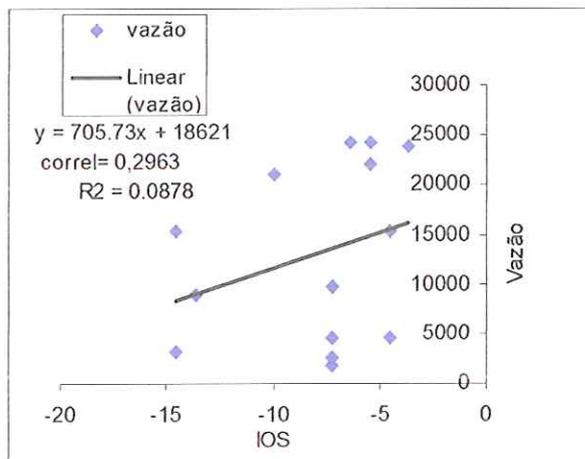


Figura 108 Vazão do reservatório de Tucuruí em função do IOS e seus respectivos coeficientes de determinação e de correlação.

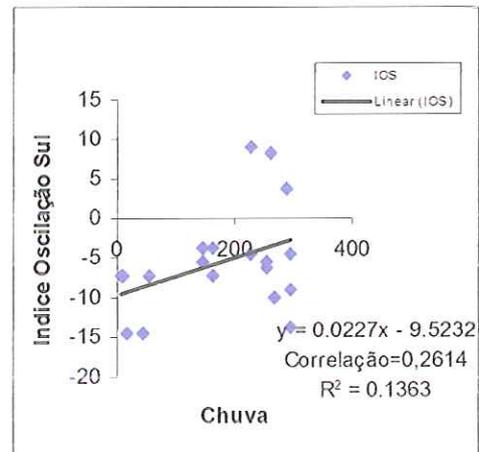


Figura 109 Chuva no reservatório de Tucuruí em função da intensidade do IOS e seus respectivos coeficientes de determinação e de correlação.

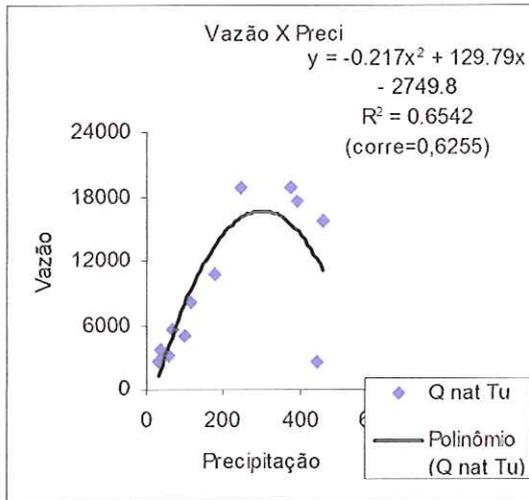


Figura 110 Vazão em função de precipitação com seus coeficientes de determinação e de correlação.

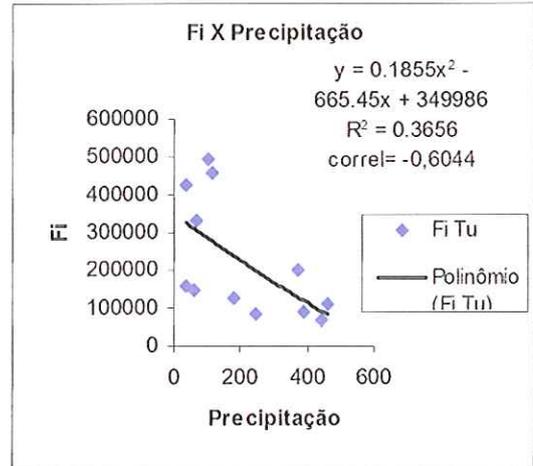


Figura 111 Precipitação em função de Froude com seus coeficientes de determinação e de correlação.

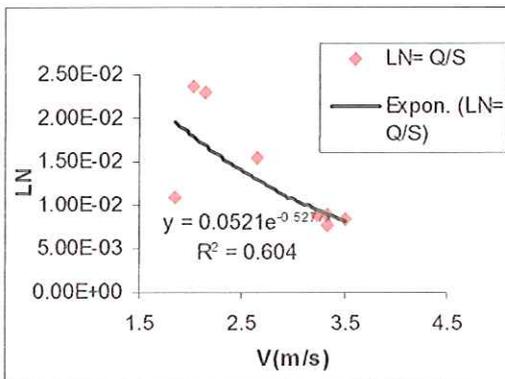


Figura 112 Correlação entre LN e Velocidade do vento

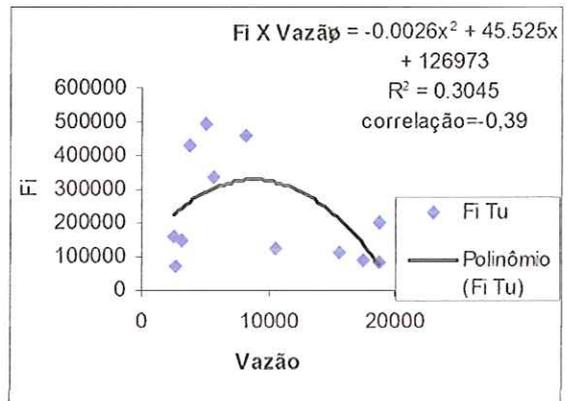


Figura 113 Vazão em função de Fi com seus coeficientes de determinação e de correlação.

Tabela 17 Coeficiente de correlação entre os nutrientes no período de estiagem e no período chuvoso no reservatório de Tucuruí com ajuste linear.

|                          | Correlação |
|--------------------------|------------|
| N-NH4+E X N-NH4+Ch       | 0.436865   |
| Fosf in Est.X Fosf in C  | -0.37345   |
| CHLa Es X Cl a Ch        | -0.33333   |
| fosf. Tot. E X fosf T Ch | -0.02644   |
| CO2 E X CO2 ch           | 0.925454   |
| N-NO3-E X N-NO3-Ch       | 0.196748   |

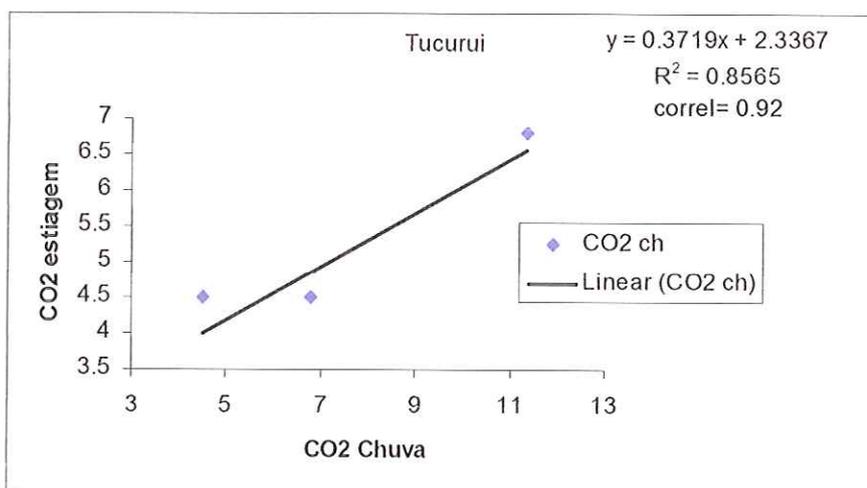


Figura 114 Regressão e correlação entre a concentração de  $\text{CO}_2$  no período de estiagem e no período chuvoso a partir de ajuste linear.

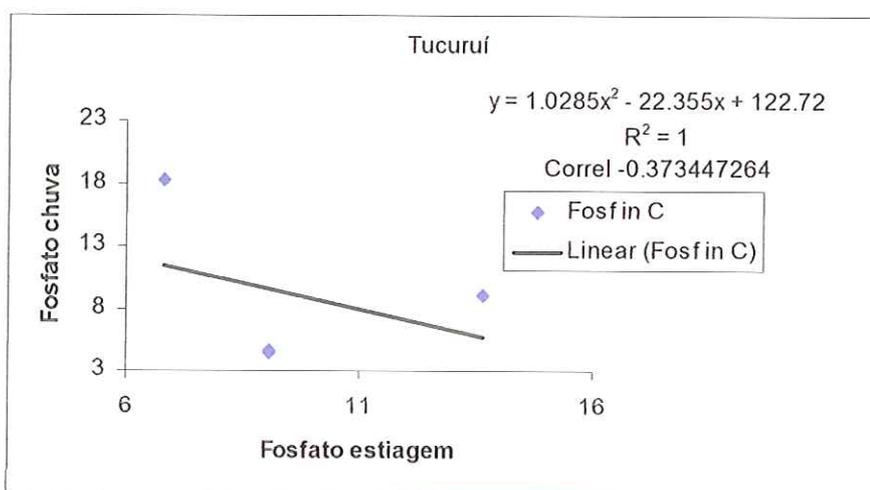


Figura 115 Regressão e correlação entre a concentração de fosfato no período de chuva e no período de estiagem no reservatório de Tucuruí a partir de ajuste linear.

Uma correlação feita entre os compostos entre si nos dois períodos mostrou que o  $\text{CO}_2$  foi o único composto cuja concentração no reservatório depende da chuva com um coeficiente de correlação de 0,92 . Pelo estudo de regressão, o coeficiente de determinação mostra que a participação da chuva no processo é insignificante, enquanto com relação ao fosfato a presença no reservatório é um processo puramente ocasionado pela chuva, com  $r^2 = 1$ . A análise das correlações entre a vazão e a chuva não forneceu resultados significantes

Tabela 18 : Correlação entre os fatores biológicos e conteúdo de calor no reservatório

| Correlações                    | R        |
|--------------------------------|----------|
| correl(CyaX Conteudo Calor     | 0.088875 |
| correl(Chl X Conteudo Calor    | -0.05692 |
| correl(Bacl X Conteudo Calor   | 0.156833 |
| correl(Cryso X Conteudo Calor  | -0.44908 |
| correl(Eug X Conteudo Calor )  | 0.58172  |
| correl(Dino X Conteudo Calor   | 0.468618 |
| correl(Crypto X Conteudo Calor | -0.48661 |
| Correl(fitofl X Conteudo Calor | 0.443932 |

### 3.8 Estudo integrado de todos os parâmetros

Tabela 19 Resumo de todos os parâmetros estudados nos três reservatórios

|                         | Barra Bonita   | Tucuruí  | da UHE Carlos Botelho  |
|-------------------------|--|--|--|
| Números dimensionais    |  |  |  |
|                         | Barra bonita   | Tucuruí  | Broa   |
| <i>Lake number(LN)</i>  | $9,92 \cdot 10^{-4}$                                   | $1,37 \cdot 10^{-2}$   | $2,95 \cdot 10^{-4}$   |
| Wedderburn(W)           | 9,81   | 15,82  | 2,88   |
| Richardson(Ri)          | $6,20 \cdot 10^{-5}$                                   | 3482,06  | 61,79  |
| Froude(Fo/Fi)           | 249,8  | -6386  | 2,98   |
| Características físicas |  |  |  |
|                         | Barra bonita   | Tucuruí  | Broa   |
| Trabalho do vento       | Médio 30,96<br>g.cm/cm <sup>2</sup>                    | Elevado 69,16<br>g.cm/cm <sup>2</sup>                        | Baixo 10,34<br>g.cm/cm <sup>2</sup>                          |
| Estabilidade            | Elevado verão<br>Baixo inverno 114,52                  | Elevado no verão<br>Baixo no inverno<br>196,42               | Elevado verão<br>Baixo inverno 23,75                         |
| Resistência térmica     | Elevado no verão<br>Baixo no inverno 2,86<br>$10^{-9}$ | Elevado no verão<br>Baixo no inverno<br>$3,35 \cdot 10^{-9}$ | Elevado no verão<br>Baixo no inverno<br>$3,94 \cdot 10^{-9}$ |
| Conteúdo de calor       | Médio 27061,39<br>cal/cm <sup>2</sup>                  | Elevado 54367,34<br>cal/cm <sup>2</sup>                      | Baixo 9630,32<br>cal/cm <sup>2</sup>                         |

Tabela 20 Correlações hidrologia/climatologia

|                       | Barra Bonita      | Tucuruí      | da UHE Carlos Botelho |
|-----------------------|-------------------|--------------|-----------------------|
| Vazão X precipitação  | 0,72 $R^2 = 0,70$ | 0,61         | $R^2 = 0,71$          |
| Volume X precipitação | -0,58             | - 0,78       |                       |
| Vazão X IOS           | 0,15              | 0,29         |                       |
| precipitação X IOS    | 0,31              | 0,26         |                       |
| LN X vento            | $R^2 = 0,33$      | $R^2 = 0,60$ |                       |
| Chuva X Froude (Fi)   | -0,47             | 0,60         |                       |
| Volume X IOS          | -0,16             |              |                       |
| Fi X vazão            |                   | -0,39        |                       |
| Div. fito X vazão nat | -0,75             |              |                       |

Tabela 21 : Correlação nutrientes e numeros adimensionais

|                       | Barra Bonita | Tucuruí | da UHE Carlos Botelho |
|-----------------------|--------------|---------|-----------------------|
| P total X Fo          | 0,67         |         | 0,36                  |
| Nitrato X Fo          | 0,55         |         | 0,56                  |
| Nitrato X Wedderburn  | 0,95         |         | -0,16                 |
| Fosfato X Wedderburn  | 0,71         |         | -0,24                 |
| PTD X Wedderburn      | 0,59         |         |                       |
| Nitrato X Richardson  | 0,91         |         |                       |
| PTD X Ri              | 0,40         |         |                       |
| P total X Richardson  | 0,68         |         |                       |
| Nitrito X Fo          |              |         | 0,03                  |
| Nitrito X Wedderburn  |              |         | 0,56                  |
| Nitrito X Richardson  |              |         | 0,57                  |
| Silicato X Wedderburn |              |         | 0,68                  |
| Silicato Richardson   |              |         | 0,66                  |
| Silicato X Fo         |              |         | -0,09                 |



