

INPE-5271-PRP/159

**RELATÓRIO DO PROJETO "SENSORIAMENTO REMOTO DE
SISTEMAS AQUÁTICOS"**

Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo
Cláudia Zuccari Fernandes Braga

INPE
São José dos Campos
Maio de 1991

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5271-PRP/159

RELATÓRIO DO PROJETO "SENSORIAMENTO REMOTO DE
SISTEMAS AQUÁTICOS"

Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo
Cláudia Zuccari Fernandes Braga

Esta publicação corresponde ao primeiro relatório anual de atividades do projeto SISA - Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos, dentro de um convênio entre o INPE e o CRHEA/USP, com suporte financeiro da FAPESP e CNPq

INPE
São José dos Campos
Maio de 1991

RESUMO

Este trabalho é o primeiro relatório do projeto "Sensoriamento Remoto de Sistemas Aquáticos" encaminhado à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo" ao término das atividades realizadas entre maio de 1989 e junho de 1990. Neste trabalho são discutidos a metodologia utilizada, os problemas técnicos encontrados e as soluções propostas. Ele apresenta uma ampla revisão bibliográfica sobre o tema e a discussão dos resultados preliminares alcançados em cada fase

ABSTRACT

This is the first technical report of the "Remote Sensing of the Aquatic Systems" Project sent to the "Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo" describing the activities performed between May, 1989 and June 1990. In this work the methodology and technical aspects are discussed. They also present a bibliographic review on the subject and the discussion of the preliminary results.

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | ix |
| LISTA DE TABELAS | xii |
| | |
| <u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u> | 1 |
| 1.1 - Resumo do plano inicial | 1 |
| 1.2 - Alterações no plano inicial | |
| | |
| <u>CAPÍTULO 2 - SITUAÇÃO DO PROJETO AO FINAL DO PRIMEIRO ANO DE ATIVIDADES</u> | 9 |
| 2.1 - Revisão bibliográfica | 9 |
| 2.1.1 - Comportamento espectral de corpos d'água | 9 |
| 2.1.2 - Sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: sensores orbitais e aerotransportados | 14 |
| 2.1.3 - Sistemas de informações geográficas: conceitos e exemplos de aplicações | 22 |
| 2.2 - Material e métodos | 27 |
| 2.2.1 - Métodos de laboratório | 27 |
| 2.2.2 - Métodos de aquisição e análise de dados orbitais | 30 |
| 2.2.2.1 - Análise de dados históricos | 33 |
| 2.2.2.2 - Definições: parâmetros de campo, equipamento sensor, rede de amostragem e datas de coleta | 33 |
| 2.2.2.3 - Preparação de coletas simultâneas de dados de campo e dados de satélite | 35 |
| 2.2.2.4 - Missão de campo | 36 |
| 2.2.2.5 - Processamento de imagens TM/LANDSAT | 37 |
| 2.2.2.6 - Tratamento estatístico dos dados | 38 |
| 2.2.2.7 - Geração de mapas temáticos | 39 |
| 2.2.3 - Método de integração de dados em sistema geográfico de informações - SGI | 39 |
| 2.2.3.1 - Aquisição e análise de dados limnológicos . | 39 |
| 2.2.3.2 - Sistema de informações limnológicas georreferenciadas de Barra Bonita | 41 |
| 2.3 - Resultados preliminares | 47 |
| 2.3.1 - Registro de imagens | 47 |
| 2.3.2 - Estruturas de correlação entre os dados de campo | 49 |
| 2.3.3 - Correlações entre dados de campo e dados TM/LANDSAT | 50 |
| 2.3.4 - Banco de dados limnológicos georreferenciados | 51 |
| 2.4 - Atividades a serem realizadas nas próximas etapas do estudo | 61 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1.1 - Localização da área de estudo | 2 |
| 2.1 - Coeficiente de absorção da água em função da presença de diferentes tipos de pigmentos | 11 |
| 2.2 - Método de aquisição e tratamento de dados espectrorradiométricos | 28 |
| 2.3 - Método de aquisição e análise de dados orbitais | 31 |
| 2.4 - Localização das estações amostrais | 40 |
| 2.5 - Módulos corrigidos geometricamente | 47 |
| 2.6 - Exemplo de processamento ao qual foram submetidos os dados limnológicos no Sistema de Informações Geográficas | 59 |
| 2.7 - Exemplo de PI limnológico após classificação . | 59 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 2.1 - Parâmetros adotados na geração de grade regular | 43 |
| 2.2 - Parâmetros adotados no refinamento de grade regular | 45 |
| 2.3 - Precisão do registro imagem/carta (em pixel) .. | 48 |
| 2.4 - Precisão do registro imagem/carta | 48 |
| 2.5 - Precisão de registro dos módulos de integração ao SGI | 48 |
| 2.6 - Relação dos PIs originais já integrados ao banco de dados limnológicos de Barra Bonita | 52 |
| 2.7 - Variações máximas e mínimas das variáveis limnológicas nas estações amostrais do reservatório da UHE Barra Bonita | 55 |
| 2.8 - Intevalos de classe das variáveis limnológicas. | 57 |

CAPÍTULO 1INTRODUÇÃO1.1 - RESUMO DO PLANO INICIAL

O PROJETO **SENSORIAMENTO REMOTO DE SISTEMAS AQUÁTICOS** foi concebido com quatro objetivos principais:

- a) realizar **estudos radiométricos básicos** ao nível de campo e de laboratório, visando ampliar o conhecimento dos efeitos que os diferentes componentes do corpo d'água têm sobre o seu espectro refletivo;
- b) desenvolver métodos para a estimativa de parâmetros indicadores de qualidade d'água (sólidos totais em suspensão, clorofila, macrófitas aquáticas, etc.) a partir de dados de **sensoriamento remoto orbital**;
- c) desenvolver modelos de estimativa do estado trófico do corpo d'água com base na **integração de dados de sensoriamento remoto orbital e dados limnológicos convencionais**;
- d) capacitar recursos humanos para atuarem nestas linhas de pesquisa.

Para a realização deste projeto, considerou-se fundamental o estabelecimento de cooperação técnica entre a equipe de pesquisadores do INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS interessados na ampliação das aplicações de SENSORIAMENTO REMOTO e pesquisadores com tradição em estudos de sistemas aquáticos através de métodos clássicos de limnologia. O CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS E ECOLOGIA APLICADA da ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS (USP) foi identificado como um núcleo que ao mesmo tempo possuía tradição de pesquisa limnológica e interesse em absorver e desenvolver novas tecnologias. Para formalizar a cooperação técnico-científica entre o CHREA-USP e o INPE foi então realizado um CONVÊNIO entre as instituições.

A área geográfica escolhida para a realização do projeto foi a do **RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA**, no Estado de São Paulo (Figura 1.1).