Tabela 23 Correlação fatores internos ao reservatório

|                          | Barra Bonita |           |           | Tucuruí |           |         |   |   | Broa   |           |           |
|--------------------------|--------------|-----------|-----------|---------|-----------|---------|---|---|--------|-----------|-----------|
|                          | RT           | Chu<br>va | Vazã<br>o | RT      | Chu<br>va | Vazão T |   |   | R<br>T | Ch<br>uva | Vento     |
|                          |              |           |           |         |           | t       | v | T |        |           |           |
| Nitrato                  | -0,37        | 0,72      | 0,06      |         |           |         |   |   |        | 0,55      |           |
| Nitrito                  | -0,59        | 0,10      | -0,52     |         |           |         |   |   |        |           |           |
| Amônia                   | -0,43        | 0,03      | -0,53     |         |           |         |   |   |        |           |           |
| P total                  | -0,69        | 0,63      | 0,39      |         | -0,37     |         |   |   |        | 0,44      |           |
| Silicato                 | 0,82         | -0,25     | 0,18      |         |           |         |   |   |        |           |           |
| PTD                      | -0,15        | 0,21      | 0,71      |         |           |         |   |   |        |           |           |
| Nitrogênio total         | -0,24        | 0,08      | 0,24      |         |           |         |   |   |        |           |           |
| PID                      | 0,12         | 0,33      | 0,60      |         |           |         |   |   |        |           |           |
| <i>Cyanophyceae</i>      | 0,14         | 0,01      | 0,48      |         |           |         |   |   |        |           |           |
| <i>Chlorophyceae</i>     | 0,50         | -0,41     | -0,19     |         |           |         |   |   |        | -0,43     | -0,64     |
| <i>Bacillariophyceae</i> | -0,62        | 0,42      | -0,21     |         |           |         |   |   |        |           |           |
| <i>Crysophyceae</i>      | -0,43        | 0,40      | -0,44     |         |           |         |   |   |        | 0,34      | 0,45/0,61 |
| <i>Dinophyceae</i>       | -0,40        | 0,49      | 0,14      |         |           |         |   |   |        |           |           |
| <i>Cryptophyceae</i>     | -0,06        | -0,13     | -0,56     |         |           |         |   |   |        |           |           |
| <i>Fitoflagelado</i>     | 0,27         | 0,03      | 0,66      |         |           |         |   |   |        |           |           |
| <i>Euglenophyceae</i>    | 0,48         | -0,53     | 0,60      |         |           |         |   |   |        |           |           |

Tabela 24 : Correlação Fitoplâncton X números adimensionais

|                          | Fo   | W     | Ri    | Fo | W | Ri<br>LN | Fo    | W     | Ri    |
|--------------------------|------|-------|-------|----|---|----------|-------|-------|-------|
| <i>Cyanophyceae</i>      | 0,39 | -0,29 | -0,32 |    |   | 0,77     | -0,39 | -0,15 | -0,20 |
| <i>Chlorophyceae</i>     | 0,32 | -0,09 | -0,17 |    |   | -0,33    | -0,12 | -0,36 | 0,15  |
| <i>Bacillariophyceae</i> | 0,20 | 0,48  | 0,48  |    |   |          |       |       |       |
| <i>Crysophyceae</i>      | 0,46 | -0,01 | 0,19  |    |   | 0,13     | 0,32  | 0,55  | 0,51  |
| <i>Dinophyceae</i>       | 0,43 | 0,84  | -0,21 |    |   |          |       |       |       |
| <i>Cryptophyceae</i>     | 0,14 | -0,04 | 0,09  |    |   |          |       |       |       |
| <i>Fitoflagelado</i>     | 0,21 | 0,19  | 0,08  |    |   | -0,53    | 0,85  | 0,95  | 0,68  |

Tabela 25 : Índice do Estado Trófico

| Índice do Estado Trófico |              |       |         |       |          |       |
|--------------------------|--------------|-------|---------|-------|----------|-------|
|                          | Barra Bonita |       | Tucuruí |       | Broa     |       |
|                          | Inverno      | Verão | Inverno | Verão | estiagem | Chuva |
| Fósforo total            | 0,99         | 0,94  |         |       |          | 0,91  |
| Clorofila a              | 0,45         | 0,86  | 0,91    |       | 0,93     | 0,91  |
| Nitrogênio total         |              |       | 0,95    |       |          |       |
| zooplankton              | maior        | Menor |         |       |          |       |
| <i>Cyanophyceae</i>      |              |       |         |       |          | maior |
| <i>Pyrrophytas</i>       |              |       |         |       |          | maior |
| <i>Chlorophyceae</i>     |              | Maior |         |       |          | -     |
| <i>Crysophyceae</i>      |              |       |         |       |          | maior |

Fo= Número de Froude; W : número de Wedderburn; Ri: número de Richardson; con. Cal= conteúdo de calor; B= trabalho do vento; S= estabilidade ; RTC = resistência térmica à circulação; RT = tempo de retenção; LN= Lake Number;

A correlação entre os resultados obtidos e os dados de chuva encontra-se na tabela 13, onde existem correlações positivas e significativas entre o tempo de retenção e a concentração de silicato ( $r=0,82$ ) e uma correlação negativa e significativa com as concentrações de nitrito e fosfato total, assumindo valores  $r = -0,59$  e  $-0,68$ , respectivamente. Com relação às precipitações, somente o nitrito e o fosfato tiveram uma correlação positiva e significativa . Os valores de correlações foram 0,72 para o nitrito e 0,62 para o fosfato.

Em Tucuruí, o estudo foi feito com a concentração de clorofila a e nitrogênio total. Os resultados mostraram correlação positiva e significativa nas figuras 106 e 107, com valores de  $r= 0,91$  e  $0,95$ , respectivamente.

Um estudo de correlações relacionou todos os parâmetros estudados considerando-se valores do coeficiente maior do que 0,50 significativos e o uso de modelo linear. Na Barra Bonita, foram resumidos nas tabelas 10 a 14 e nas figuras 93 a 104, de Broa nas Tabelas 15 e 16 Figura 105, e de Tucuruí nas Figuras 106 a 115 e Tabela 17 e 18.

Os nutrientes no reservatório da Barra Bonita apresentam-se de formas diferentes, dependendo do período sazonal. Analisando outros fatores, notou-se que alguns compostos biogeoquímicos demonstraram uma correlação positiva. São eles nitrato X chuva com  $r = 0,72$  ; P total X chuva (0,63); silicato X tempo de retenção (RT) ( 0,82); fosfatos totais dissolvidos (PTD) X vazão (0,71). Outros tiveram uma correlação negativa nitrito X RT (-0,59); nitrito X vazão (-0,52); Amônia X vazão (-0,53); P total X RT (-0,69).

No reservatório de Barra Bonita, a presença de nitrito e P total está ligada às chuvas. Os reservatórios, sendo urbanos, as águas de escoamento e de infiltração levam no corpo do reservatório os nitratos e fosfatos contidos nos fertilizantes utilizados nas plantações de cana-de-açúcar. A permanência dos compostos como silicatos e fosfatos totais dissolvidos (PTD) depende de fatores como tempo de retenção (RT) e vazão, respectivamente, tendo apresentado coeficientes de correlação de 0,82 e 0,71. No período de estiagem, quando se reduz a vazão e aumenta-se o tempo de retenção, aumenta a concentração deste compostos no reservatório. Os compostos P total, PTD, amônia e nitrato tiveram também algumas correlações positivas com o conteúdo de calor, trabalho de vento e a RTC. A correlação não foi significativa com a estabilidade. Os resultados mostraram que, quanto maior a estabilidade, menos disponíveis se tornam os compostos organofosforados. Os resultados mostram que estes compostos disponíveis no fundo do reservatório tornam-se disponíveis com a circulação. Então, quanto mais estável for o reservatório, menos compostos ficam disponíveis e mais qualidade apresenta a água do reservatório. Estes mesmos compostos são trazidos de outras regiões percorridas pelos rios que deságuam no reservatório, razão de sua correlação positiva e significativa com a vazão.

Hidrologicamente, somente os compostos como PTD (fosfato total dissolvido) e PID (fosfato inorgânico dissolvido) tiveram uma correlação positiva e significativa com a vazão total, tendo valores de 0,70 e 0,60. O nitrito e a amônia tiveram uma correlação negativa com  $r = -0,51$  e  $-0,52$ , respectivamente. O parâmetro vazão vertida do reservatório não se mostrou significativo com os parâmetros físicos e químicos estudados. De acordo com De Filippo (1987), a vazão vertida permite controlar o nível do reservatório. Ela não afeta as águas hipolímnicas ricas em nutrientes. Destes estudos, pode-se mencionar que o fosfato e o nitrito aumentam no reservatório quando diminui o tempo de retenção. O fosfato, sendo composto fácil de formar depósitos, torna-se disponível no corpo do reservatório, quando se estabelecem movimentos de turbulência seja por entrada de água ou por circulação completa ou movimentos de turbulência localizados no fundo. Quanto ao nitrito, sua formação está associada à combinação de nitrogênio atmosférico com a disponibilidade de oxigênio dissolvido; no entanto os movimentos criados pelos fenômenos, há pouco referidos, turbulência e circulação, disponibilizam alto teor de oxigênio dissolvido. O silicato, ao contrário, aumenta com o aumento do tempo de retenção em virtude das precipitações. Com relação aos números adimensionais de Wedderburn, Richardson e Froude, os valores na Tabela 8 mostraram a

importância destes fatores na disponibilidade do nitrito, P total no reservatório, apresentando correlações significativas e positivas.

Os compostos PTD, PID, apesar de pequena a quantidade, se fazem presentes no reservatório, conforme o estudo da correlação. Eles estão correlacionados aos números adimensionais Wedderburn e Richardson, apresentando coeficientes bastante significativos para uns e menos para outros (Tabela 8). As entradas exógenas de fosfato contribuem na explosão da quantidade de fitoplâncton no período chuvoso, quando o tempo de retenção for maior de que o seu tempo de duplicação. De acordo com Straškraba e Tundisi( 2000), o ciclo de fósforo é considerado mais crítico na produção orgânica dos reservatórios e mais importantes no processo de eutrofização que o carbono e o nitrogênio, entretanto o fósforo, segundo os mesmos autores, é absorvido pelo fitoplâncton nas camadas superficiais Sua disponibilidade varia e depende das espécies de fósforo orgânico. Este fósforo em grande parte é acumulado em grande quantidade no sedimento.

A respeito da composição biológica, os resultados podem ser vistos na figura 68. Este gráfico mostra que, dependendo da classe de fitoplâncton, sua ocorrência ou abundância depende do período do ano. Os *Cyanophyceae* têm maior ocorrência de janeiro a maio e de julho a setembro, enquanto a ocorrência dos *Bacillariophyceae* é observada de setembro a janeiro e de maio a julho. O *Chlorophyceae* desenvolve-se de abril a julho. No reservatório de Barra Bonita, as principais famílias como *Bacillariophyceae*, *Chlorophyceae* e *Cyanophyceae* ocorrem em períodos diferentes. O *Bacillariophyceae* tem maior ocorrência na primavera e verão, quando as temperaturas se tornam altas e no outono quando diminuem. Esta ocorrência nas duas épocas mostra que a família é composta de espécie diferentes e também está ligada à disponibilidade de PDT e fosfato no períodos de circulação. A espécie oportunista desenvolve-se na primavera e a verdadeira no outono. Pela importância do silicato no desenvolvimento de *Bacillariophyceae*, sua maior reprodução aparece de maio a julho, no outono, quando o silicato se torna elevado. De acordo com Salençon e Thebault (1997), no inverno, a produção é reduzida, principalmente em razão da fraca iluminação. O aumento da luz na primavera permite o desenvolvimento de fitoplâncton. A população é pouco variada e geralmente composta de *Diatomaceae*. O declínio do crescimento na primavera decorre da predação de espécies pelo zooplâncton. O esgotamento de nutrientes e principalmente de silicato, indispensável ao crescimento de *Diatomaceae*, pode ser outra causa de redução da população. O *Diatomaceae* de maior tamanho, dificilmente

digerível pelo zooplâncton, desaparece por sedimentação. No verão, o fitoplâncton é diversificado e geralmente de pequeno tamanho. A grande produção na camada superficial é compensada pela pastagem de zooplâncton, induzindo uma redução da biomassa. No verão, há grande ocorrência de *Cryptophyceae* e *Chrysophyceae*. O *Diatomáceae*, que é dominante na primavera, desaparece e é encontrado no verão e outono, permitindo as algas verdes competir em mais efetivamente com o *Diatomaceae*, que cresce rapidamente em condição de frio no início da primavera.

No outono, a descida da termoclina permite a mistura das águas do hipolimnion ricas em nutrientes com as das camadas de superfície. Graças a esse aporte nutritivo, observa-se um aumento da biomassa do fitoplâncton, cuja composição é variável. Nos dois casos, há uma mudança brusca de temperatura junto com um aumento de suprimento de nutrientes. A mudança brusca cria estresse para os organismos, tendo como consequência a mudança de população no verão. A redução da população após o outono decorre da pastagem, grande mistura, luz reduzida e dias curtos (BONEY, 1983). O *Chlorophyceae* torna-se abundante também de maio a julho, no outono; quando diminui a chuva, alimentam-se de nitrato e fosfato trazido no período de verão em suspensão no corpo do reservatório pela circulação de outono, graças aos movimentos de turbulência, e instabilidade, de Kelvin-Helmholtz. O *bloom* de *Cyanophyceae* ocorre no verão e inverno devido aos nutrientes depositados no verão e inverno e a captação do nitrogênio da atmosfera. Os efeitos de estratificação sobre os microorganismos planctônicos têm grande influência sobre a comunidade planctônica de várias formas; entretanto, de acordo com Yosunori (1992), o desenvolvimento de estratificação térmica indiretamente influencia a produção fotossintética em relação à estrutura física. O gradiente de densidade produzido pela estratificação modifica a sedimentação e a distribuição do seston, inclusive do plâncton. Os *Bacillariophyceae* demonstraram uma correlação positiva e significativa com a estabilidade ( $r = 0,54$ ), os *Dinophyceae* com a estabilidade ( $r = 0,73$ ), a RTC ( $r = 0,54$ ) e W ( $r = 0,83$ ) e *Euglenophyceae* com o trabalho do vento ( $0,57$ ). A análise das correlações com os parâmetros trabalho de vento (B), estabilidade (S), resistência térmica a circulação indicaram que as classes como *Bacillariophyceae*, *Crysophyceae* e *Dinophyceae* são diretamente correlacionadas à RTC do reservatório com coeficientes iguais a 0,5456; 0,5290 e 0,5462, respectivamente. Alguns fitoplânctons demonstraram uma correlação positiva com as características físicas dos reservatórios. *Cryptophyceae* com RTC e a riqueza biológica com a estabilidade. Com relação à estabilidade, somente o

*Bacillariophyceae* e o *Dinophyceae* estão correlacionados, assumindo valores de 0,5680 e 0,7348, respectivamente. O trabalho do vento e o número de Wedderburn foram expressivos na abundância de *Euglenophyceae* e *Dinophyceae*, tendo coeficiente de correlação de 0,5716 e 0,8395, respectivamente. Então, a estabilidade tem uma função primordial na disponibilização dos nutrientes.

Na figura 72, a produção primária e a clorofila ocorrem em abundância, de setembro a maio, correspondendo ao período chuvoso; entretanto, a análise da correlação desses compostos com as componentes chuva, tempo de retenção e vazão total não foram significativas. Então, sua presença decorre do fitoplâncton *Chlorophyceae* ocorrendo no período.

Os zooplânctons apresentaram-se elevados de julho a outubro, período em que os *Bacillariophyceae* são abundantes. Pode-se admitir que os zooplânctons herbívoros consomem exclusivamente microalgas silicatadas. Os carnívoros capturam indiferentemente os copépodos e cladóceros (DUSSART, 1992).

A análise das correlações entre a ocorrência de zooplâncton e os diferentes parâmetros estudados (números adimensionais, fatores físicos) revelaram que somente o trabalho do vento e o número de Wedderburn tiveram uma correlação significativa, podendo estar relacionados às variações nictimerais do zooplâncton na coluna da água, governada pela ação do vento.

O estudo da correlação entre a vazão no reservatório e as precipitações foi significativo, com um coeficiente de correlação de 0,72, mas o estudo IOS e vazão e IOS e precipitações não foram significante, entretanto, conforme Daly (2003), comparando com as variações dos níveis dos rios, concluiu que houve uma redução de volume dos rios nos períodos 1925-26, 1935-36, 1966-67 1979-80, 1983 e 1992, coincidindo com os períodos de ocorrência do El Niño, evidenciando possível influência do fenômeno sobre o regime dos rios. Vários estudos foram desenvolvidos, entre eles os de Marengo (1991, 1992) apud Marengo e Uvo (2003); Marengo e Hastenrath (1993) sobre as variações do nível do rio Negro e na região sul a respeito da influência do El Niño sobre as vazões do rio Paraná (GUETTER, 2003). Também as conseqüências do ENSO (El Niño Oscilação Sul) sobre a ocorrência das precipitações (DALY, 2003) (Figuras 7 e 8). Concluiu-se que as variações dos deflúvios dependem das variações da precipitação, evaporação e dos processos de armazenamento nas escalas secular, interdecadal e dos ciclos de El Niño.

Com relação ao reservatório Carlos Botelho (Lobo-Broa), a análise das Figuras 74 e 75 revela abundância de clorofita no 1º semestre, de janeiro a agosto, e o *Chrysophyta* de junho a novembro, coincidindo com os períodos de inverno/primavera. A figura 77 revela que no mês de junho, houve abundância de *Chlorophyceae* enquanto que em outubro houve abundância de *Zyemaphyceae*, *Chrysophyceae* e *Diatomaceae*.

No reservatório de Broa, sendo raso, a ocorrência de fitoplâncton desenvolveu-se o ano inteiro; no verão durante o período chuvoso, em consequência dos nutrientes trazidos pelos escoamentos, no inverno, durante as passagens de frentes frias e no período de outono e primavera, nos momentos de circulação por densidade e diferença de temperatura que disponibilizam os nutrientes depositados no fundo do reservatório.

Em janeiro, o reservatório apresenta uma abundância de *Chlorophyceae*. A Figura 76 indica que no período de set/out de 1988 que coincide com o ano de La Niña dominaram os *Chrysophyta*, em março de 1989 *Chlorophyta*, em julho/agosto de 1989 *Chrysophyta* e *Cyanophyta*. O fenômeno de La Nina é caracterizado pela seca no sudeste e sul. Em termos de densidades as três classes dominantes foram *Cyanophyta*, *Chrysophyta* e *Chlorophyta* em julho/agosto, coincidindo com o inverno seco em razão do ano do La Niña. Os plânctons adaptados à baixa concentração de nutrientes parecem dominantes durante o verão. No inverno dominam os plânctons, pequenas células que possuem vacúolos. No verão, dominam os fitoplânctons moveis (YASUNORI, 1992).

Este aumento significativo em densidade ou percentual de famílias de fitoplâncton decorre do tempo de retenção mais longo no inverno, da disponibilização de nutriente por mistura da camada hipolímnica durante a descida da termoclina ou na circulação do outono. A composição de fito é primeiramente gerada por perturbações externas. As análises dos compostos biológicos com os números adimensionais deram correlações positivas e significantes entre *Chrysophyceae*, Wedderburn e Richardson; entre fitoflagelados e *Lake Number*, Froude, Wedderburn e Richardson, tendo os respectivos coeficientes 0,55, 0,51, 0,53, 0,85, 0,95 e 0,68.

Distinção clara pode ser feita entre a parte superior rasa do reservatório e a região da barragem com respeito ao desenvolvimento de autotrofia no verão. Na região da barragem, operações vigorosas levam a freqüentes desestabilizações da coluna de água e à predominância de controle físico na sucessão autogenética (REYNOLDS, 1989 APUD MOUSTAKA, 2000).

Uma relação entre temperatura, radiação e crescimento de algas é bem caracterizada, independentemente de outras variáveis ambientais; a sucessão sazonal de

fitoplâncton provavelmente reflete a interação sinérgica entre fatores físicos, químicos e biológicos. Estes resultados estão de acordo com Anderson *et al.* (1994) e Beyruth, 2000). O *diatomaceae* cresce quando a temperatura diminui (BEYRUTH, 2000). A distribuição de comunidades planctônicas no reservatório depende de interação complexa entre fluxo, estabilidade, ciclo de nutriente e uso de energia no processo de fotossíntese. A estrutura da comunidade aquática e sua produtividade depende da interação de suas posições ao longo do gradiente hidrodinâmica e do outro como gradiente hidroquímico (nutriente) (IZAGUIRRE, *et al.*, 2001). Junk *et al.* (1989) admitiram que a descarga do rio é maior fator controlando a biota no lago. De acordo com Izaguirre *et al.* (2001), em inverno, quando o reservatório atinge uma profundidade mínima, observa-se importante ressuspensão de sedimento em virtude da indução pelo vento. O aumento de densidade de fitoplâncton em novembro é influenciado pela alta temperatura e pelo nível médio da água (IZAGUIRRE, *et al.*, 2001).

Com relação aos nutrientes, um estudo das correlações com os dados físicos e números adimensionais demonstrou algumas respostas significativas. Entre eles  $\text{NO}_3$  *versus* conteúdo de calor e trabalho do vento com os respectivos valores de correlação -0,81 e -0,80. O nitrato é formado em condição de oligotrofia quando a água do reservatório está rica em oxigênio. Este composto dissolvido acoplado ao  $\text{NO}_2$  (nitrito) forma o nitrato que precipita. A ação do vento promove uma turbulência de água, aumenta a concentração do oxigênio dissolvido e favorece a redução de  $\text{NO}_3$  por precipitação no sedimento.

$\text{NO}_2$  saída *versus* conteúdo de calor, trabalho do vento, resistência térmica à circulação e  $F_o$  apresentaram os respectivos valores de coeficiente de correlação 0,67, 0,63, 0,55 e 0,56. A formação do nitrito está diretamente correlacionada ao conteúdo de calor, trabalho do vento, estabilidade, números de Wedderburn, de Richardson, tendo valores de  $r = 0,67; 0,62; 0,55; 0,55$  e  $0,56$ . Segundo Straškraba e Tundisi (2000), a nitrificação ( $\text{NH}_3 \Rightarrow \text{NO}_2 \Rightarrow \text{NO}_3$ ) prevalece no hipolímnion rico em oxigênio. A amonificação domina quando há escassez de  $\text{O}_2$ . Este fator aumenta com a energia fornecida pelo vento ou pela radiação solar. Quanto maior esta energia, maior a difusão do nitrogênio atmosférico na água e maior a formação de nitrato.

A presença de nitrito e sólidos totais suspensos (STS) no reservatório é causada por lixiviação, que libera os nutrientes biológicos, estimulando o estado trófico.

O principal resultado do estudo mostrou o desenvolvimento sucessional de comunidade planctônica no reservatório, sujeito ao regime de operação da hidrelétrica,

adicionado ao mecanismo de dinamismo de plâncton. A eutrofização tem sido estudada na ordem de gerenciar os problemas causados pelo crescimento de algas no lago. Vários métodos qualitativos e quantitativos vêm sendo utilizados para esta avaliação, sendo importante o acúmulo de dados e métodos seguros (TUNDISI e MATSUMURA-TUNDISI, 1990). Um dos problemas é determinar os fatores responsáveis pela proliferação de algas. Várias pesquisas demonstraram que o fósforo é as vezes o nutriente limitante no lago (HENRY *et al*, 1984). Assim o aumento de fósforo leva a um aumento quantitativo de fitoplâncton. A relação entre a carga de fósforo e a concentração de clorofila é usada para classificar lagos como oligotróficos ou eutróficos dependendo da concentração de fósforo (OECD, 1982). De acordo com Anneville e Pelletier (2000), a resposta qualitativa de fitoplâncton não é sempre correlacionada com a redução de fósforo. O Índice de Estado Trófico de Carlson (1977) é um dos índices mais utilizados no Brasil para estimar o estado trófico de sistemas aquáticos. Este índice relaciona as concentrações de fosfato total, clorofila e transparência de água para avaliar a situação trófica do ambiente, sem, entretanto, delimitar os estados tróficos. O estudo de correlação e de regressão entre os IET obtidos a partir do modelo de Carlson (1977) (figura 78 a 80) e os parâmetros clorofila nos períodos de outubro, janeiro e junho foram todos significativos com maior significância em janeiro. Brezonick e Kratzer (1981) propuseram critérios para o estabelecimento desses limites, separando os lagos em ultra-oligotrófico, oligotrófico, mesotrófico, eutrófico e hipertrófico. Barbosa (1994) ressaltou ainda que a utilização isolada de parâmetros químicos inorgânicos para identificação do estado trófico pode levar à interpretação errônea em ambiente com elevada biomassa de macrófita, que pode provocar baixa concentração de nutriente na água em virtude da assimilação. Apesar de a produtividade ser primeiramente controlada pelos fatores, como nível de nutrientes, há secundariamente os efeitos de fatores biológicos, como pastagem de zooplâncton. Limnologia e produtividade podem ser também influenciadas pela intervenção humana na forma de atuar com o tipo de agricultura, aplicação de fertilizante acoplado à introdução de espécies (HARPER, 1992). Um estudo das correlações entre a ocorrência dos fitoplânctons com os fatores físicos do reservatório foi possível somente com a temperatura da água quando os valores de  $r^2$  foram bastante significativos, indicando que o desenvolvimento dos fitoplânctons está intimamente ligado à temperatura. A temperatura é a maior força conduzindo a sucessão sazonal de espécies no lago Baikal (Sibéria), como relatam Tammi *et al.*(2000). Outros fatores, incluindo mistura vertical

da coluna de água e pastagem de zooplâncton, podem ter um papel importante (TAMMI *et al.*, 2000). As mudanças sazonais na hidrodinâmica do lago em razão da diferença de temperatura entre o corpo de água e a temperatura da atmosfera, variação na temperatura da água, irradiação e nutrientes, expõem o fitoplâncton a um aumento ou estendido grau de variabilidade no meio ambiente (TAMMI *et al.*, 2000). A suspensão de diatomácea na camada superior do lago requer um regime alimentado por penetração de forças de convecção e ou advecção horizontal, como enfatiza Kelley (1997). Após inúmeros estudos limnológicos realizados por vários autores na represa de Barra Bonita, foi concluído que o reservatório é polimítico com períodos de estratificação ocasionais, principalmente nas regiões mais profundas e protegidas dos ventos, com formação de termoclina de duração limitada (algumas horas). Os períodos de estratificação ocasional variam conforme o tempo de retenção (IETC, 2001). Observou-se ainda um aumento de população ou densidade fitoplanctônica no período de inverno. Nos reservatórios de Barra Bonita e Carlos Botelho (Lobo-Broa), ocorreu uma circulação de outono nos meses de junho e julho, disponibilizando os nutrientes, como fósforo total, nos períodos de estiagem.

Em Barra Bonita, em período de RT elevado, escassez de chuva, baixa insolação, temperatura do ar baixa, velocidade de água moderada, conteúdo de calor, trabalho do vento, estabilidade e RTC baixo, é criada uma situação de circulação do reservatório. Existem correlações positivas entre nitrato, nitrito, fosfato total e PTD, com os números de Wedderburn e Richardson. Segundo Mason (1991), os lagos são classificados em oligotróficos, quando são claros no verão, e eutróficos, quando se tornam turvos na presença de algas. Foi constatado o afloramento de alguns fitoplânctons no período de inverno ( estiagem). A análise de correlação das densidades fitoplanctônicas com o tempo de retenção mostrou correlação positiva com *Chlorophyceae* e correlação negativa com *Bacillariophyceae*; isto, quando aumenta o tempo de retenção, diminui a densidade de *Chlorophyceae*. Os *Bacillariophyceae*, pela estrutura rica em silicato, depositam-se durante o verão onde têm uma certa estabilidade do reservatório, tendo assim uma correlação positiva com a resistência térmica à circulação e à estabilidade. Outras famílias, como *Euglenophyceae* e fitoflagelados, apresentaram correlação positiva com a vazão .Somente o *Dinophyceae* mostrou uma correlação positiva e significativa com o número de Wedderburn.

### 3.9 Representação hipotética dos reservatórios sob a ação dos diferentes fatores estudados

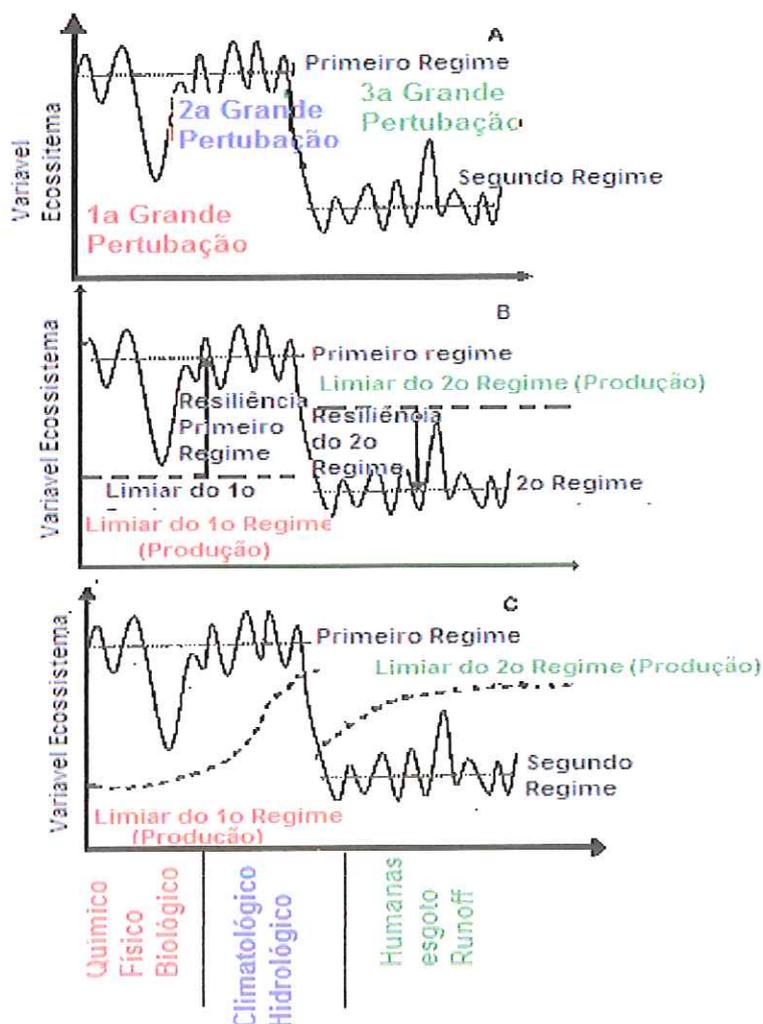


Figura 116 Série de tempo hipotético para um ecossistema sensível às influências químicas, físicas, biológicas, climatológicas, hidrológicas e antrópicas (KINNE, 2003) modificado, mostrando flutuações ao redor de dois regimes de estabilidade em linha pontilhada. (A) efeito de três perturbações física, química, biológica, climatológica e hidrológica; antrópicas associadas aos regimes. (B) mostra a intensidade das perturbações para cada regime; (C) resposta lenta do ecossistema às mudanças em linha tracejada em função do tempo.