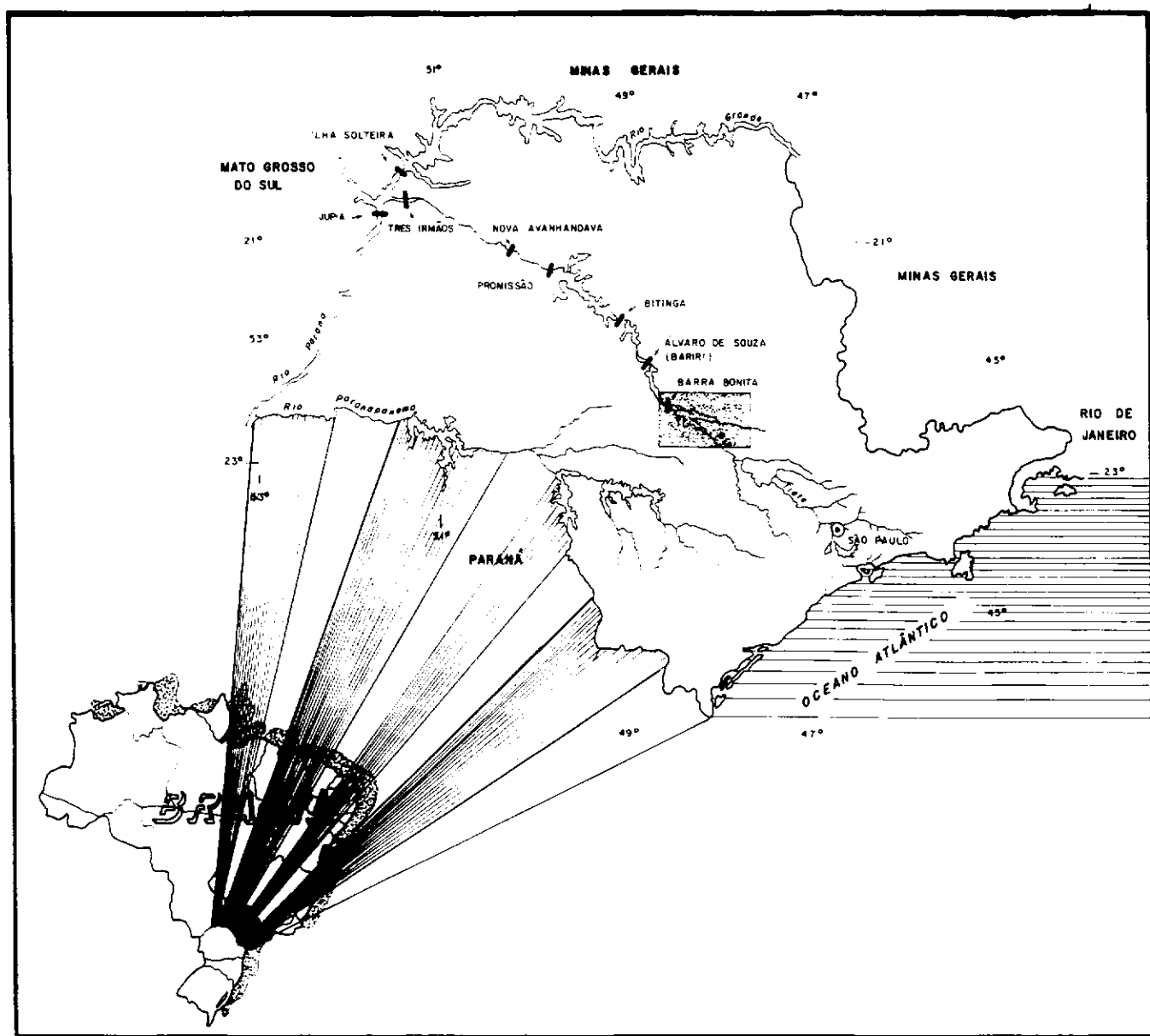


Fig. 1.1 - Localização da área de estudo.

Sua escolha levou em conta os seguintes aspectos:

- a) é um reservatório antigo, portanto já sujeito a problemas de eutrofização (Calijuri, 1988);

- b) é um sistema aquático intensivamente estudado através de métodos limnológicos convencionais (Esteves e Camargo, 1982; Tundisi, 1984; Tundisi, 1986; Esteves e Tolentino, 1986; Calijuri, 1988; Tundisi e Matsumura - Tundisi, 1988);
- c) é um corpo d'água localizado numa região de intensa transformação nos padrões de ocupação do solo desde a implantação da barragem;
- d) é um corpo d'água que possui um volume considerável de dados históricos de hidrologia e sensoriamento remoto.

Para atingir os objetivos do PROJETO foi proposta a seguinte abordagem:

- a) **Aquisição e análise de dados radiométricos em laboratório a partir da adaptação dos métodos de radiometria da água sugeridos por Whitlock et al. (1977), Holyer, (1978), Sydor (1980), Novo et al., (1989a), Novo et al., (1989b).**

Os resultados esperados dessa linha de atuação são:

- a1 - ampliação do conhecimento dos efeitos das propriedades físico-químicas das partículas inorgânicas em suspensão na água sobre seu espectro refletivo;
- a2 - organização de banco de dados espectrais da água coletados sob condições controladas de laboratório, a ser colocado à disposição da comunidade científica para aplicações posteriores;
- a3 - quantificação das diferenças de comportamento espectral da água associadas à presença de sólidos inorgânicos em suspensão e identificação das faixas espectrais mais adequadas à discriminação entre diferentes tipos de partículas em suspensão.

- b) **Aquisição e análise de dados radiométricos ao nível aéreo a partir da adaptação de métodos utilizados por Holm et al. (1986) entre outros.**

Os resultados esperados dessa linha de atuação são:

- b1 - organização de banco de dados espectrais da água obtidos in situ, georreferenciados e associados a propriedades da água determinadas simultaneamente às medidas radiométricas;
 - b2 - avaliação do efeito de parâmetros de aquisição (geometria de visada, ângulo instantâneo de visada, altura de vôo, etc.), sobre o espectro de reflexão da água;
 - b3 - estabelecimento de modelos empíricos que relacionem a reflectância espectral da água às suas propriedades físicas, químicas e biológicas;
 - b4 - avaliação do efeito da melhor resolução espectral proporcionada pelo sistema aerotransportado sobre o desempenho dos modelos de estimativa de parâmetros da água via sensoriamento remoto orbital.
- c) Aquisição e análise de dados ao nível orbital a partir da adaptação de métodos utilizados por Verdin (1985), Braga (1988) e Lathrop e Lillesand 1989) entre outros.**

Os resultados esperados dessa linha de investigação são:

- c1 - organização de banco de dados digitais do sensor TM em diferentes datas, os quais serão georreferenciados a dados limnológicos derivados de amostras de água coletadas simultaneamente à passagem do satélite LANDSAT-5;
- c2 - identificação de variáveis representativas do nível trófico do reservatório passíveis de serem detectadas ao nível orbital;
- c3 - determinação dos fatores ambientais que interferem na relação entre cor da água (reflectância espectral) e suas propriedades químicas, físicas e biológicas;
- c4 - determinação das mudanças de nível trófico do reservatório a partir da análise temporal dos dados de sensoriamento remoto e dados limnológicos;

c5 - desenvolvimento de modelos de avaliação do estado trófico de reservatórios a partir da integração de dados de sensoriamento remoto a dados de campo.

Como parte desta linha de pesquisa, propõe-se o tratamento dos dados orbitais através das seguintes fases:

Fase 1 - Desenvolvimento e teste de modelos de estimativa do nível trófico do reservatório através de dados de sensoriamento remoto envolvendo as seguintes atividades:

- . compartimentação do reservatório de Barra Bonita em diferentes unidades utilizando imagens TM/LANDSAT em dois períodos críticos do reservatório no tocante a seu nível trófico;
- . utilização dessa compartimentação para orientar a alocação de estações amostrais para a coleta simultânea de dados limnológicos e dados TM/LANDSAT;
- . coleta simultânea de dados em pelo menos três passagens no período de grande tempo de residência da água no reservatório (Inverno) e no período de pequeno tempo de residência da água no reservatório (Verão);
- . compilação junto aos órgãos competentes (CTH/DAEE, CESP, CETESB) de dados referentes a variáveis ambientais que interferem na qualidade da água do reservatório de Barra Bonita, quais sejam: vazão, precipitação, ventos, efluentes domésticos, etc.;
- . processamento dos dados limnológicos (CRHEA/USP);
- . processamento e integração de dados orbitais e limnológicos do Reservatório de Barra Bonita num SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS;
- . tratamento estatístico dos dados (análises de regressão) para gerar modelos empíricos de estimativa de parâmetros limnológicos;
- . aplicação dos modelos e avaliação de seu desempenho.

Fase 2 - Análise da variação temporal do nível trófico do reservatório de Barra Bonita envolvendo as seguintes atividades:

- . aquisição de dados históricos de sensoriamento remoto sobre o reservatório de Barra Bonita;
- . processamento digital para normalização das informações orbitais conforme método de Blackwell (1982) e Curran (1987);
- . utilização dos modelos desenvolvidos na fase 1 para estimar o nível trófico do reservatório em algumas datas significativas no período de 1973 a 1990;
- . modelagem das variações temporais do nível trófico.

d) Integração de dados de sensoriamento remoto coletados nos diferentes níveis de aquisição.

- d1 - comparação dos modelos gerados a partir dos dados de diferentes níveis de coleta;
- d2 - proposição de explicações teóricas que esclareçam de que modo variáveis do sistema aquático (composição da água) interferem no comportamento espectral dos corpos d'água e de que modo variáveis na aquisição dos dados (nível de imageamento, resolução espectral, data de aquisição, etc.) interferem no registro dessa assinatura.

e) Orientação de Trabalhos de Pesquisa ao nível de Mestrado e Especialização em tópicos que contribuam para a consecução dos objetivos científicos do projeto.

Os resultados esperados dessa atividade são:

- e1 - elaboração de dissertações abordando temas com contribuições científicas e metodológicas para o PROJETO.
- e2 - formação de profissionais ao nível de pós-graduação com capacidade para abrir novas linhas de pesquisa, que contribuam para uma aplicação

mais efetiva da tecnologia de sensoriamento remoto no manejo de recursos hídricos.