( Fonte KINNE, 2003 )

## 4. MODELO TEÓRICO/PRÁTICO DO COMPORTAMENTO DOS RESERVATÓRIOS

Ao longo do período, os reservatórios sofrem ações de fatores físico-químicos em decorrência das entradas e saídas de água por infiltração, vazão turbinada e vertida, uso e ocupação da bacia, disponibilização dos nutrientes por fenômenos de mistura e entrada por infiltração e escoamento superficial. Estas perturbações manifestam-se por

grandes variações de concentração de nutrientes. Em resposta, aumenta o desenvolvimento da produção primária. Dependendo do período do ano, há um crescimento de determinados gêneros. A mistura da coluna de água contribui com a dominância dos gêneros *Aulacoseira*/ *Straurastrum*/ *Satraurodesmus* e *Peridinium* no período frio / seco (HUSZAR *et al.*, 1998)

No lago Vitória, Lung' Ayia *et al.* (2000) constaram um aumento em número de *Diatomaceae* durante os períodos de mistura isotérmica de toda a coluna da água. Os *Cyanophyceae* dominam no epilímnion durante a estratificação térmica, enquanto que *Ceratium brachyceros*, um flagelado, tem uma grande ocorrência no corpo do reservatório. As algas verdes geralmente são repartidas ao longo do ano. Essas mudanças podem ser associadas aos processos climáticos, físicos, químicos e biológicos, junto com as atividades humanas na bacia hidrográfica. Outro período de mudança corresponde à segunda grande perturbação que ocorre no outono e primavera. São causados por fatores climatológicos (temperatura, densidade e vento). O regime neste período apresenta pequenas variações. Durante os períodos de mudanças climáticas, os reservatórios apresentaram uma mistura por densidade ou por temperatura. Segundo Lung' Ayia *et al.* (2000), existe uma correlação entre a turbidez e a distribuição de fitoplâncton durante o período de estiagem. A maioria do reservatório raso apresenta uma turbidez mais elevada do que regiões de ressurgências e profundas. A turbidez é também maior no período chuvoso em consequência das entradas de sedimentos. As espécies relacionadas à turbidez no lago Vitória foram *Ankistrodesmus falcatus*, *Cyclotella ocellata* e *Aulacoseira nyassensis* (LUNG' AYIA *et al.*, 2000).

A terceira perturbação que pode sofrer o reservatório consiste nas entradas clandestinas de esgoto não tratados e *run-off*, podendo provocar uma circulação não tão importante, apesar de causar aumento na produção por difusão ou espalhamento de nutrientes no corpo de água. A análise canônica feita por Lung' Ayia *et al.* (2000) mostrou uma correlação entre a temperatura e a turbidez durante o período chuvoso, mas não o nitrato ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ). Durante o período chuvoso, a concentração de  $\text{SiO}_2$  é elevada. Durante o período chuvoso,  $\text{NO}_3\text{-N}$  tem sido aumentado pelo fator 10, comparado ao valor no período seco. Alta densidade de *Nitzshia ocularis* é observada no lago em setembro (período seco até outubro) e março (início do período chuvoso até maio).

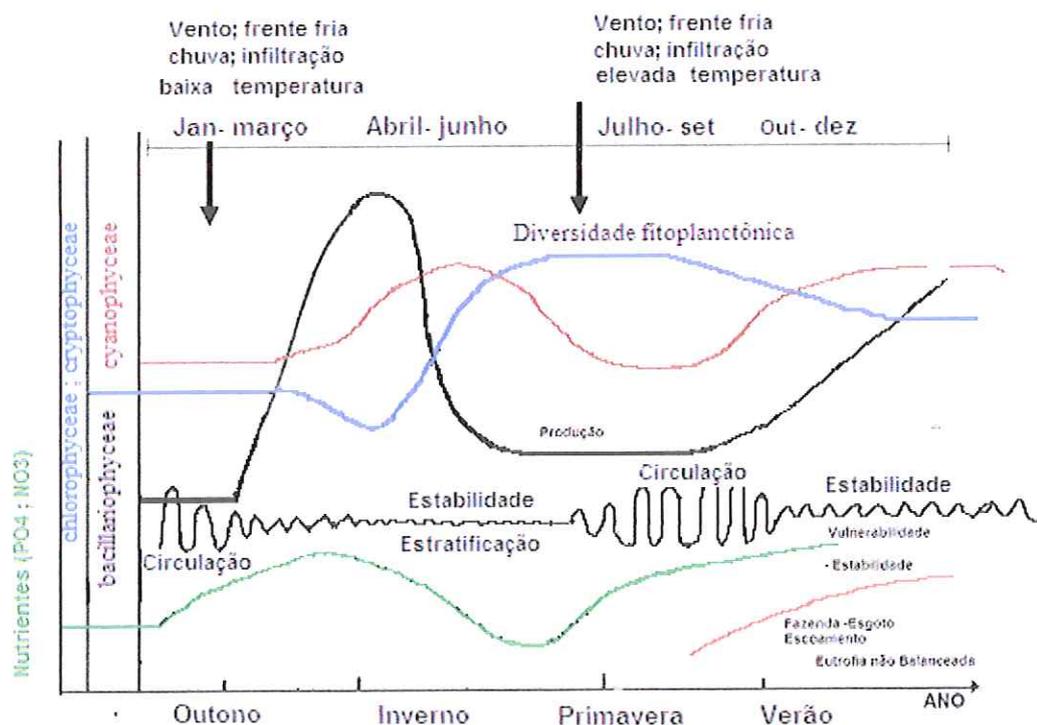


Figura 117 Funcionamento do reservatório da UHE de Barra Bonita ao longo do ano nas diferentes estações, com as respectivas ocorrências das principais famílias de fitoplâncton, os teores de nutrientes e o comportamento por período. (TUNDISI E ROCHA, MODIFICADO.) Modelo conceitual baseado em dados existentes sujeito à alteração Fonte (Tundisi *et al.*, 1999).

#### 4.1 No reservatório da UHE de Barra Bonita

No reservatórios de Barra Bonita uma certa evolução no tempo e estabilidade da qualidade da água são observadas. Os dados coletados e analisados permitiram projetar uma evolução prática do reservatório (Figura 117). No outono e primavera, aumentam os nutrientes. Este aumento é causado pela mistura completa, induzindo o desenvolvimento dos *Bacillariophyceae* (*Aulacoseira itálica* e *Aulacoseira granulata*). Esta mudança não afeta os *Cyanophyceae*. No período de inverno e verão, quando o reservatório se torna estável, diminuem os *Bacillariophyceae*, conseqüência de uma diminuição de nutrientes. Ao contrário, aumentam os *Chlorophyceae*.

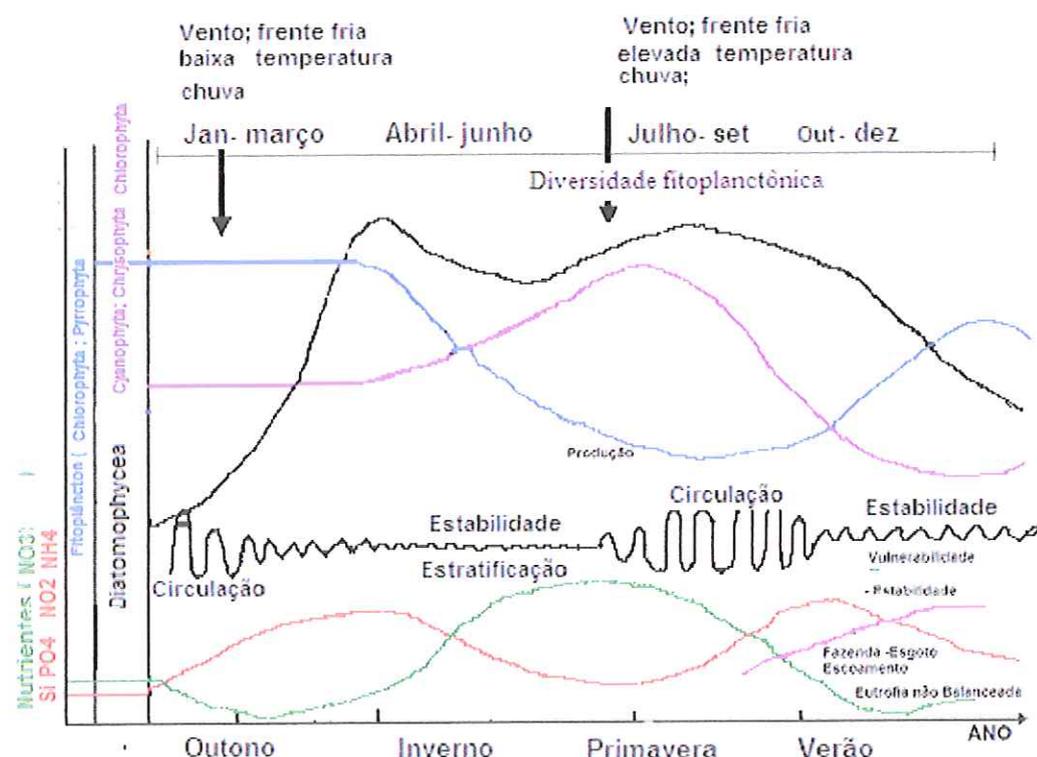


Figura 118 Funcionamento do reservatório da UHE Carlos Botelho (Lobo-Broa) ao longo do ano nas diferentes estações, com as respectivas ocorrências das principais famílias de fitoplâncton, os teores de nutrientes e o comportamento por período. Modelo conceitual baseado em dados existentes sujeito à alteração. Fonte (Tundisi *et al.*, 1988)

#### 4.2 No reservatório da UHE Carlos Botelho (Lobo-Broa)

O modelo desse reservatório encontra-se na Figura 118. Nos períodos de outono e primavera, o reservatório sofre instabilidade, caracterizada pela circulação. O processo disponibiliza o sílica (Si), fósforo (PO<sub>4</sub>), nitrito (NO<sub>2</sub>) e amônia (NH<sub>4</sub>) e reduz o nitrato. Como consequência, favorece o desenvolvimento de *Diatomophyceae*. No inverno e verão, quando o reservatório torna-se estável, os nutrientes (NO<sub>3</sub>) aumentam e diminuem os Si, PO<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> e NH<sub>4</sub>. Notam-se o aumento de *Cyanophyta* e a redução da produção de *Chlorophyta* e *Pyrrophyta*. Um trabalho semelhante realizado por Lima *et al.* (1979) (Figura 119) com *Aulacoseira italica* mostrou que, no outono e primavera, período de maior instabilidade, ocorre aumento de *Aulacoseira italica* e no inverno e verão quando o reservatório apresenta uma certa estabilidade. Acoplado ao vento, o estudo mostrou ventos fortes na primavera, período de circulação em decorrência do vento. No outono, a estabilidade é causada pela redução térmica no período de ventos fracos.

### 4.3 No reservatório da UHE de Tucuruí

Em Tucuruí, o regime é governado pela alternância dos períodos chuvosos e de estiagem. Sendo um reservatório localizado em baixa latitude, próximo do equador, a pressão e a temperatura ao longo do ano sofrem poucas variações. Como consequência, os ventos apresentam fracas intensidades. O reservatório, por ser profundo, e em razão das quantidades de matéria orgânica afogadas durante o enchimento, apresenta nas profundidades uma camada hipolímica anoxia, uma formação de nitrito e liberação de gás. O reservatório então desenvolve um período de alta estabilidade durante os períodos de estiagem e durante o El Niño. Na estação chuvosa ou no período de La Niña, as infiltrações decorrentes da floresta exuberante e os fluxos desenvolvidos pelas águas dos rios provocam uma desestabilização da estrutura sem criar um fenômeno de circulação propriamente dito. Os nutrientes, então, originados da decomposição da floresta afogada e do *run-off* favorecem o fenômeno de assoreamento. Com relação às comunidades fitoplanctônicas, não foi encontrado o registro da sucessão dessas comunidades

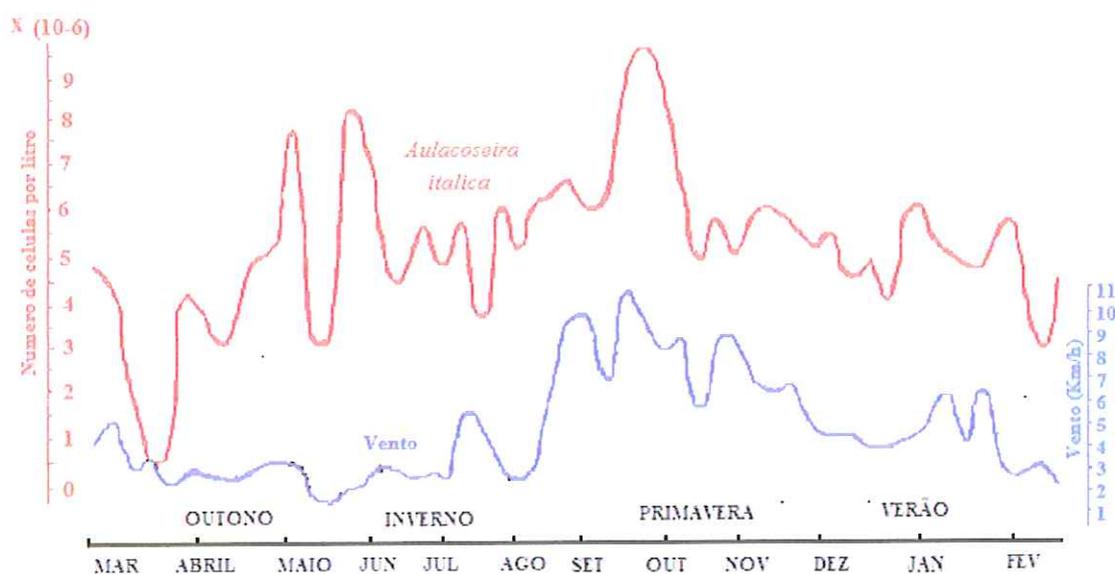


Figura 119 Ciclo sazonal de vento e número de células de *Aulacoseira itálica*, no reservatório da UHE Carlos Botelho, por Lima *et al.* (1978).

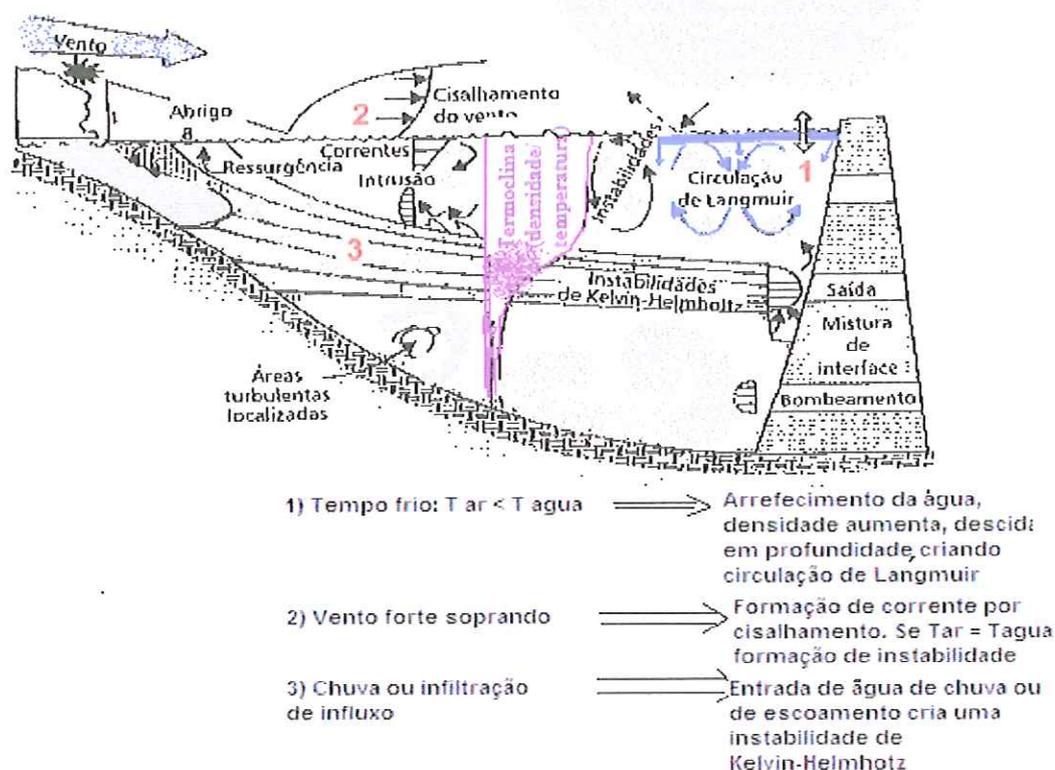


Figura 120 Modelo de reação dos reservatórios aos diferentes fatores externos e internos (Fonte TUNDISI e STRAŠKRABA, 2000).

No Broa, o estudo feito com a clorofila nos períodos de outubro, janeiro e junho estão na Figura 73, 74 e 75. Os coeficientes de determinação e de correlação foram positivos e bastante significativos, tendo valores  $r = 0,69$ ;  $0,91$  e  $0,93$ , respectivamente. Em Tucuruí, o estudo foi feito com a concentração de clorofila e nitrogênio total. A interface água-atmosfera é a sede de trocas permanentes de energia entre os dois meios. O saldo de energia no corpo hídrico resulta dos aportes de calor pela radiação solar e atmosférica, dos aportes por movimentos de turbulência criados pelo vento, das perdas de calor por evaporação, condução térmica e radiação da superfície da água. O perfil térmico é uma resposta do reservatório às variações de temperatura, pressão, entrada e saída de água, distribuição e concentração de partículas dissolvidas e em suspensão. A estrutura física caracterizada pela estratificação ou circulação é o reflexo da resposta da massa de água a todas as variações hidrodinâmicas e climatológicas que sofre o corpo do reservatório. Esta característica tem efeito secundário sobre as taxas metabólicas, a dinâmica das populações e os ciclos biogeoquímicos (WETZEL, 1993).

No reservatório de Barra Bonita, a estrutura física apresentou uma zona de mistura superficial até profundidades variadas de acordo com o período do ano. Essa zona apresenta-se cada vez menos espessa, passando de 16 m no outono para 8 m no inverno, à medida que a temperatura do ar diminui. A variação decorrente de mudança de profundidade da termoclina decorre do fato de que, do outono ao inverno, a temperatura da água, ficando cada vez mais baixa, provoca um deslocamento para o fundo em consequência do aumento da densidade, provocando uma turbulência microscópica chamada de circulação Langmuir (Figura 120). Esses movimentos são convectivos, gravitacionais e erodem a termoclina progressivamente até atingir a mistura completa no inverno. A mudança inicia do final do outono para início de inverno. Torna-se permanente à medida que a temperatura baixa, provocando o mergulho das camadas superficiais e a manifestação de uma mistura vertical por convecção. O processo de mistura é acelerado na presença de ventos fortes. O desencadeamento do processo é iniciado com o aporte de energia de fontes diversas. Sabe-se que as águas de temperatura inferior são mais densas e têm uma tendência a descer, provocando um processo de movimentos de convecção cuja velocidade aumenta com o aporte da energia de fontes diversas como o vento e transferência de energia. Na ausência de vento, a energia acumulada pelo reservatório por meio de seu conteúdo de calor torna-se a principal fonte de energia. No caso de Barra Bonita, a circulação completa ocorreu somente no final do outono, correspondendo à circulação outonal (WETZEL, 1993). Na primavera e verão foram observadas duas termoclinas com aumento da camada de metalímnion, cuja espessura passou de 6 m para 14 m. A temperatura da água elevada, de um lado, e os ventos fracos abaixo de 10 km/s (TUNDISI, *et al.*, 2004), por outro lado, são condições para a formação de uma estrutura estratificada do reservatório. Criam-se duas termoclinas, uma na superfície e outra no fundo (Fig. 27, 31, 33, 35 e 38). A termoclina de superfície formou-se em decorrência da diferença de temperatura entre a atmosfera e a temperatura da água. A energia transportada pelo vento, não sendo suficiente, originou uma camada superficial sede de circulações chamadas de circulação Langmuir e corrente por cisalhamento do vento em superfície. Este calor, de acordo com Wetzel (1993), é o calor do inverno. Então o vento não é considerado responsável, embora esteja envolvido na perda de calor (caso de 12/06/95 Broa). A termoclina de superfície protege o reservatório da perda de calor resultante dos movimentos de turbulências. Outros fatores como variação de densidade e das concentrações de sais no reservatório estão também na origem de modificação da estrutura. Então, nos

reservatórios Carlos Botelho e Barra Bonita, a estratificação é causada também por ação de vento (TUNDISI, *et al.*, 2004) e na maioria por variação de densidade de água.

Difícilmente ocorre a mistura de duas camadas de temperatura e densidade diferentes. No início da primavera, as camadas de superfície tornam-se mais quentes porque recebem energia solar até uma certa profundidade. Há formação de uma ligeira estratificação (termoclina transitória) que limita consideravelmente as trocas verticais. A estrutura da estratificação transitória depende da dinâmica da estação de primavera. Esta estratificação cria uma troca térmica das camadas de superfície e isola as águas de fundo. Ocorre um período de circulação após a estratificação que destrói a termoclina transitória durante episódios de fortes ventos ou de esfriamento, distribuindo esse calor no reservatório inteiro, causando a redução da temperatura de superfície.

A alternância de fase entre estratificação e mistura durante o ciclo diurno é um mecanismo particularmente importante, pois permite na primavera o aquecimento progressivo de camada do fundo. No final da primavera, a energia cinética turbulenta trazida em superfície não é suficiente para chegar a uma mistura do reservatório. A formação de termoclina transitória favorece a formação de uma zona de forte gradiente térmico, denominado termoclina sazonal estável em profundidade. O reservatório, então, apresenta três zonas: uma superficial epilimnion, outra intermediária metalimnion e a terceira no fundo hipolimnion.

A camada do epilimnion apresenta pouca turbulência causada pela descida da água densa e movida pela velocidade baixa do vento (fig 44 de 7/3/96). A termoclina sede de energia cria uma barreira, protegendo os fundos do reservatório contra as turbulências criadas pela transmissão de calor da superfície ao fundo por variação de densidade. Ao longo do processo, o vento de alguns m/s pode atuar no sentido de empurrar a massa líquida do epilimnion para as profundidades, causando o desaparecimento da termoclina por dissipação de energia.

No final do outono, as reduções de temperatura, variações de densidade, redução ou ausência de vento são fatores de desestabilização dos reservatórios.

A penetração das águas de superfície no metalimnion ocorre de forma contínua à medida que o lago vai arrefecendo. Outra forma de estabelecimento de circulação é a erosão progressiva do metalimnion a partir da superfície, pois à medida que o estrato de discontinuidade térmica se reduz, ocorre um aumento da espessura do epilimnion, iniciando assim a circulação de outono. Torna-se evidente que a água quente da superfície é menos densa do que as águas profundas mais frias e que é necessária uma

quantidade de trabalho para misturar a água superior às mais baixas. Nestas situações, ventos de alguns metros por segundo são suficientes para provocar a circulação completa do corpo de água. Este fenômeno explica as circulações de verão quando ocorrerem. No inverno, o processo contrário acontece onde as águas de superfície são mais pesadas. As descidas secedem com ou sem vento, como observado em 20 de junho de 1984, em Barra Bonita. A mais razoável explanação é a variação da temperatura com a profundidade. Quando aumenta o gradiente de densidade, há redução vertical da turbulência, mas, ao mesmo tempo, há formação de movimentos horizontais em virtude da transferência de energia da superfície para as camadas mais baixas. Os movimentos horizontais criados promovem turbulências verticais. É essa a razão de se acreditar que a interação dos processos resulta na forma de observar a distribuição de temperatura. Huchinston (1957) explicou de forma detalhada esse processo, permitindo a compreensão clara da natureza do fenômeno.

No inverno, quando o lago apresenta um perfil isotérmico, o processo de mistura é suficiente para atingir as zonas profundas em razão da densidade da água. A estrutura térmica tem um papel importante na manutenção da estabilidade e a produtividade. Segundo Wetzel (1993), pequenas variações de temperatura da água resultam numa resistência muito fraca à mistura, sendo necessárias apenas pequenas quantidades de energia eólica para misturar toda a coluna de água. Nesse sentido, Tundisi *et al* (2004) argumentaram que a velocidade de apenas 5 a 10 km/h em reservatórios rasos é suficiente para uma mistura. A análise das imagens acopladas aos dados climatológicos mostraram que a mistura completa do reservatório Carlos Botelho (Lobo-Broa) ocorreu em situações diferentes por vários fatores. Em 11 de setembro de 1996, observou-se uma velocidade elevada de vento (14,57 km/h) com chuva de 12,4 mm, uma temperatura do ar de 14,9° C e temperatura da água 18,5° C. Nessas condições, o reservatório de Broa não apresentou circulação completa, apesar da grande velocidade de vento. Como características físicas, o reservatório no referido período apresentou o menor valor de trabalho de vento  $0,836 \text{ g.cm/cm}^2$ , menor resistência térmica à circulação  $3,06 \cdot 10^{-10} \text{ erg}$  e maior estabilidade de  $99,85 \text{ g.cm/cm}^2$ . A diferença de temperatura entre o ar e a água, por um lado, e a diferença entre a temperatura, a densidade da água da chuva e da água de reservatório, de outra parte, criaram uma termoclina empurrada nas profundidades do reservatório pela energia do vento de 14,57 km/h. A energia do reservatório armazenou-se na faixa da termoclina sem dissipação, protegendo o fundo dos movimentos de turbulência. Não houve instabilidade de Kelvin-

Helmhotz. Então, o processo de circulação parcial foi governado pela densidade, temperatura, vento e estabilidade.

De acordo com Huchinston (1957), a mistura da coluna de água é provocada por vários fatores, dependendo do período do ano. Na primavera, a circulação depende de fatores como área superficial, relevo e presença ou ausência de vegetação (WETZEL, 1993). Essa circulação ocorre em curto período. Pode também acontecer pelo aquecimento das águas superficiais, tornando-as menos densas, aumentando a resistência térmica à circulação de modo acentuado, resultando na não-mistura das águas. No verão, as chuvas quentes ou aquecimento do lago ou reservatório pela radiação solar direta ou condução de turbulência por estabelecimento e transferência de correntes de densidade do epilímnion para o metalímnion e hipolímnion são outras causas de mistura completa. A estratificação no reservatório da UHE Carlos Botelho, com menor conteúdo de calor e raso, é criada por turbulência do epilímnion causada por fenômeno de transferência de calor por condução. A redução da temperatura no outono causa uma perda de calor do lago ou reservatório em virtude da presença de frentes frias. Esse arrefecimento da água provoca o afundamento das águas superficiais, misturando-se por um processo de correntes de convecção e circulação epilímnica. O processo torna-se acelerado quando se acopla ao vento. Este processo varia com a morfometria do reservatório e também com as passagens de frentes frias no inverno (julho agosto e setembro) na região Sudeste como afirmaram Stech e Lorenzetti (1992). Segundo Tundisi *et al*, (2004), durante a incidência da frente, o reservatório apresentou mistura vertical em virtude do aumento do estresse de vento e redução da radiação solar. Chalar e Tundisi (1999) argumentaram também que, durante os períodos de dias calmos sem vento, padrões diários de estratificação se desenvolvem. Esses fenômenos podem se manifestar quando a velocidade do vento é suficientemente elevada e se a diferença de temperatura entre o ar e a água for menor. Quando essa diferença é suficientemente grande, como no caso do dia 08/03/96, no reservatório da UHE Carlos Botelho, desenvolve-se uma resistência térmica à circulação que impede a circulação total do reservatório, mesmo com a passagem da frente.

Em 20/06/1984, o reservatório apresentou o menor valor de trabalho de vento, menor valor de estabilidade e menor valor de resistência térmica à circulação. Diante dessas observações, a circulação completa ocorrida na Barra Bonita é uma resposta do reservatório a uma redução da temperatura da água por condução de temperatura baixa

da atmosfera ao reservatório e também por perda de calor do reservatório para a atmosfera.