1.2 - ALTERAÇÕES NO PLANO INICIAL

No primeiro ano, o PROJETO se propunha fundamentalmente a cumprir a fase de **Aquisição de Dados Básicos**. Inicialmente, tendo em vista a perspectiva de suspensão da operação do satélite em meados de 1989, propôs-se apenas um ano intensivo de aquisição simultânea de dados orbitais e limnológicos. Pesquisas realizadas anteriormente (Lathrop e Lillesand, 1989, Jensen et al., 1989 e Clark, 1983 entre outros) indicam a necessidade de programas intensivos de coleta de dados devido a pelo menos dois fatores: 1) cobertura de nuvens no dia da coleta de dados, o que impede a utilização dos dados de satélite; 2) variabilidade temporal do sistema aquático, fazendo com que modelos estatísticos gerados em função de apenas uma data sejam de difícil (senão impossível) generalização. O que se pretendia inicialmente era criar uma base de dados de satélite e dados de campo que permitisse abranger o máximo de variabilidade do sistema aquático. Como meta considerou-se adequada a aquisição de três conjuntos completos de dados por estação do ano. Com o desenvolvimento do projeto, constatou-se que a variabilidade anual dos elementos climáticos (totais pluviométricos, temperatura, ventos) poderia também interferir no processo de modelagem. Desta maneira, com a ampliação do período de aquisição de dados TM, considerou-se oportuno prosseguir as coletas simultâneas por mais um ano hidrológico.

Por outro lado, o PROJETO não previa uma fase analítica em seu primeiro ano. Entretanto, alguns fatores contribuíram para que esta fase fosse realizada já no primeiro ano: 1) necessidade de analisar os dados após cada coleta como subsídio à operacionalização das atividades; 2) avaliação da metodologia de aquisição adotada e da validade dos procedimentos (número de estações amostrais, localização das estações amostrais, significância dos parâmetros coletados, etc.; e 3) interesse da comunidade de usuários nos resultados preliminares do PROJETO.

No PROJETO previa-se também a coleta de dados radiométricos ao nível aéreo em 1989. O protótipo do sistema de coleta de dados espectrorradiométricos foi concluído em 1989, mas sua homologação pelo Ministério da Aeronáutica não foi ainda concedida. Por este motivo, esta atividade foi adiada para uma nova data a ser definida.

Como a fase de aquisição de dados de satélite terá prosseguimento durante o período compreendido entre junho/1990 e março/1991, ainda há condições para que a coleta de dados espectrorradiométricos ao nível de aeronave se realize sem prejuízo para as metas do PROJETO. Estão sendo feitas gestões junto ao Ministério da Aeronáutica para que o sistema seja liberado o mais rapidamente possível. Estão também sendo estudadas alternativas metodológicas para o caso de a liberação de uso do equipamento não ser realizada no prazo adequado.

CAPÍTULO 2

SITUAÇÃO DO PROJETO AO FINAL DO PRIMEIRO ANO DE ATIVIDADES

2.1 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE CORPOS D'ÁGUA

A compreensão dos processos físicos envolvidos na interação entre a **radiação eletromagnética** (REM) e os diversos componentes da superfície terrestre é de fundamental importância na conversão dos **dados** obtidos por sensores remotos em **informações**.

O processo de extração de informações a partir de imagens aéreas ou orbitais está fundamentado na idéia de que as propriedades da matéria (composição química, estado físico) afetam seu espectro de reflexão. A composição espectral do fluxo radiante refletido pelos diferentes materiais informa sobre suas propriedades físicas, químicas e biológicas (Huete, 1989). Deste modo, o **comportamento espectral** dos diferentes componentes da superfície pode ser representado por suas curvas de **reflectância espectral**.

A interação entre a REM e um dado corpo d'água é condicionada pelas propriedades de absorção e espalhamento de seus componentes em suspensão e dissolvidos. Os coeficientes de absorção e espalhamento dos corpos d'água são propriedades óticas inerentes, ou seja, independem do campo de radiação incidente. Corpos d'água com diferentes composições apresentarão diferentes coeficientes de absorção e espalhamento em cada comprimento de onda. O coeficiente de absorção da água em 440nm pode variar entre $0,0145\text{m}^{-1}$ para a água pura e $19,1\text{m}^{-1}$ para a água com elevada concentração de substâncias orgânicas dissolvidas, como é o caso do lago Napeast, na Irlanda (Kirk, 1986). Do mesmo modo, o coeficiente de espalhamento de corpos d'água varia amplamente com sua composição. O coeficiente de espalhamento da água em 530 nm aumenta de $0,117\text{m}^{-1}$ nas Ilhas Bahamas para $1,82\text{m}^{-1}$ no porto de San Diego (Califórnia) devido à presença de maior concentração de partículas em suspensão na água neste último (Kirk, 1986).

Diversos pesquisadores (Gordon et al., 1975 e Morel e Prieur, 1977) já demonstraram que a razão(R) entre a irradiância ascendente (energia radiante que deixa o corpo d'água após interagir com ele) e a irradiância descendente (energia radiante que penetra no corpo d'água)

é dependente da razão entre os coeficientes de absorção (a) e retroespalhamento (b_p) da água. Esta dependência pode ser expressa pela Equação 2.1 em que C representa uma constante de proporcionalidade que varia em função do ângulo de elevação solar e magnitude dos coeficientes (Kirk, 1986).

$$R = C \frac{b_p}{(a + b_p)} \quad (2.1)$$

Como em corpos d'água naturais os valores de a são muito maiores que os de b_p , a Equação 2.1 foi simplificada por Prieur (1976) resultando em (2):

$$R = C \frac{b_p}{a} \quad (2.2)$$

A Irradiância Ascendente (E_a) na direção vertical é de grande interesse para o sensoriamento remoto dos sistemas aquáticos, uma vez que a grandeza radiométrica medida pelo sensor é a Radiância (L_a), ou seja, o fluxo de energia que deixa a superfície em sua direção. Assim sendo, pode-se admitir que a razão entre a Radiância emergente e a Irradiância descendente também depende das propriedades óticas inerentes do corpo d'água.

A reflectância espectral de um corpo d'água, portanto, depende da razão entre o coeficiente de espalhamento e o coeficiente de absorção da água. Assim sendo, o comportamento espectral dos corpos d'água depende das propriedades espectrais da água e das propriedades espectrais de seus componentes.

Os componentes do volume d'água que afetam seu comportamento espectral podem ser classificados em quatro categorias (Kirk, 1986): a) pigmentos e complexos protéicos responsáveis pela fotossíntese (clorofila, carotenóides, biliproteínas); b) substâncias orgânicas dissolvidas (também conhecidas por **gilvin**, **yellow substance** ou **gelbstoff**); c) partículas orgânicas em suspensão; e d) partículas inorgânicas em suspensão. Estudos mais recentes têm indicado que o zooplâncton também pode afetar o comportamento espectral da água (Balch et al., 1989).

A análise da produção científica dirigida à compreensão das interações entre a radiação eletromagnética e os corpos d'água indica um desequilíbrio entre pesquisas destinadas à caracterização espectral de partículas vivas (fitoplâncton), substâncias orgânicas em solução na água e aquelas voltadas à caracterização do comportamento

espectral de partículas inorgânicas e orgânicas em suspensão na água (Bricaud e Sathyendranath, 1981). Esta pequena atenção dada a partículas em suspensão pode ser explicada pela dificuldade de obtenção de seus espectros de absorção, visto serem principalmente partículas espalhadoras (Kirk, 1986).

O espectro de absorção de diferentes pigmentos pode ser observado na Figura 2.1, superposto ao espectro de absorção da água.

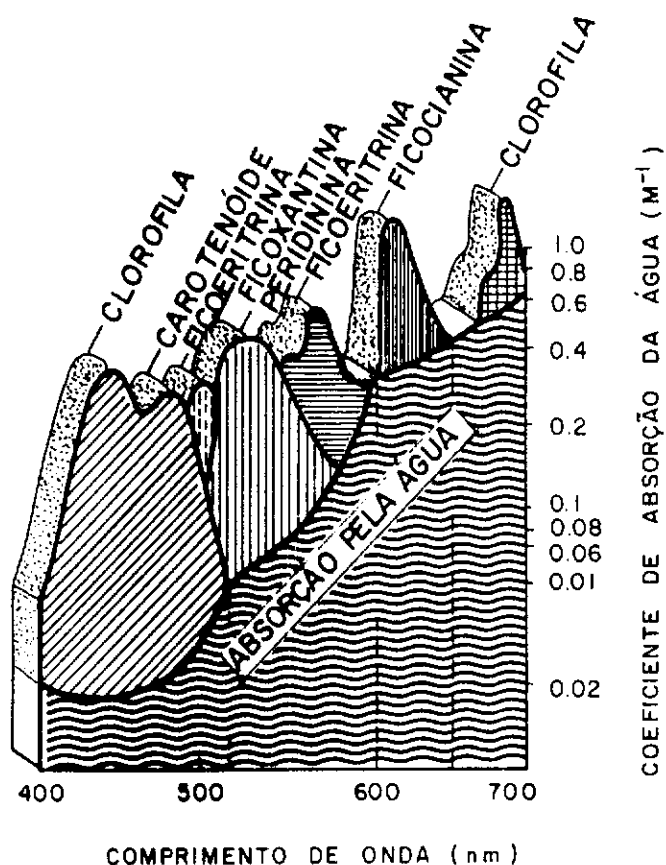


Fig. 2.1 - Coeficiente de absorção da água em função da presença de diferentes tipos de pigmentos
 FONTE: adaptada de NASA, 1987.

A análise da Figura 2.1 permite verificar que há um aumento do coeficiente de absorção da água com a presença de pigmentos. O máximo de absorção pelos diferentes pigmentos ocorre em regiões distintas do espectro eletromagnético. Isto contribui para que diferentes grupos de colônias de algas possam, potencialmente, ser opticamente discriminados em função da composição e concentração de pigmentos fotossintetizadores (Kirk, 1986).

O aumento da concentração de clorofila e pigmentos determina alterações significativas no espectro de energia refletida da água. A reflectância máxima de águas oceânicas com baixa concentração de clorofila ocorre na região do azul em decorrência do retroespalhamento pela água. O aumento da concentração de clorofila determina uma redução da reflectância na região do azul e um aumento da reflectância na região do verde (Clarke et al., 1970). Este efeito do fitoplâncton sobre a reflectância da água tem sido utilizado no desenvolvimento de algoritmos que permitam estimar a concentração de clorofila a partir da radiância espectral da água medida por sensores orbitais.

O efeito das substâncias orgânicas dissolvidas sobre o comportamento espectral da água pode ser deduzido de seu espectro de absorção. O máximo de absorção das substâncias orgânicas ocorre na faixa do azul. O coeficiente de absorção de substâncias orgânicas dissolvidas em 440nm tem sido utilizado como uma medida de sua concentração na água (Kirk, 1986). Devido à coincidência entre o máximo de absorção pela clorofila e o máximo de absorção pelo **gilvin**, áreas com altas concentrações de matéria orgânica dissolvida tornam-se inadequadas à utilização de sensores de baixa resolução espectral para a determinação de propriedades biológicas dos ecossistemas aquáticos (Fischer et al., s/d). GraBi et al. (1986) sugerem nestes casos a utilização de sensores que medem a fluorescência do fitoplâncton.

O efeito do material particulado (orgânico e inorgânico) sobre o coeficiente de absorção dos corpos d'água é pouco conhecido. Estudos realizados por Yentsch (1962) indicavam que o material particulado com diâmetro inferior a 5 μm não provocava absorção seletiva. Os experimentos realizados por Yentsch (1962) baseavam-se em amostras coletadas em oceanos, onde o material particulado é predominantemente de origem orgânica.

Os estudos existentes, em geral, se limitam à determinação das propriedades de absorção do material particulado total, independente de sua origem. Este material é conhecido como **tripton** e tem recebido pouca atenção da comunidade científica, pois em concentrações típicas o efeito provocado pelo espalhamento excede o da absorção, o que torna difícil a sua caracterização por métodos fotométricos convencionais (Kirk, 1986).

Estudos realizados em sistemas aquáticos no continente australiano indicam que os espectros de absorção do **tripton** não se diferenciam de um corpo d'água

para outro. Em geral, apresentam a mesma forma: alta absorção na faixa do azul, decrescendo rapidamente em direção ao vermelho e tendendo a inexistir na faixa do infravermelho. Existem, entretanto, diferenças no valor do coeficiente de absorção de cada sistema aquático decorrente da variação na concentração e composição do **tripton**. O coeficiente de absorção em 400nm pelo material particulado variou por exemplo de $0,5\text{m}^{-1}$ no Reservatório Corin a 10m^{-1} no lago Burley Griffin (Kirk, 1986).

O efeito que o material particulado tem sobre o espectro da água nas amostras utilizadas por Kirk (1986) é semelhante ao efeito das substâncias orgânicas dissolvidas. Segundo o autor, este comportamento espectral do material particulado leva à hipótese de que as partículas minerais encontram-se ligadas às substâncias húmicas, sendo seu comportamento por elas determinado.

Em situações em que o material particulado inorgânico predomina na composição do **tripton**, o espectro da fração particulada muda de forma significativa.

Experimentos de laboratório realizados por Whitlock et al. (1977) permitiram caracterizar o espectro da radiância refletida pela água devido à variação na cor do material particulado inorgânico. Foram utilizados sedimentos derivados de quatro diferentes tipos de solos. Os autores concluíram que os espectros de reflexão das suspensões de solos arenosos e argilosos são bastante distintos para a mesma concentração. Os experimentos também permitiram concluir que a resolução espectral com que são obtidos os espectros afeta a separabilidade espectral das diferentes suspensões. Quando se utiliza uma resolução espectral de 32nm, os quatro solos apresentam espectros distintos em concentrações variáveis entre 4ppm e 173ppm. Com resolução espectral de 160nm, as suspensões originárias dos diferentes solos só se diferenciam espectralmente a elevadas concentrações (173ppm). Os autores concluíram também que a radiância refletida pelo volume d'água não varia linearmente com a concentração de sedimentos.

Resultados semelhantes foram encontrados por Holyer (1978). Seus experimentos foram realizados in situ e permitiram verificar que: a) acima de 25mg/l a radiância refletida pelo material particulado em suspensão não é alterada pela presença de pigmentos fotossintetizadores; b) a radiância refletida pelo volume d'água varia com a granulometria do material em suspensão; e c) o relacionamento entre radiância refletida e a concentração de sólidos totais em suspensão é **não-linear**.

Os resultados de Sydor (1980) sugerem que a reflectância residual devida à presença de material particulado inorgânico varia com sua composição mineralógica. Argilas vermelhas, por exemplo, apresentaram máximo de reflectância em 630nm. Arenitos ferruginosos (chert ferruginoso, em inglês **taconite**) apresentaram reflectância máxima em 560nm. Para Sydor (1980), entretanto, existe uma relação **linear** entre reflectância residual e concentração de sólidos em suspensão no intervalo de concentração de 0mg/l até 10mg/l.

A análise da literatura sobre o comportamento espectral da água permite concluir que: a) existem poucos estudos básicos; b) os estudos existentes são realizados em condições experimentais distintas; c) os resultados experimentais muitas vezes são conflitantes; e d) os aspectos conflitantes não podem ser seguramente atribuídos às condições experimentais porque os trabalhos são realizados ao longo de um processo de evolução de sistemas sensores, métodos de análise, etc. Fica evidente, portanto, que há espaço para pesquisas básicas em comportamento espectral da água como suporte à extração de informações sobre os sistemas aquáticos a partir de dados de sensoriamento remoto. Pesquisas recentes nesse sentido têm sido realizadas por Novo et al. (1989a) e Novo et al. (1989b).

2.1.2 - SENSORIAMENTO REMOTO DE SISTEMAS AQUÁTICOS: SENSORES ORBITAIS E AEROTRANSPORTADOS

Uma das primeiras pesquisas realizadas no sentido de avaliar as relações entre a **cor** da água detectada por sensores remotos e propriedades do sistema aquático foi realizada por Clarke et al. (1970). A hipótese dos autores era de que a clorofila presente no fitoplâncton altera a quantidade de energia retroespalhada pela água do mar. Mesmo que a informação detectada pelo sensor se refira apenas às camadas superficiais da água, a concentração superficial de clorofila pode ser utilizada como um índice da quantidade de fitoplâncton presente no oceano. O trabalho realizado por estes autores buscava investigar o potencial do que eles chamaram de "espectroscopia remota" para a avaliação de parâmetros biológicos do sistema aquático. Diferentes tipos de massas d'água foram investigadas. Medidas de clorofila e temperatura foram obtidas simultaneamente à coleta de dados espectrorradiométricos com um sensor operando entre 400nm e 700nm e com uma resolução espectral de 5,7nm. O cálculo do fator de reflectância foi possível a partir da aquisição de medidas de radiância de um "painel de referência" com reflectância lambertiana conhecida. Os autores fizeram

medidas a diferentes alturas de vôo, concluindo que a atmosfera reduz o volume de informações que pode ser extraído dos dados espectrorradiométricos, e ainda sugerem a utilização de "razões espectrais" como indicadores da produtividade biológica dos oceanos. A razão entre as radiâncias medidas em 540nm e 460nm varia de 0,45 a 0,69 em águas de baixa e alta concentração de clorofila, respectivamente. As pesquisas de Clarke et al. (1970) iniciaram uma linha de investigação que levou à concepção do sensor Coastal Zone Colour Scanner (CZCS), o qual passou a fazer parte da carga útil do satélite Nimbus-7 a partir de outubro de 1978. Fazem parte desta tradição de pesquisa as contribuições de Curran (1972), Gordon (1973), Mc Cluney (1974), Gordon e McCluney (1975), Grew (1975), McCluney (1976), Miller et al. (1977), Jain e Miller (1976), Kattawar et al. (1976), Gordon (1978), Shook et al. (1980), Gordon e Clark (1980), Viollier et al. (1978), Viollier et al. (1980), Hojerslev (1980), Bukata et al. (1980), Austin (1980), Bukata et al. (1981a), Bukata et al. (1981b), Gordon e Clark (1981), Prieur e Sathyendranath (1981), Gordon et al. (1983), Tassan e Sturm (1986), Carder et al. (1986), Bricaud et al. (1987) e Deschamps e Viollier (1987). As principais características desta linha de atuação são: 1) busca de modelos teóricos que permitam associar propriedades inerentes do volume d'água a dados extraídos de sensores remotos; 2) preocupação com o desenvolvimento de métodos de correção de efeitos atmosféricos; 3) ênfase no estudo em oceanos; 4) pequena atenção ao papel dos particulados inorgânicos sobre o comportamento espectral da água; e 5) vinculação à comunidade de oceanógrafos.