Esteves (1988), estudando os lagos tropicais, constatou a estratificação e desestratificação diária da coluna da água. Essas formações têm as características de culminar calor, causando o máximo de estabilidade. A desestabilização, várias vezes noturna, é causada pela perda de calor provocada por dissipação do calor armazenada das radiações solares durante o dia para a atmosfera fria da noite; isto é, de um corpo mais quente para outro mais frio. Também segundo Hutchinson (1957), a circulação de água tem três origens: a força de Coriolis, o vento e as correntes de convecção. As duas últimas têm influência decisiva sobre a estrutura térmica de lago pouco profundo.

A mistura vertical requer força mínima para superar a viscosidade no outono, sendo os principais agentes a temperatura e a densidade. No período de redução da temperatura no final do outono, ocorrem variações de temperaturas entre a água e o ar, deixando as águas superficiais mais densas, fontes de movimentos de turbulência e de circulação no reservatório. Essa situação foi observada no dia 20/06/84, no reservatório de Barra Bonita, com circulação completa e velocidade do vento nula. A rapidez da transferência dá-se na presença de vento de alguns m/s, dependendo da profundidade e do tamanho do reservatório como enfatizou Straškraba (1999).

Wetzel (1993) e Salençon e Thebault (1997) afirmaram que entradas e saídas de água de densidade e temperatura diferentes no reservatório são fontes de alteração de estratificação. No reservatório de Tucuruí, observou-se pouca influência de vento. A temperatura da água ao longo do tempo manteve-se próxima da temperatura do ar. Nos meses de janeiro, fevereiro, abril, maio, setembro e outubro, as estruturas foram diferentes das demais em decorrência da infiltração de água de densidade e temperatura diferentes no reservatório de Tucuruí. É a instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Esse fenômeno depende de sua amplitude, influência das características como resistência térmica à circulação, trabalho do vento e estabilidade do reservatório. Em menor grau, causa menor estratificação. A análise dos números adimensionais de Froude mostraram entradas de águas de densidades diferentes além dos números de *Lake number* e Wedderburn, que indicaram a resposta do reservatório às freqüentes turbulências sazonais e diárias nos períodos chuvosos.

Hutchinson (1957) mostrou que as oscilações superficiais, chamadas de seiches, têm como origem os ventos responsáveis pela estratificação e desestratificação dos reservatórios.

A estabilidade, segundo Hunchinson, (1957); Wetzel (1993) e Henry e Barbosa (1989) é a quantidade de trabalho necessária para causar uma mistura completa do reservatório, sem adição ou subtração de calor. Ela persiste nas épocas de ventos fracos (TUNDISI, *et al.*, 2004). O desaparecimento da estratificação térmica acarreta um aumento e diminuição da estabilidade dos ecossistemas aquáticos (HENRY, 1999).

No reservatório de Barra Bonita, no período de setembro de 1983 a agosto de 1984, a estabilidade variou bastante. No verão e outono (março a agosto), o reservatório de Barra Bonita apresentou menor estabilidade em decorrência dos processos de circulações parciais da coluna da água e a localização da termoclina nas profundidades de 18. A redução de temperatura superficial manifesta-se por circulações parciais, provocando a aproximação da termoclina à superfície. A variação brusca da temperatura do ar favoreceu a intensidade dos movimentos de turbulência. Em junho, durante a circulação completa, a estabilidade tornou-se nula. A maior estabilidade foi registrada em janeiro, com  $649,63 \text{ g.cm/cm}^2$  sob velocidade de vento de  $1,19 \text{ km/h}$  em pleno verão. Em Tucuruí, a maior estabilidade foi de  $341,2 \text{ g.cm/cm}^2$ , em novembro, e no Broa, ela foi de  $99,85 \text{ g.cm/cm}^2$ , em setembro, a uma velocidade de vento de  $14,57 \text{ km/h}$ . Durante os períodos mais quentes do ano, as águas superficiais são aquecidas mais rapidamente do que se dá a distribuição do calor por mistura da água. À medida que a água superficial aquece, ela se torna menos densa. Mais tarde, o calor da superfície resulta em pequeno gradiente de temperatura próxima à superfície. Esse calor é difundido nas profundidades da água, causando o aumento da temperatura. A homogeneidade desse lago no verão é obtida pelo esfriamento do epilimnion (TUNDISI, 1981; TUNDISI e MATSUMURA- TUNDISI, 1988)

Diante destes resultados, a estabilidade depende de vários fatores, entre os quais parâmetros como a climatologia, temperatura e densidade, que variam de acordo com a estação do ano. A velocidade de vento contribuiu como agente de desestabilização dos reservatórios. Sua ação é completada por outros fatores. Então, o vento não é o principal agente. No reservatório de Barra Bonita, a desestabilização observada no mês de junho ocorreu sem vento apesar de, na maioria dos casos, ela ter sido acoplada à passagem de frentes frias (TUNDISI, 2004) e de velocidade de vento de alguns m/s, como menciona Wetzel (1993). A estabilidade é alterada também por aumento de velocidade em razão da diferença crítica na camada intermediária por entrada de água de temperatura e densidade diferentes. Estas variações e entradas formam perturbação e remoinhos

durante períodos de instabilidade (MORTINER, 1974 apud WETZEL, 1993; SMITH, 1975).

Durante estas modificações estruturais, o reservatório respondeu desenvolvendo uma resistência térmica à circulação (RTC) para qualquer variação de temperatura e densidade. Os padrões resultantes do conteúdo de calor, da estratificação por temperatura e por densidade, influenciam as propriedades físicas e químicas e também os ciclos dos lagos e, conseqüentemente, governam a produtividade e decomposição de matérias orgânicas. Barbosa (1981), comparando os lagos naturais de Carioca e Dom Helvécio, concluiu que a estrutura térmica controla todos os processos biológicos e químicos, e que o lago Carioca, mais raso, tem mistura mais efetiva de que o lago Dom Helvécio e também tem maior produtividade de fitoplâncton no inverno do que no verão. Nos reservatórios Carlos Botelho e Barra Bonita, o conteúdo de calor apresentou valores menores no inverno e maiores no verão. No reservatório de Tucuruí, localizado a 3° de latitude abaixo do equador, tem um conteúdo de calor que passou por grandes flutuações por causa dos regimes de variação da temperatura do ar (STRAŠKRABA, *et al.*, 1993).

O conteúdo de calor não mostra flutuação entre os meses, como observado para o lago Valência (LEWIS, 1983). Embora as variações anuais de conteúdo de calor no corpo de água dependam da área, do volume e profundidade média, como se refere Gorham (1964), os parâmetros como a morfometria, fator climático, variações de temperatura devido ao tempo nublado e ao dia de chuva e a ação do vento também influenciam na distribuição do conteúdo de calor do lago. O calor pode ser transmitido via precipitação, escoamento superficial e entrada de água subterrânea. O reservatório Carlos Botelho (Broa), menor em tamanho e volume, desenvolveu maior resistência térmica à circulação, pois mais sensível à ação dos ventos. Esta reação do reservatório é governada pelas densidades da água que determinam toda a dinâmica física e química dos lagos. Pequenas variações de densidade são altamente significativas. A mistura das águas em densidade e temperatura homogêneas necessita de trabalho físico para misturar 2 fluxos de densidade diferentes, sendo a quantidade de energia necessária proporcional à diferença de densidade.

## 5 Gerenciamento de reservatórios

Os reservatórios, de acordo com Straškraba *et al.*, (1993) apud Tundisi (1999), foram construídos com objetivos ecológicos, controlando as enchentes, e para uso em abastecimento dos seres vivos e na indústria. Hoje são construídos para a produção hidrelétrica. Em todos os casos, a qualidade é de extrema importância. Este estado varia em função de vários fatores: fatores externos, entre eles climatológicos e humanos, e fatores internos, como morfometria. Com relação aos fatores climatológicos, os reservatórios apresentaram situações diferentes em função do período do ano e latitude (STRAŠKRABA, 1999). No verão e inverno, os reservatórios estudados- Lobo-Broa e Barra Bonita- caracterizados como rasos, apresentaram-se estáveis em virtude do vento fraco, com pequenas variações de temperatura. Este estudo mostrou também uma proliferação de alguns gêneros de algas, como *Bacillariophyceae* e *Cyanophyceae*, na Barra Bonita e, em Carlos Botelho, em razão do aumento dos nutrientes, como Si, PO<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>. O processo é governado pela redução de temperatura e aumento de pressão no outono ou aumento de temperatura e redução de pressão na primavera. Este processo torna-se acelerado com a participação do vento. Como consequência, a temperatura da coluna de água, distribuição das partículas dissolvidas e em suspensão, apresentam-se de maneira homogênea. Não há divisão do reservatório em compartimento. Os nutrientes depositados tornam-se disponíveis pelo revolvimento do fundo do reservatório. A água fica turva, rica em nutrientes, como Si, PO<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> (Carlos Botelho). Na Barra Bonita, há disponibilidade de PO<sub>4</sub> e NO<sub>3</sub>. As algas, como *Cyanophyta* e *Chrysophyta*, desenvolvem-se rapidamente no reservatório Carlos Botelho e na Barra Bonita somente o *Chlorophyceae* e *Cryptophyceae*. Para uso humano, os *Cyanophyceae*, apresentando um efeito tóxico de acordo com a espécie, podem comprometer o uso do reservatório Carlos Botelho na primavera, quando aumenta a densidade. No verão, a densidade, sendo baixa, deixa o reservatório em boas condições para o abastecimento e lazer. Na Barra Bonita, ao contrário, os usos são comprometidos pelo *Cyanophyceae* no inverno e verão. Outro aspecto é a formação de “Greenhouse,” formado após a passagem da água pela turbinas, como diz Fearnside (1997). Pelo funcionamento, a vazão vertida controla o volume, nível do reservatório por abertura e fechamento dos vertedouros, enquanto que a vazão turbinada capta as águas anóxicas do fundo do reservatório e descarrega a jusante, podendo causar mortalidade de peixes, comprometendo o uso para diversas finalidades. Na Barra Bonita, a vazão vertida manifestou uma correlação negativa com a diversidade

fitoplanctônica e uma correlação positiva com os nutrientes, como fósforo total e fósforo total dissolvido. Esta correlação positiva com os fósforos decorre do transporte pela chuva, por escoamento superficial. A vazão vertida, então, reduz quantitativamente a concentração de nutrientes, enquanto que é inversamente proporcional ao crescimento da diversidade fitoplanctônica. O estudo mostrou ainda que, na Barra Bonita, os nutrientes fósforo total, fósforo total dissolvido e nitrato são diretamente correlacionados às características, como conteúdo de calor, trabalho do vento, estabilidade e resistência térmica à circulação, enquanto que na UHE Carlos Botelho são os nitritos e silicatos que apresentam uma correlação positiva com o conteúdo de calor, trabalho do vento e estabilidade. Os outros componentes não mostram uma correlação positiva com a estabilidade. Por analogia, deverão apresentar com a circulação do reservatório ou os períodos de instabilidade uma correlação positiva. Entre eles podemos distinguir a produção primária, a clorofila, o nitrito, a amônia, a densidade fitoplanctônica e o silicato. Esta relação justifica a maior ocorrência de algumas famílias, como os *Bacillariophyceae*. Então, o agrupamento de organismos, a composição das comunidades, a sucessão em período de tempo das comunidades planctônicas, os processos de produção primária fitoplanctônica e reciclagem e ciclos biogeoquímicos dependem do sistema de circulação vertical e horizontal do reservatório.

A compreensão dos mecanismos de funcionamento dos sistemas aquáticos estudados é complexa em razão da interdependência dos fatores físicos, químicos, biológicos e pela interação com a bacia hidrográfica e a climatologia como função de força. A qualidade e quantidade da água tornam-se uma preocupação maior em razão dos esforços e necessidades para abastecimento público, saneamento e outros fins. Levando então em consideração o fato de que a despoluição dos lagos demanda alto investimento, o desafio atual é calcular os custos de recuperação de sistemas aquáticos degradados e produzir tecnologia e novas iniciativas institucionais para baixar os custos (TUNDISI, 2003). Os aspectos gerais desse planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos superficiais para uma política pública consistem em identificar a procedência da eutrofização e ampliar a informação sobre o fenômeno para o público em geral e as autoridades. Uma das ações imediatas é o monitoramento biológico que deve contemplar a classificação das algas às flutuações das espécies no espaço e no tempo, a identificação das épocas favoráveis aos florescimentos e a concentração de toxinas na água, causando uma degradação dos sistemas aquáticos e da qualidade da água em decorrência da repercussão dos diversos fatores em interação sobre o reservatório.

Como conseqüências, uma série de impactos econômicos, tais como o aumento muito rápido dos custos de tratamento, em decorrência dos efeitos tóxicos, podem ser considerados perdas econômicas, como a duplicação dos custos de tratamento da água para conseguir a potabilidade.

Na identificação das fontes de eutrofização, observou-se que os estudos das correlações entre a estabilidade e os nutrientes demonstraram uma correlação significativa e positiva com o silicato e nitrato no reservatório de hidrelétrica Carlos Botelho e fósforo total dissolvido na UHE da Barra Bonita nos períodos de circulação, nos reservatórios rasos da UHE Carlos Botelho e de Barra Bonita. Os nutrientes fósforo, nitrato, silicato e matéria orgânica depositados nos fundos dos reservatórios se tornam suspensos no corpo do reservatório nos períodos de transição entre o outono e inverno e primavera-verão, períodos caracterizados por ventos fortes e mudança de temperatura da atmosfera. Nesse período a suspensão de matéria orgânica e de metais pesados favorece o desenvolvimento das diatomáceas. Após a passagem das frentes, os nutrientes dissolvidos e suspensos como fósforo, nitrato tornam-se disponíveis para os organismos planctônicos como cianofíceas e *Chlorophyceae* causando a eutrofização em decorrência de *bloom* formado pelo crescimento acelerado destas algas. Então, dependendo do período, pode ocorrer o crescimento de microalgas com propriedades tóxicas como *Microcystis sp* para os seres vivos.

## 6. CONCLUSÃO

Deste estudo das repercussões dos fatores climatológicos e hidrológicos sobre a limnologia dos reservatórios podem ser extraídas as seguintes conclusões.

1- A qualidade da água do reservatório depende da interação de vários fatores internos: morfométricos, físicos conteúdo de calor, trabalho do vento, estabilidade; e climatológicos externos: a época do ano, temperatura, pressão. Este fator tem uma grande variabilidade na Barra Bonita e Carlos Botelho e pequeno para Tucuruí.

2- Os reservatórios rasos de latitudes mais elevadas apresentam estrutura estratificada no período de verão, quando a água não apresenta uma riqueza em nutrientes, podendo não favorecer o *bloom* de organismos fitoplanctônicos comprometendo a sua qualidade.

3- Do outono à primavera, quando inicia a instabilidade, a estrutura dos reservatórios rasos é influenciada por vários fenômenos: o esfriamento da temperatura, as diferenças de densidade entre as camadas da coluna da água, as entradas e saídas de

água por infiltração ou influxo, as chuvas e os fenômenos de El Niño e La Niña (apesar de não ter apresentado correlação significativa) provocando a circulação.