As principais contribuições desta tradição de pesquisa ao desenvolvimento da tecnologia de sensoriamento remoto aplicado a sistemas aquáticos são: a) identificação de faixas espectrais adequadas à detecção de clorofila (Clarke et al., 1970); b) desenvolvimento de algoritmos com precisão de mais ou menos $1/4$ de log para a estimativa de clorofila e mais ou menos $1/6$ de log para a estimativa de seston (Morel e Gordon, 1980); e c) desenvolvimento de modelos de correção atmosférica (Gordon et al., 1978; Gordon e Clarke, 1981).

Paralelamente ao desenvolvimento de métodos teóricos e analíticos de utilização de dados de sensoriamento remoto, estabeleceu-se uma linha de atuação baseada no desenvolvimento de modelos empíricos. Esta tradição de pesquisa encontra-se mais ligada a grupos interessados no estudo de sistemas aquáticos continentais, em que a variabilidade da composição da água e o efeito do material particulado, entre outros fatores, inibem a

utilização de modelos teóricos a partir dos sensores atualmente disponíveis, caracterizados por baixa sensibilidade radiométrica e baixa resolução espectral.

Um dos trabalhos pioneiros na utilização de dados de sensoriamento remoto para o estudo de sistemas aquáticos continentais foi realizado por Scherz (1972) como parte do programa de cooperação entre a Universidade de Wisconsin, a National Aeronautics and Space Administration (NASA) e o Governo do Estado de Wisconsin. O objetivo da cooperação era o de definir que parâmetros de qualidade de água poderiam ser detectados através de fotografias aéreas. Os resultados permitiram concluir que as plumas observadas em fotografias aéreas poderiam estar relacionadas aos seguintes parâmetros: sólidos totais, sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos. O autor propõe a utilização de medidas de profundidade Secchi como base para avaliar o volume de energia que retorna das diferentes camadas de água. Para Scherz (1972) uma das principais limitações à utilização de técnicas de sensoriamento remoto naquela época era o efeito das feições do fundo do corpo d'água sobre a resposta espectral da água. Para evitar esse efeito, o autor recomendou o uso da tecnologia somente para corpos d'água cuja profundidade real excedesse de uma até duas vezes a medida da profundidade Secchi. O autor também propunha um gráfico (página 44, op. cit.) para se determinar o volume de energia proveniente de cada camada de profundidade da água, a partir das medidas com o disco de Secchi. Este gráfico auxilia a determinação da profundidade em que os dados limnológicos devem ser coletados para que se correlacionem com a radiância espectral registrada por um sensor remoto.

Ainda dentro do Programa de Cooperação Científica entre a NASA e as universidades americanas, Anderson e Horne (1975) desenvolveram um amplo programa de pesquisa voltado à utilização de técnicas de sensoriamento remoto no manejo de reservatórios e lagos do Estado da Califórnia. O objetivo da pesquisa era o de suprir os órgãos responsáveis pela qualidade da água dos reservatórios com um método de levantamento rápido das condições superficiais dos reservatórios. Dois tipos de dados foram testados: a) fotográficos, cuja principal limitação é o tempo de processamento (o intervalo máximo entre a aquisição e disponibilidade dos dados para a análise é de três dias para que possam ser efetivamente utilizados no manejo); e b) sistema de imageamento eletrônico (câmeras de TV, por exemplo) com sensores multiespectrais.

Os estudos realizados por Anderson e Horne (1975) durante os anos de 1974 e 1975 envolveram a participação do Ames Research Center (NASA) e do Sanitary Engineering Research Laboratory da Universidade da Califórnia, e eram parte de um amplo programa de investigação voltado ao monitoramento do processo de eutrofização de reservatórios conduzido pela universidade. Quatro reservatórios foram estudados: Perris Lake, Castaic Lake, Silverwood Lake e Pyramid Lake.

As datas e horários de coleta simultânea de dados limnológicos foram definidas em função da análise de dados meteorológicos e de qualidade da água. As datas de amostragem foram selecionadas para garantir o máximo de variabilidade das características dos sistemas aquáticos. As coletas foram realizadas sob condições meteorológicas e de iluminação favoráveis (céu claro, elevação solar acima de 35 graus). Em média foram coletadas entre 10 e 20 amostras de água por reservatório. Medidas de transmissão de luz na água foram também efetuadas em algumas estações amostrais com auxílio de um medidor de luz Tsurami-Seiki (light meter) e do disco de Secchi.

As amostras d'água foram analisadas em laboratório, sendo medidos os seguintes parâmetros: a) biomassa fitoplanctônica (clorofila a); b) espécies de alga; e c) turbidez.

As missões de aerolevante foram realizadas em três datas, e utilizaram-se as câmeras Fairchild K-17 com 305mm de distância focal e International Imaging System MK-1 com quatro lentes de 100mm de distância focal. Os produtos destas missões foram, respectivamente, fotografias infravermelhas na escala 1:10.000 e fotografias multiespectrais na escala 1:30.000. Em duas datas um sistema de vídeo-teipe foi utilizado, com adaptação de filtros que permitiam registrar imagens em duas faixa espectrais: vermelho e infravermelho.

A análise das imagens foram realizadas a partir da determinação do contraste entre massas d'água distintas. Para isso foi utilizado um sistema de calibração contendo 15 valores tonais. A cada subcena contendo uma estação amostral era atribuído um valor tonal variando de 1 até 15, sendo 1 o valor correspondente à água limpa e 15 o correspondente à água turbida ou infestada por florescimento de algas. Correlações entre o valor tonal e os parâmetros in situ foram também determinadas.

Anderson e Horne (1975) Paralelamente aos levantamentos aéreos, realizaram medidas

espectrorradiométricas em laboratório com uma resolução espectral de 15nm entre 350nm e 1200nm. Diferentes culturas de fitoplâncton foram utilizadas para a aquisição de espectros de reflectância.

Para a aquisição de medidas espectrorradiométricas in situ foi utilizado um equipamento com alta velocidade de varredura para evitar que oscilações do vento alterassem os espectros da água. As observações foram feitas com o equipamento apontado a 45 graus do nadir, e com um ângulo azimutal relativo ao Sol de 90 graus. Este arranjo experimental foi definido para se evitar o efeito do brilho solar ("sun glitter").

As principais contribuições destes estudos foram: a) as algas cianofícias e as macrófitas aquáticas têm reflectância mais elevada que as algas verdes e as diatomáceas - na região do infravermelho essa diferença chega a ser de 3 a 4 vezes maior que nos demais comprimentos de onda; b) existem diferenças básicas na forma das curvas espectrais de diferentes grupos de algas; c) as diatomáceas refletem mais radiação vermelha que as algas cianofícias e as algas verdes; d) os mecanismos de reflexão da luz pelo fitoplâncton são primariamente função da variação no índice de refração dos vários constituintes das células (vacúolos, membranas, cromatóforos, etc.); e e) sensores fotográficos aerotransportados permitem determinar a presença, localização e extensão de bancos de algas cianofícias em corpos d'água.

Para os autores, a aplicabilidade das técnicas de sensoriamento remoto ao manejo de reservatórios poderia aumentar se fosse ampliado o conhecimento sobre: a) os efeitos que concentrações variadas de diferentes espécies de fitoplâncton têm sobre a reflectância da água; e b) o efeito do estado fisiológico do fitoplâncton sobre o comportamento espectral dos corpos d'água.

Pesquisas realizadas por Werzenak (1974) indicaram que dados multiespectrais poderiam ser utilizados para determinar o nível trófico dos sistemas aquáticos. O autor propõe a utilização de técnicas de análise multivariada para determinar um **índice de estado trófico** a partir de dados de sensoriamento remoto. Os parâmetros que integram o índice são transparência, concentração de clorofila e vegetação aquática. O autor utilizou razões entre bandas espectrais como medida da transparência (vermelho/azul) e da concentração de clorofila (verde/vermelho) na água. A base teórica para a utilização deste índice é aprofundada em Wezernak et al. (1976), os quais salientam que os dados de sensoriamento remoto

registram as consequências da eutrofização, ou seja, mudanças na concentração de clorofila, transparência da água, concentração de sólidos em suspensão, infestação por macrófitas aquáticas.

O lançamento do primeiro satélite de recursos naturais em 1972, deu início a trabalhos mais voltados à avaliação dos dados orbitais. Uma série de pesquisas foi realizada entre 1972 e 1975 para avaliar que tipo de informação poderia ser extraída dos dados orbitais e que métodos seriam os mais adequados a esta extração.

Experimentos voltados à calibração dos dados MSS/LANDSAT foram realizados por Egan (1972) para determinar que parâmetros de qualidade da água estariam relacionados à radiância detectada pelo sensor MSS/LANDSAT. Para o autor, os dados MSS se correlacionam com a turbidez da água. O canal MSS5 (600nm-700nm) apresentou correlação de 0,99 com medidas de turbidez da água. A correlação entre a turbidez e a concentração de clorofila na região de estudo era bastante baixa (0,26), o que indica que outros componentes da água estariam respondendo pela variação da reflectância. Não foram coletados dados sobre concentração de material particulado em suspensão na água, o qual teoricamente poderia estar respondendo pelas variações na reflectância da água.

Bowker e Witte (1975) realizaram pesquisas de avaliação do potencial dos dados do varredor multiespectral (MSS) a bordo do LANDSAT no estudo das propriedades da água da Baía de Chesapeake. De outubro de 1972 a setembro de 1973 foram coletadas amostras de água simultaneamente à passagem do satélite, a cada 18 dias. Cinco dentre vinte passagens do satélite puderam ser utilizadas no estudo. Os resultados desta avaliação indicaram que havia baixa correlação entre os valores de radiância medidos pelo sensor MSS e a concentração de clorofila; altas concentrações de clorofila, entretanto, puderam ser detectadas na faixa do infravermelho, o que confirma resultados de Anderson e Horne (1975). Foram encontradas altas correlações entre o total de material particulado e os níveis de radiância nas bandas MSS5 (vermelho) e MSS6 (vermelho-infravermelho). Os autores sugerem também que massas d'água diferentes devem ser calibradas separadamente. Para eles, a pesquisa suscitou duas questões: a) qual a relação entre o material particulado e o sedimento (particulado inorgânico)?; e b) em que faixas de concentração os sedimentos são representativos do coeficiente de atenuação? A análise das variações nos coeficientes de correlação entre clorofila e radiância de uma data para outra levou os autores a

concluírem que os dados do MSS não estavam consistentemente relacionados à presença do fitoplâncton. Para eles, o parâmetro mais consistentemente relacionado à radiância foi a concentração de sedimentos em suspensão.

Dados MSS/LANDSAT foram também utilizados para o monitoramento da qualidade da água de dois reservatórios do estado de Kansas, EUA (McCauley e Yarger, 1975). Os dados de satélite foram calibrados através da coleta simultânea de 10 amostras de água em cada reservatório. Os seguintes parâmetros de campo foram determinados para cada uma das amostras d'água: sólidos dissolvidos (material filtrável à porosidade de 0,45 micra); fração inorgânica dos sólidos em suspensão e dissolvidos (material remanescente do aquecimento a 600 graus centígrados); clorofila a, b e c (determinada por extração em acetona e medidas espectrofotométricas); nutrientes (nitrato, fosfato e potássio determinados através de métodos espectrorradiométricos). Os parâmetros de campo foram correlacionados com as seguintes razões entre canais: MSS5/MSS4 (1); MSS6/MSS4 (2) e MSS7/MSS4 (3). A utilização de razões entre as bandas foi importante para suprimir efeitos da variação do ângulo de iluminação do Sol. Os resultados de McCauley e Yarger (1975) podem ser assim resumidos: a) a razão (1) permite estimar sedimentos em suspensão na água na faixa de 0ppm a 80ppm com precisão de 12ppm; a razão (2) é efetiva na faixa de 0ppm a 120ppm com precisão de 9ppm e de 0ppm a 900ppm com precisão de 35ppm; a razão 3 é eficiente na faixa de 0ppm a 900ppm com precisão de 44ppm; b) as razões não foram sensíveis à variação de clorofila devido a sua baixa concentração (0-8 microgramas/litro) e à elevada concentração de sólidos em suspensão na água (concentração mais frequente ocorrendo na faixa de 200ppm a 500ppm).

Estudos realizados por Ritchie et al. (1976) a partir de dados espectrorradiométricos de campo indicaram uma alta correlação entre concentração de sólidos inorgânicos (sedimentos) e energia refletida da água. Segundo os autores, a região entre 700nm e 800nm apresenta correlações mais estáveis com a concentração de sedimento em suspensão na água.

Rouse e Coleman (1976) relatam um experimento realizado no Delta do rio Mississipi adjacente à Baía de Louisiana em que dados MSS/LANDSAT foram utilizados para monitorar os padrões de circulação da água. O experimento consistiu da aquisição de medidas radiométricas, em laboratório, de diferentes concentrações de sedimentos do rio Mississipi. As medidas radiométricas foram realizadas com o objetivo de calibrar os dados

orbitais. Os resultados experimentais indicaram que a faixa de concentrações pode ser dividida em três classes: de 0mg/l a 80mg/l, obedecendo a um tipo de ajuste linear; de 80mg/l a 400mg/l, obedecendo a outro tipo de ajuste; e acima de 400mg/l. Foram utilizadas 19 cenas MSS/LANDSAT, as quais foram analisadas através de microdensitometria. Os valores de densidade foram convertidos em radiância, e posteriormente relacionados a variações na concentração de sedimentos, com base nas informações de laboratório. Dois problemas básicos são encontrados no método de Rouse e Coleman (1976): experimento de laboratório mal dimensionado e ausência de dados in situ concomitantes à passagem do satélite.

Estudos mais qualitativos também foram realizados com os dados MSS/LANDSAT. Horstmann et al. (1978) utilizaram técnicas de processamento digital para produzir composições coloridas do Mar Báltico. Os autores correlacionaram modificações na cor da água com a ocorrência de florescimento de algas cianofícias. A falta de dados de campo, entretanto, limita a avaliação dos resultados e a generalização das conclusões. Strong (1978) associou aumentos de radiância nas bandas MSS4 e MSS5 à presença de suspensões de carbonato de cálcio no lago Michigan. Nenhum dado de campo concomitante à passagem de satélite esteve disponível para confirmar estas afirmações. Tais estudos se caracterizam pela ênfase nos métodos de realce e processamento de dados, mas em geral não contam com dados de campo que confirmem ou refutem as hipóteses levantadas pela análise das imagens. Fazem parte também desta linha de atuação as contribuições de Scarpace et al. (1979), por exemplo.

A análise da produção científica voltada à utilização de dados de sensoriamento orbital para estudos de qualidade de águas fluviais e costeiras demonstra a existência de um grande número de trabalhos sem embasamento teórico, orientados apenas para a análise das imagens, sem hipóteses de trabalho. Exceções a esta tendência são as contribuições de Munday e Alfoldi (1979), Whitlock et al. (1982) e Catts et al. (1985).

Com a disponibilidade de dados do sensor Thematic Mapper (com melhor resolução espectral e espacial que o sensor MSS), houve um recrudescimento de pesquisas voltadas à avaliação do potencial da nova tecnologia no fornecimento de informações sobre sistemas aquáticos. Destacam-se nesta fase as contribuições de Lathrop e Lillesand (1986), Tassan (1987), Tassan (1988), Braga (1988). A metodologia utilizada consiste em geral na coleta de dados simultaneamente à passagem do satélite e no

desenvolvimento de modelos empíricos a partir de técnicas de estatística multivariada.

2.1.3 - SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: CONCEITOS E EXEMPLOS DE APLICAÇÕES

Adotando-se a perspectiva de que o conjunto de atividades relacionadas ao sensoriamento remoto ambiental pode ser concebido como parte de um amplo sistema de informações (Slater, 1980), torna-se fácil compreender a importância que os Sistemas de Informações Geográficas têm adquirido na última década.

Um Sistema de Informações Geográficas (SIG) pode ser definido como um banco de dados no qual a maior parte das informações está espacialmente indexada (Smith et al., 1987). Este banco de dados permite armazenar, combinar, analisar e recuperar informações espacialmente codificadas (Engespaço, 1990).