4- Estes processos são acelerados quando ocorrerem junto com o vento que não constitui o principal fator de circulação, em reservatórios profundos (> 30m).

5- O processo de circulação se torna efetivo, completo, quando a diferença de densidade entre a atmosfera e a água é bastante considerável.

6- Há ocorrência de *Bacillariophyceae* quando há instabilidade provocada por baixa temperatura e ventos. O desenvolvimento de duas espécies diferentes em estações diferentes indica a ocorrência de espécies oportunistas.

7- Na UHE, Carlos Botelho e na Barra Bonita, a desestratificação é causada também por ação de vento e na maioria dos casos por aporte de água de densidade distinta.

8- A circulação completa durante alguns períodos ocorrida na Barra Bonita é uma resposta do reservatório a uma redução da temperatura da água por condução de temperatura baixa da atmosfera ao reservatório e também por perda de calor do reservatório para a atmosfera. Em outros períodos, há um efeito do vento na circulação

9- Os resultados mostraram que, quanto maior a estabilidade, menos disponíveis se tornam os compostos organofosforados e que estes compostos disponíveis no fundo do reservatório tornam-se disponíveis com a circulação. Então, quanto mais estável for o reservatório, menos compostos ficam disponíveis e melhor qualidade apresenta a água do reservatório.

10- Então, quanto mais estável for o reservatório, melhor é a qualidade da água no epilimnion em decorrência da decantação dos metais pesados e substâncias tóxicas. Ficam em suspensão os nutrientes dissolvidos, como fósforo e nitrogênio. Portanto a estabilidade tem uma função primordial na disponibilidade dos nutrientes. A qualidade da água então será proporcional ao tempo de instabilidade (velocidade de vento, tempo de permanência de baixas temperaturas, duração de diferenças notáveis de temperaturas, e tempo de passagem da frente). Em períodos de instabilidade por ação de ventos ou por resfriamento térmico, a qualidade da água fica comprometida em toda a coluna.

11- Os reservatórios de latitudes mais altas e rasos são sensíveis aos agentes climatológicos

## 7- RECOMENDAÇÕES

1. Para tornar mais práticas as pesquisas na área da limnologia recomenda-se mais trabalho de integração entre os diferentes campos limnológicos.

2. Para maior conhecimento da influência dos parâmetros físicos, biológicos e climatológicos sobre a estrutura dos reservatórios recomenda-se coletas contínuas de dados para o registro dos diferentes fenômenos passageiros que ocorrem sem ser percebidos durante as coletas e que, por sinal, têm grande influência sobre os reservatórios.

3. Desenvolver mais pesquisas com a finalidade de atualizar os dados sobre alguns reservatórios, como Tucuruí.

4. Fazer uma ecobatimetria dos reservatórios.

5. Os trabalhos publicados devem deixar em anexo os bancos de dados originais para eventuais consultas e especificar os métodos utilizados para efetuar as coletas, reduzindo os erros.

6. Estudos mais detalhados sobre a circulação e hidrodinâmica dos reservatórios podem esclarecer os mecanismos de respostas às funções de forças externas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANNEVILLE, O. PELLETIER, J.P. (2000). Recovery of lake Geneva from eutrophication: quantitative response of phytoplankton. *Arch hydrobiol.* Stuttgart, 148(4) 607-624.
- ARMENGOL, J.; GARCIA, J.C.; COMERMA, M.; ROMERO, M.; DOLZ, J.; ROURA, M.; HAN, B. H.; WDAL, A. SIMEK, K. (1999). Longitudinal Processes in Canyon Type Reservoir: The case of Sau (N.E. Spain). In: Tundisi J.; G.; Straskraba, M. *Theoretical Reservoir Ecology and its Applications São Carlos- Brazil.* p. 313-345.
- ANDERSON, A.; HAECKY P.; HAGSTRÖM, A. (1994). Effect of temperature and light on the growth of micro-nano-and pico-plancton: impact on algal succession. *Marine Biology*, 120, 511-520.
- ANEEL (2002). *Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos.* Brasília. 327.
- BARBOSA, F.A.R. (1981). Variações diurnas de parâmetros limnológicos básicos e da produtividade primária do fitoplâncton na lagoa Carioca –Parque florestal do Rio Doce-MG- Brasil . PHD. Thesis UFSC.
- \_\_\_\_\_. (1994). Why a Brazilian program on conservation management of aquatic ecosystem? *Acta limnol. Bras.* , 5: 13-18.
- BEYRUTH, Z. (2000). Periodic disturbances, trophic gradient and phytoplankton characteristics related to cyanobacterial growth in Guarapiranga reservoir, São Paulo State, Brazil. *Hydrobiologia.* 424: 51-65.
- BIRGE, E. A. (1916). The work of the Wind in warming a lake. *Trans. Wisconsin Acad. Sci. Arts Let* 18: 341-391.
- BITAR, O .Y.; MÍDEA, N. F.; KERTZMAN, F. F. (1991). Caracterização geral do meio físico da bacia do Médio Tietê. Programa de Combate à erosão do Instituto de Pesquisas Tecnológicas e Departamento de águas e Energia Elétrica. Mapas

pedológicas, numero 03. Mapa de ocupação do solo, número 99. São Paulo, v 1/ São Paulo.v1.

BONEY, A. D.D. (1983). *Phytoplankton*. Ed Edward Arnold. 116p

CALIJURI, M.C.; TUNDISI, J. G. (1990). Limnologia comparada das Represas do Lobo (Broa) e Barra Bonita-Estado de São Paulo: mecanismos de funcionamento e bases para o gerenciamento. *Revista Brasileira Biologia*, Rio de Janeiro, 50 (4), 893-913.

CALIJURI, M.C.; OLIVEIRA, M.D. (1996). Estimate of the Rate of Prime Production in Two lotic system, based on only change of dissolved oxygen Itaqueri and Lobo River (São Paulo State) *An. Acad. Bras. Ci*, 68 (1) 103- 111.

CALIJURI, M.C. (1999). *Comunidade fitoplanctônica em reservatórios tropical (Barra Bonita)*. São Paulo Tese de livre docência. 21p.

CARLSON, R.E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.*(22): p. 361-380.

CHALAR, G.; TUNDISI, J.G. (1999). Main Processes In The water column determined by wind and rainfall at Lobo (BROA) reservoir. Implication for Phosphorus cycling. In: Tundisi, J. G.; Straskraba, M. *Theoretical Reservoir Ecology and its Applications*. São Carlos- Brazil. p.53-65.

CHALAR, G.; TUNDISI, J. G. (2001). Phosphorus Fractions and Fluxes in the column and sediments of a Tropical Reservoir (Lobo-Broa-SP). *Internat Ver. Hydrobiot* (86) 2; 183-194.

CHAVES, P. (2002). Planning operation of storage reservoir for water quantity and quality. Master's thesis 150p. Tokyo.

CHU, P.S. (1985). A contribution to upper-air climatology of tropical South America. *Journal of Climatology*. Vol 5, 403-416.

CHU, P. S.; YU, P.; HASTENRATH, S. (1995). Detecting climate change concurrent with deforestation in the Amazon basin: which way has it gone? *Bull. Amer. Met. Soc.*, 75, 579-583.

CLIMANALISE (1993). Boletim de monitoramento e Análise climática. vol 8 (5). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (Cptec). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).(2003). Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliensp10a/mudanca.html>>. Acesso em: 20 mai.

COLE, G. (1975). *Textbook of limnology*. C. V. Mosby Company, Toronto. 401 p.

CENTRO DE PREVISÃO CLIMÁTICA(NCEP) -2003. (2004). Impacto do fenômeno do El Niño. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 14 fev.

DALY, J. (2003). Índice de Oscilação Sul (IOS) Disponível em: <[http://www.john\\_daly.com/](http://www.john_daly.com/)> Acesso em: 9 set.

OCORRÊNCIA DOS FENÔMENOS DO EL NIÑO /LA NIÑA (2004). Disponível em: <[www.org.uy/ph/libros/enso/guyot.htm](http://www.org.uy/ph/libros/enso/guyot.htm)> Acesso em: 14 de fev.

DE FILIPPO, R. (1987). *Ciclo sazonal do fitoplâncton, fatores climáticos e hidrológicos na represa de Barra Bonita*. São Paulo. Dissertação –UFSC. 150p

DUARTE, M.A.C.; CEBALLOS, B.S.O.; KONIG, A.; DE SOUZA, M.H.N.; DE ARAUJO, J.A.H. (2001). Índice de Estado Trófico fr Carlson (IET) Aplicado em corpo aquático lentic do Nordeste do Brasil. In: Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária y Ambiental, 16, 1998 AIDIS Peru. Disponível em:

<<http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/aguabas/eliflu/eliflu.htm>>. Acesso em: 02 jun.

DUSSART, B. (1992). *Limnologie : l'étude des eaux continentais*. 2ª Ed Boubée e Cie 680p.

ELLIOTT, J. A.; REINOLDS, C.S.; IRISH, H. E. (2001). An investigation of dominance in phytoplankton using the PROTECH model. *Freshwater Biology*. 46; 99-108.

EMBRAPA (2002). Imagem de satélite. Disponível em: <<http://www.embrapa.br>>. Acesso em: 10 jul.

ESTEVES, F.A. (1988). Considerações sobre a aplicação da tipologia de lagos temperados a lagos tropicais. *Acta Limno. Brás.*(2): 3-28.

FEARNSIDE, P.M. (1997). Greenhouse-gas emissions from Amazonian hydroelectric reservoir. The example of Brazil's Tucuruí Dam as compared to fossil fuel alternatives. *Environmental conservation*. 24(1) 64-75.

GORHAM, E. (1964). Morphometric control of animal heat budgets in temperate lakes. *Limnol. Ocean* (9):525-529.

GUETTER, A. K. (2003). Associação entre vazão no rio Paraná e o el Niño. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliensp10a/mudanca.html>>. Acesso em 20 mai.

GUYOT, J. L.; CALLIDE, J.; MOLINIER, M. (2003). La variabilité hydrologique actuelle dans le bassin de l'Amazonie. Disponível em: <<http://www.unesco.org/uy/phi/lobros/enso/guyot.html>>. Acesso em: 20 mar.

- HARRISON, P. J.; HU, M. H.; YANG, Y.P.; LU, X. (1990). Phosphate limitation in estuarine and costal waters of China J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 140, 79-87.
- HARPER, D. (1992). *Eutrophication of freshwaters: principles, problems and restoration*. Ed Capman & Hall. 325p
- HASTENRATH, S.; GREISCHAR, L. (1993). Circulation mechanisms related to Northeast Brazil rainfall anomalies. J. Geophys. Res (Atmos) (98), 5093-5102.
- HENRY, R.; TUNDISI, J. G.; CURI, P.R. (1984). Effect of phosphorus and nitrogen enrichment on the phytoplankton in a tropical reservoir (Lobo Reservoir, Brazil). *Hydrobiologia*, 118; 177-185.
- HENRY, R.; BARBOSA, F.A.R. (1989). Thermal structure heat content and stability of tow lakes in the National Park of Rio Doce Valley (MG). *Hydrobiologia* . 171: 189-199.
- HENRY, R. *et al.* (1997). Addition of phosphate and Ammonia and their effects on primary productivity by phytoplankton of Lake Dom Helvécio In: Tundisi, J. & Saijo Y. *Limnological studies on the Rio Doce Valley Lakes*. Brasil. p.391-397.
- HENRY, R. A (2004) A variabilidade de alguns fatores físicos e químicos da água e implicações para amostragem : estudos de cas0os em quatros represas do estado de São Paulo . In Bicudo , C e Denise de C. B . Amostragem em Limnologia . São Carlos : Rima , 245-262.
- HENRY, R. (1999a). Ecologia de reservatórios: estrutura, função e aspectos sociais. FAPESP fundbio. Botucatu, São Paulo. 800 p.
- \_\_\_\_\_. (1999b). Thermal Regime and oxygen Patterns in reservoirs. In: TUNDISI *Theoretical Reservoir ecology and its Application*. São Carlos, Brasil. p. 125-151
- HINO, K. (1979). *Análise qualitativa e quantitativa do microfitoplâncton da represa do Lobo (Broa)*. São Carlos- SP Biss – PPG/ CRHEA, 119p.

- HUTCHINSON, G. E. (1957). A treatise on limnology. Vol 1, *Geography, Physics and Chemistry*. John Wiley and Sons. Inc, New York, 1015pp.
- HUSZAR, V. L. M.; SILVA, L. H. S.; DOMINGOS, P.; MARINHO, M.; MELO, S. (1998). Phytoplankton species composition is more sensitive than O E C D criteria to Trophic Status of 3 Brazilian Tropical Lola. *Hydrobiology* 369/370, 59-71
- IETC: *Planejamento e gerenciamento de Lagos e reservatórios: uma abordagem integrada ao problema de eutrofização*.(2001). Serie de publicações técnicas. IIE, Proágua, Unesco, ANA.385 p.
- IMBERGER, J.; PATTERSON, J. (1989). A dynamic reservoir simulation model: DYRESM 5-in : Fischer, H.B. (ed): *Transport Models for Inland Coastal Water*: 310-361- Academic Press, New York.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) (1991) censo de 1990.
- IZAGUIRRE, I.; O'FARRELL, I.; TELL, G. (2001). Variação in phytoplankton composition and limnological features in a water-water ecotone of the lower Paraná Bassin (Argentina). *Freshwater Biology*. 46, 63-74.
- JUNK, W.J.; BAYLEY, P.B.; SPARKS, R.E. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain system. In.: *Proceedings of International Large river Symposium, Canadian Special publications in Fisheries and Aquatic Sciences* Vol 106; 110-127.
- KELLEY, D.E. (1997). Convention in ice-covered lakes: effect on algal suspension. *Journal of Plankton Research*, 19, 1859-1880.
- KENNEDY, R. & WALKER, A, W. (1990). Reservoir nutrient dynamics.. In: Thornton, K. W.; Kimmel, B.L & Payne, F.E. (eds). *Reservoir Limnology. Ecological Perspective*, John Wiley & Sons, Inc, NY .p. 109-131.
- KIMMEL, B. L.; LIN, O. T.; PAULSON, L. (1990). Reservoir Primary Production. In

- Thornton, K. W.; Kimmel, B.L & Payne, F.E. (eds). *Reservoir Limnology. Ecological Perspective*, John Wiley & Sons, Inc., NY. p. 133-194.
- KINNE, O. (2003). *Prevalence and importance of regime shifts in: Excellence in Ecology*. Ed Kinne O. (15) 5-54.
- KOUSKY, V.; KAGANO.; M., CAVALCANTI, I.F.A. (1984). A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies, *Tellus*, 36<sup>a</sup>, 490-504.
- KRATZER, C. R. e BREZONIK, P.L.A. (1981). A Carlson type tropic state index for nitrogen in Florida Lakes. *Water Res. Bul.*, 17: 713-714.
- LEWIS, W. M. Jr. (1983). Temperature, heat and mixing in lake Valencia, Venezuela. *Limnol. Oceanogr.* 28: 273-286.
- LIMA, W.C.; TUNDISI, J.G.; MARTINS, M. O. (1978). A systemic approach to the sensitivity of *Melosina italica* (Her) Kurtz. *Rev bras. Biol.* 39(3): 559-563.
- LUNG'AYIA, H.B.O., M'HARZ, A., TACKX, M., GICHUKI, J., SYMOENS, J.J. (2000). Phytoplankton community structure and environment in the Kenyan waters of Lake Victoria. *Freshwater Biology*, 43, 523-543.
- MARENGO, J. A.; HASTENRATH, S. (1993). Case Studies of extrem climatic events in the Amazon Basin. *journal of Climate*, 65: 617-627.
- MARENGO, J. A.; UVO,C.B. (2003). Variabilidade e mudanças climáticas no Brasil e América do sul. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliensp10a/mudanca.html>>. Acesso em: 20 mai.
- MATHEUS, C.E.; TUNDISI, J.G. (1988). Estudo físico-químico e ecológico dos rios da bacia hidrográfica do Ribeirão e Represa do Lobo (Broa). In: Tundisi, J.G. (ed)

*Limnologia e manejo de represas*. São Carlos EESC-USP (CRHEA/ACIE-SP) Vol 1 Tomo I. ( serie Monografia em Limnologia).