Os SIGs evoluíram a partir dos avanços tecnológicos nas áreas de Computação, Cartografia e Fotogrametria nas décadas de 50 e 60. O primeiro SIG operacional foi desenvolvido pelo Canadá: o Canadian Geographic Information System, implementado em 1964. Este e os sistemas dele derivados baseavam-se no conceito de superposição de dados espacialmente indexados e foram utilizados em planejamento regional e urbano. Com os avanços na ciência da Computação e com a maior disponibilidade de dados espacialmente referenciados houve uma rápida evolução dos SIGs (Smith et al., 1987).

Existem algumas experiências de utilização de SIG na identificação de áreas críticas de fontes não-pontuais de poluição hídrica. A grande vantagem dos SIGs neste tipo de análise é a possibilidade de integrar dados hidrológicos, topográficos e de uso e cobertura do solo em um único sistema de dados (Sivertun et al., 1988).

Há diversas técnicas de identificação de áreas críticas de fontes não-pontuais de poluição. Sivertun et al. (1988) integrou dados de quatro diferentes fontes num SIG de modo a identificar tais áreas na bacia do rio Motala (Suécia) quais sejam: a - distribuição espacial dos solos; b - distribuição espacial da declividade; c - distribuição espacial do uso do solo; e d - distribuição espacial das sub-bacias hidrográficas no tocante à distância do corpo d'água em estudo.

Um aspecto importante para a utilização eficiente dos SIG é o da identificação dos fatores

relevantes a serem integrados num dado sistema. No caso específico do manejo de recursos hídricos a característica do solo considerada mais relevante é sua textura. Assim, diferentes tipos de solos podem ser reagrupados em função de suas características texturais. A textura do solo é relevante para a identificação de fontes não-pontuais visto ser um indicador da erodibilidade do solo. Estas mesmas considerações foram feitas por Pereira (1990) no estudo do potencial de fornecimento de partículas inorgânicas de diferentes sub-bacias de captação do Reservatório da UHE-Tucuruí.

Outro aspecto importante na integração de dados em SIGs é o da classificação dos diferentes planos de informação (PIs) ou fatores. Sivertum et al. 1988 sugerem que o número de classes de cada PI deve variar entre 5 e 9. Um número excessivo de classes torna difícil a análise dos resultados das operações com planos de informações.

Welch et al. (1988) relataram o uso integrado de dados de sensoriamento remoto e SIGs para a avaliação de sistemas aquáticos continentais. O trabalho foi realizado por solicitação da U. S Environmental Protection Agency (EPA) com o objetivo de avaliar a expansão de plantas aquáticas indesejáveis no Lago Marion, na Carolina do Sul. A integração das taxas de expansão de plantas aquáticas a dados de qualidade da água, batimetria e sedimentação permitiram identificar os fatores responsáveis pela infestação. Os parâmetros de qualidade d'água selecionados foram: a - concentração de nitrogênio e fósforo, que são os nutrientes essenciais ao crescimento das plantas; b - oxigênio dissolvido, liberado pela flora e fauna aquática; c - demanda biológica de oxigênio, indicadora do nível trófico do lago; e e - turbidez, indicador da penetração de luz e distribuição vertical das plantas submersas. Os resultados preliminares da comparação entre a distribuição de macrófitas e parâmetros de qualidade de água indicaram que o aumento na concentração de fósforo entre 1980 e 1983 pode ser identificado como um fator a explicar o aumento da área ocupada pelas macrófitas emergentes após 1983. A aplicação de herbicidas em 1982, 1983, 1984 e 1985 foi mais efetiva para o controle das macrófitas submersas.

Os SIGs também têm sido utilizados na avaliação de impactos ambientais e para projeções de impactos futuros. Este tipo de avaliação de impacto ao longo do tempo é conhecido como Avaliação Acumulativa de Impacto (AAI) e tem-se beneficiado da utilização de SIGs por permitirem compilar e processar dados coletados ao longo do tempo numa ampla região geográfica. A metodologia

envolve a integração de dados atuais e históricos de qualidade de água, mapas resultantes de fotointerpretação e técnicas de estatística multivariada através de um SIG (Jonhston et al., 1988). O trabalho foi desenvolvido em 15 bacias de captação na área metropolitana de St. Paul, Minneapolis. Dados de qualidade de água e fotografias aéreas referentes a 37 anos em diferentes sub-bacias puderam ser utilizados. Os dados de qualidade da água de datas individuais foram manipulados para se obter médias temporais de nutrientes, sólidos em suspensão, etc. A equação utilizada foi (2.3):

$$P_t = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i \times t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2.3)$$

onde:

P_t = média ponderada no tempo

t_i = intervalo de tempo entre duas datas de amostragem

p_i = medida de um dado parâmetro

As classes de uso/cobertura do solo identificadas foram: agricultura, floresta, urbana, superfície líquida e áreas alagadas. Os autores utilizaram o sistema ERDAS para a entrada de dados de uso e cobertura do solo e ordem e limite de bacias de drenagem a partir de cartas topográficas. Outros parâmetros físicos que caracterizam as bacias estudadas foram incorporados à base de dados, tais como erodibilidade dos solos, permeabilidade, etc. Os dados foram rasterizados com uma resolução de 50m por 50m. Cada bacia de captação pôde então ser descrita numericamente em termos de suas propriedades bióticas e abióticas para ser depois empiricamente relacionadas às propriedades de qualidade da água. Um índice de comparação sequencial foi também utilizado para quantificar a diversidade do uso da terra. De acordo com os autores o uso de SIGs em estudos de AAI é fundamental por que: a - permite a análise de mudanças ao longo do tempo; b - fornece uma perspectiva regional ao planejador; e c - informa sobre a importância relativa dos fatores locais da paisagem.

O International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Holanda, desenvolveu um sistema de informação para manejo de interflúvios. O sistema ILWIS (Integrated Land and Watershed Management Information System) combina procedimentos de SIGs

convencionais a procedimentos de processamento de imagens e dados (Valenzuela, 1988). O sistema é composto pelos seguintes módulos: 1 - Entrada de dados, incluindo facilidades para digitalização, edição de dados, transformação de projeções cartográficas, entrada de imagens processadas, etc.; 2 - Base de dados gráficos com facilidades para transformação de formato vetorial em raster; 3 - Banco de atributos com uma coleção de funções definidas para um certo domínio de aplicações (um exemplo de configuração de um banco de atributos é o conjunto de relações entre tipos de solos e características do terreno numa dada região geográfica); e 4 - Gerenciador de banco de dados.

Os principais módulos do sistema são: 1- módulo básico contendo limites administrativos, rede de transportes, limites de bacias hidrográficas, etc.; 2- módulo de unidades de terreno, que caracteriza aspectos do relevo e do solo; 3 - módulo de uso da terra, com informações sobre os tipos de culturas, produtividade, etc., 4 - módulo de recursos hídricos que inclui informações necessárias à implementação de modelos hidrológicos; e 5 - módulo sócio-econômico incluindo informações sobre tipo de propriedade da terra, malha fundiária, etc.

Um dos aspectos pouco desenvolvidos nos SIGs atuais é o de manipulação de dados temporais. Um sistema com capacidade de processamento de dados temporais deve, em princípio, ser capaz de responder a questões do tipo: 1 - como era um dado lugar do espaço no tempo t_n ($n=1, \dots, n$)?; 2 - qual a taxa de mudança em diferentes regiões do espaço?; 3 - existe um modelo (linear, exponencial, logarítmico, quadrático) que descreva as mudanças no tempo?; e 4 - como estará uma dada região do espaço no tempo t_{n+1} ? Algumas análises temporais mais simples poderiam responder questões do tipo: 1 - onde se encontra um região com as características especificadas na data t_1, t_2, \dots, t_n ?; e 2 - em algum momento no tempo duas dadas regiões apresentaram características similares? Langran (1989) identifica uma série de problemas para o armazenamento e manipulação de dados temporais. Uma forma de tratar o problema seria segregar os atributos temporais dos atributos espaciais no processo de manipulação dos dados. Ainda assim haveria o problema de representação das mudanças na dimensão espacial.

Price (1989) exemplifica o conceito de SIG com capacidade de manipulação de dados temporais para cadastros de lotes. O sistema permite representar espacialmente as configurações adotadas por uma determinada

parcela do terreno desde sua definição inicial num dado tempo t_n .