MATSUMURA-TUNDISI, T.; RIETZLER, A .C.; TUNDISI, J. G. (1989). Biomass (dry weight and carbon content) of plankton crustacea from Broa Reservoir (São Carlos, São Paulo, Brazil) and its fluctuation across one year. *Hydrobiology*, 179, 229-236.

MATSUMURA-TUNDISI, T.; TUNDISI, J. G.; ROCHA, O.; CALIJURI, M.C. (1997). The ecological significance of the metalimnion in lakes of Middle Rio Doce Valley. In: *Limnological studies on the Rio Doce Valley lakes, Brazil*. p. 373 – 390.

MATSUMURA-TUNDISI, T.; SILVA, W.M. (2002). Occurrence of *Mesocyclops ogunnus onabamiro*, 1957 (*Copepoda cyclopoida*) in water bodies of São Paulo State, identified as *Mesocyclops Kieferi* Van de Velde, 1984. *Braz. J. Biol.*, 62 (4A): 615-620.

MASON, C.F. (1991). *Biology of freshwater pollution*. 2a Edition. British library, 338p.

MENESES, C. F. S. (1984). *Biomassa e produção de 3 espécies de macrófitas aquáticas da represa do Lobo (Broa)*, SP. Dissertação P. P. G /E. R. N, UFSCAR, São Carlos 253 p.

MOUSTAKA-GOUNVIV, M.; ALBANAKIS, K.; MITRAKAS, M.; PSILOVIKOS, A. (2000). Planktonic autotrophs and environmental condition in the newly-formed hydroelectric. Thesaurus reservoir, Greece. *Arch hydrobiol*, 149(3): 507-526.

OECD-Organization for Economic Cooperation and Development (1982). *Eutrophication of water: monitoring, assessment and control*. Paris 155p.

OLIVEIRA, M.D. (1993). *Produção primária e estrutura da comunidade da fitoplantônica no Reservatório do Lobo (SP)*. Uma comparação entre fatores ecológicos na represa e nos seus principais tributários. USP. 178p.

OLIVEIRA, M.D.; CALIJURI, M. C. (1995). Structure of the phytoplanktonic community in Lobo Reservoir (SP). A comparison among the different compartments

and the reservoir; Rivers, transition Areas and Reservoir. *An Acad. Bra. Sci.* 67 (3) 369-379.

OTÁVIO, D. (1995). Escassez pode levar à guerra da água. *Folha de S. Paulo*, São Paulo, 1 de outubro . Mundo, caderno 1 p 27.

PEREIRA A.; JURAS, A.A.; HINO, K. (1987). *Estudo comparativo do oxigênio dissolvido no reservatório de Tucuruí – Modelagem matemática versus monitoramento*. Relatório técnico de limnologia (julho 1986 a junho 1987).

PEREIRA, A. (1989). *Etude dès données limnologique de la retenue de Tucuruí . Amazonie–Brésil*. Rapport de stage de DEA. Technique e Gestion de l' Environnement Cayenne, French Guiana: CERGRENE-ENPC.

PEZZI, L. P.; ROSA, M. B.; BATISTA, N.N.M. (2003). A corrente de jato sobre a América do sul . Centro de Previsão de Tempo e estudos Climatológicos (CPTEC), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/eliesp10a/mudanca.html>> Acesso em: 20 mar.

PINTO, L.F. (2002). Editor Jornal Pessoal. Disponível em: <[http://\(www.socioambiental.org/website/parabolicas/edições/edicao52/reportag/p05.htm](http://(www.socioambiental.org/website/parabolicas/edições/edicao52/reportag/p05.htm)>. Acesso em 04 jul.

POPOVSKAYA, G.I. (2000). Ecological monitoring of phytoplankton in lake Baikal. *Aquatic Ecosystem , Health and Management Society*. Vol 3; 215-225.

PUCKETT, L. (1995). Identifying the major sources of nutrient waters pollution. *Environmental Science and Technology*, 29, 408 A – 414 A.

RIEHL, H. (1965). *Meteorologia tropical*. Tradução Amélio Augusto Rocha. Rio de Janeiro: L T Rio de Janeiro S A . 426p.

- REITER, E. R. (1969). Tropopause circulations and jet streams. *World Survey of climatology*. V. 4 85-204.
- RIETZLER, A. C. (1991). Estudo da dinâmica de populações de Copepoda- Calanoida na represa do Lobo (Broa) . Dissertação de Mestrado. USP.
- \_\_\_\_\_. (1995). *Alimentação, ciclo de vida e análise de coexistência de espécies de cyclopoda na represa de Barra Bonita*. São Paulo, Doutorado, USP.
- REYNOLDS, C.S. (1994). The long, the short and the Stalled: on the attributes of phytoplankton selected by physical mixing in lakes and rivers. *Hydrobiologia* . 289: 9-21.
- \_\_\_\_\_. (1999). Modelling phytoplankton dynamics and its application to lake management. *Hydrobiologia*, 395/396, 123-131.
- ROCHA, O.; MATSUMURA-TUNDISI, T. (1994). Biomass and production of *Argyrodiaptomus furcatus*, a tropical calanoid copepod in Broa Reservoir, Southern Brazil. *Hydrobiology*, 113, 307-311.
- ROPELEWSKI, C.; HALPER, M. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño-Southern Oscillation , *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1606-1626.
- \_\_\_\_\_. (1989). Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation. *J. Climate*, 2, 268-283.
- SABATER, F.; SABATER, T.; ARMENGOL, J. (1990). Chemical characteristics of a Mediterranean river as influenced by land use in watershed. *Water reseach*, 4(2): 143-155.
- SALAS, H.J.; MARTINO, J. P. (1991). A simplified phosphorus Trophic State model for warm-water tropical lakes. *Wat. Res.* Vol 25, no 3 341-350.

- SALENÇON, M. J.; THEBAULT, J. M. (1997). *Modelisation d'ecosysteme lacustre: Application à la retenue de Pareloup*. Ed Masson, 179p
- SANTOS, A. (1983). Limnologia do sistema Tocantins Araguaia: aspectos físicos e biológicos. Tese de Doutorado, UFSCAR, 257p.
- SMITH, I. R. (1975). Turbulence in lakes and rivers. *Sci. Publ, Freshwater Biol. Assoc. U.K.* 29, 79 pp
- SMITH, V.S. (1984). Phosphorus versus nitrogen limitation in the marine environment *Limnol. Oceanogr.* 29 (6) 1149-1160.
- SPERLING, E. V. (1999). *Morfologia de lagos e represas*. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 138 p.
- STECH, J.; LORENZZETTI, J. A. (1992). The response of south Brazil bright to the passage of wintertime cold fronts. *Journal of Geophysical Research*, V. 97 No C6 P 9507-9520.
- STRAŠKRABA, M. (1986) Ecotechnological measures against eutrophication. *Limnologica (Berlin)* 17: 239-249
- STRAŠKRABA, M.; TUNDISI, J. G.; DUNCAN, A. (1993). *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*, Kluwer Academics Publishers Group. Dordrecht. 292p.
- STRAŠKRABA, M. (1995). Managing of eutrophication by means of ecotechnology and mathematical modelling International Congress Lakes Pollution and Recovery, Rome, 15<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> april, p17-28.
- \_\_\_\_\_. (1999). Retention time as a key variable of Reservoir Limnology. In: Tundisi, J.G e Straškraba, M. *Theoretical Reservoir ecology and its Application*. São Carlos, Brasil, pp 385-410.

- STRAŠKRABA, M.; TUNDISI, J.G. (2000). *Diretrizes para o gerenciamento de lagos: gerenciamento de qualidade da água de represas*. Tradução Dino Vannucci; ed Tundisi J. G. São Carlos , 280p v 1.
- TAMMI, L.R.; CHRISTOPHER, E.G.; HAEANEY, S. I. (2000). Temperature growth and seasonal succession of phytoplankton in Lake Baikal, Siberia. *Freshwater biology* 44: 431-440.
- TRINIDADE, M. (1980). Nutrientes em sedimentos na represa do Lobo (Brotas – Itirapina, SP). Dissertação de Mestrado. UFSC, São Carlos. 219p.
- TUNDISI, J. G. (1981). Typology of reservoir in southern Brazil- *Verh. Internat. Verein Kimmol* 21 : 1031-1039.
- TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. (1982). Estudos limnológicos do sistema de lagos no Médio Rio \Doce. MG–Brasil. *Anais do II Seminário Regional de Ecologia* . 133-258.
- TUNDISI, J.G.; MATHEUS,C. E. (1987). Estudo físico-químico e ecológico, concentração e aporte de nutrientes dos nutrientes dos rios da Bacia hidrográfica do Ribeirão e Represa do Lobo (Broa). *In : anais do simpósio de limnologia e manejo de represas*.
- TUNDISI, J. G. (ed.)(1988). *Limnologia e manejo de represas*. São Carlos: EESC-USP/ CRHEA/ ACIESP, vol. 1(Tomo 1).
- TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. (1988). Eutrofication processes and trophic state for 23 reservoirs in S. Paulo state, Southern Brazil. In Brazil/ Japan Symposium on science and Technology.
- TUNDISI, J. G., MATSUMURA- TUNDISI, T. (1990). Limnology and eutrophication of Barra Bonita Reservoir. São Paulo State, Southern Brazil. *Stuttgart Arch. Hydrobiol. Beith* (33) 661-676.

TUNDISI, J. G.; BICUDO, C.E.M.; MATSUMURA-TUNDISI, T. (1995). *Limnologia in Brazil*, Brazilian academy of Sciences e Brazilian *Limnological society*, 384 p.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; BICUDO, C. E. M. (1995). The Lobo-Broa. *Ecosystem Research in Limnology in Brazil*, Rio de Janeiro: ABC / SBL, 384p II (220-243).

TUNDISI, J. G., MATSUMURA-TUNDISI, T. (1995), *The Lobo-Broa ecosystem research in limnology in Brazil*. (Ed.) Tundisi, J. G.; Bicudo, C.E.M. e Matsumura-Tundisi, T. Brazilian Academy of Sciences, Brazilian Limnological Society. 376. p 219-243.

TUNDISI, J.G., SAIJO, Y. (1997). *Limnological studies on the Rio Doce Valley Lakes*, Brasil. Brazilian Academic of Sciences. University of São Paulo, School of Engineering at São Carlos. Center for Water Resources and Applied Ecology. 528p

TUNDISI, J. G. (1997). Produção primária, "standing stock", fracionamento do fitoplâncton e fatores ecológicos em ecossistema lacustre artificial (Represa do Broa - São Carlos ). Tese de Livre docência. Departamento de Biologia, USP. 409 pp.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; ROCHA, O. (1999a). *Theoretical Basis for Reservoir Management: in Theoretical Reservoir Ecology and its Applications*. (Eds.) Tundisi, J. G, Straskraba, M. Brazilian Academy of Sciences, International Institute.

TUNDISI, J.G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; ROCHA, O. (1999b) *Limnologia de águas interiores: Impacto, conservação e recuperação de ecossistemas aquáticos*. IN: *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. (Orgs e coords). REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. São Paulo: Escrituras Editora. p.195-225.

TUNDISI, J. G.; STRASKRABA, M. (eds) (1999). *Theoretical Reservoir Ecology and its Applications*. São Carlos: International Institute of Ecology, Brazilian Academy of Sciences. International Institute of Ecology. 585p.

TUNDISI, J. G. (2001). Planejamento e gerenciamento de lagos e reservatórios : uma abordagem integrada ao problema da eutrofização. IIE; UNEP; UNESCO, ANA. 385p.

TUNDISI, J. G.; ARANTES J. D.; MATSUMURA-TUNDISI, T. (2002). The Wedderburn and Richardson numbers applied to shallow reservoirs in Brazil. *Verh. Internat Verein. Limnol.*, 28, 663-666.

TUNDISI, J. G. (2003). *Água no Século XXI: enfrentando a escassez*. São Carlos : RiMa, IIE , 248p.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; RODRIGUES, S.L. (2003). *Gerenciamento e recuperação das bacias hidrográficas dos Rios Itaqueri e do Lobo e da represa da UHE Carlos Botelho (Lobo-Broa)* IIE, 72 p.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA –TUNDISI, T; ARANTES JUNIOR J.D.; TUNDISI, J.E.M.; MANZINI,N.F.; DUCROT, R. (2004). The response of Carlos Botelho(Lobo-Broa) reservoir to the passage of cold fronts as reflected by physical, chemical and biological variables. *Braz. J.Biol.*, 64(1) ; 177-186.

VOLLENWEIDER, R. (1982). Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control. Paris / Report of organization for Economic Co-operation and Development, 154p.

WETZEL, R.,G.; LIKENS, G. E. (1979). *Limnological analyse*. 2a Ed. Springer-Verlag, New York.

WETZEL, R G. (1993). *Limnologia*. Tradução e Prefácio de Maria José Boavida. Fundação Calouste Gulbenkian, 920pp.

WHITFIELD, P. H. (1983). Regionalization of water quality in the upper Fraser river

basin, British Columbia. *Water Research*, 17(9): 1053-1066,

YASUNORI, W. (1992). Effects of thermal stratification on trophic linkages among plankton communities in eutrophic lakes. *Arch. Hydrobiol.* 35, 1-12.

YOSHIMURA, S. (1936). A contribution to the knowledge of deep water temperature of Japanese lake. *Jap Journal Ast. Geophy.* 14; 57-83.