Os SIGs têm sido também utilizados para o planejamento regional. Miranda et al. (1990) relatam a utilização de um SIG com o objetivo de estruturar um banco de dados cartográficos para o estado de Tocantins. O banco de dados foi estruturado com 30 projetos, sendo cada projeto equivalente à área abrangida por uma carta topográfica na escala 1:250.000. A base de dados de cada projeto é composta por 12 planos de informações: divisão administrativa; rede viária e sede de municípios; hidrografia; geologia; geomorfologia; pedologia; vegetação; parcelas agrícolas; parques e reservas; uso atual das terras; áreas com potencial para expansão de áreas agrícolas; e áreas com potencial para preservação. A partir desse banco de informações básicas extraídas de mapas existentes e imagens TM/LANDSAT, os autores puderam derivar as seguintes informações: aptidão agrícola e zoneamento agroecológico do estado.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, desenvolveu um Sistema de Informações Geográficas com algumas características que o tornam bastante eficiente para a integração de dados de sensoriamento remoto com dados originários de outras fontes. As principais características do SGI/INPE (Engespaço, 1990) são: 1 - capacidade de recuperação de informações para localizações específicas; 2 - capacidade de integrar informações provenientes de fontes e formatos distintos; e 3 - aplicativos gráficos para geração de mapas e símbolos.

O modelo de dados utilizado pelo SGI/INPE é chamado de Modelo Geo-relacional. Este modelo pressupõe que as informações sejam organizadas em **Projetos**, aos quais correspondem **Referenciais Geográficos** distintos. Os **Projetos** são compostos por **Planos de informações**, os quais podem se agrupar, em função de suas características, em três categorias básicas: **Polígonos**, que permitem a representação de classes temáticas de mapas; **Modelos Numéricos de Terreno**, que permitem a representação espacial de grandezas físicas (concentração de clorofila, por exemplo); e **Imagens Espectrais**, que permitem a entrada de dados de sensoriamento remoto (imagens, processadas ou não). Os **Planos de Informações** são compostos por **Objetos**, ou seja, entidades geográficas que podem ser manipuladas pelo banco de dados relacional.

O SGI/INPE funciona de modo integrado ao sistema de tratamento de imagens (SITIM/INPE). As imagens podem integrar o SGI em três formatos: Imagem

multiespectral; Imagem temática (resultante de classificação); e Imagem codificada (obtida através de processamento que permite produzir a partir de uma composição multiespectral uma imagem colorida em apenas uma banda).

O funcionamento do SGI/INPE é garantido por seis subsistemas (Engespaço, 1990): 1 - Definição, que permite configurar o projeto; 2 - Entrada, que permite a inserção de novos dados no sistema; 3 - Conversão, que permite converter formatos de dados e realizar transformações geométricas; 4 - Manipulação, que permite gerar novas informações; 5 - Saída, que permite a geração de documentos cartográficos e listagens; e 6 - Gerenciamento, responsável pela recuperação de informações da base de dados.

2.2 - MATERIAL E MÉTODOS

Durante o primeiro ano de desenvolvimento do projeto foram enfatizadas a definição de metodologia de aquisição e tratamento de dados espectrorradiométricos e dados de sensorimento remoto orbital e as metodologias de organização de um banco de dados limnológicos.

2.2.1 - MÉTODOS DE LABORATÓRIO

A análise da literatura (McCluney, 1976; Whitlock et al., 1977 e Novo et al., 1989) permitiu definir um sistema de coleta de dados espectrorradiométricos em laboratório, de tal modo que os problemas experimentais levantados em pesquisas anteriores fossem minimizados.

O primeiro passo do método envolve a definição clara das hipóteses que serão testadas em laboratório. Em função destas as variáveis experimentais devem ser classificadas em principais e secundárias. As variáveis principais são aquelas que serão medidas: radiância espectral relativa da água, radiância espectral do alvo de referência, concentração de uma dada substância na água, etc. As variáveis secundárias são aquelas que devem ser controladas para garantir a repetitividade dos resultados. Estas variáveis incluem o ângulo de iluminação, a potência do iluminante, as características de reflexão do recipiente da água, etc. (Figura 2.2).

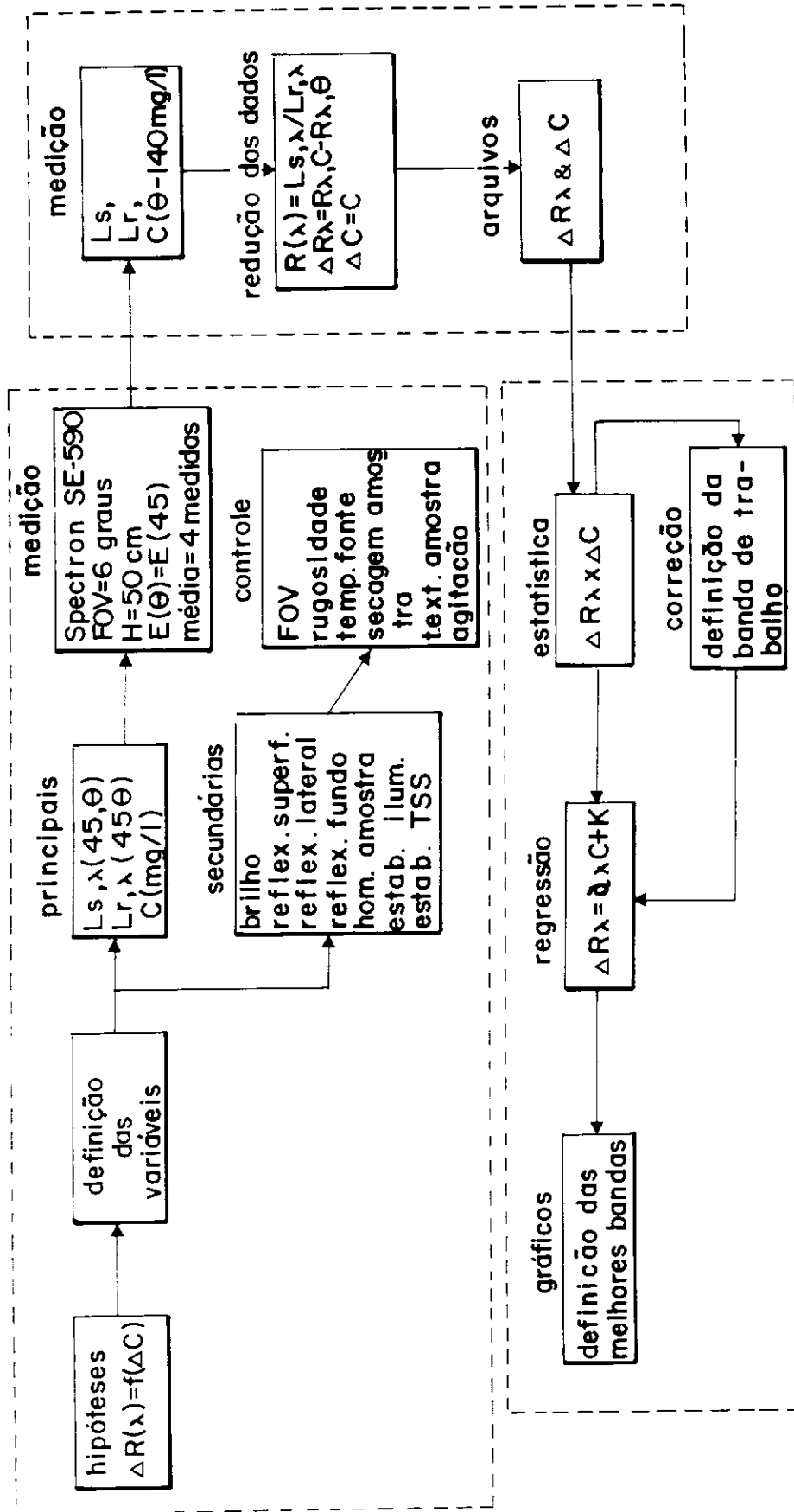


Fig. 2.2 - Método de aquisição e tratamento de dados espectrorradiométricos.

Um componente importante na aquisição de medidas radiométricas de laboratório é a simulação de condições semelhantes às encontradas no campo, tal que se consiga controlar algumas variáveis para medir o efeito de um determinado parâmetro de qualidade de água sobre seu espectro de reflectância. Para que as condições de campo sejam simuladas adequadamente, o recipiente deve ser suficientemente grande para que o sinal produzido pela água seja detectável. Ao mesmo tempo, devem-se evitar efeitos das paredes do recipiente sobre o comportamento espectral da água.

Para atender a estes requisitos, foi utilizada uma caixa de água de 1000 litros, a qual foi revestida, primeiramente, com uma mistura de areia e asfalto. Este revestimento produziu um aumento na rugosidade das paredes do recipiente, aumentando seu coeficiente de absorção. Esta superfície rugosa foi posteriormente revestida com tinta preta absorvedora. Medidas espectrorradiométricas da água pura indicaram que o revestimento utilizado permitiu simular um corpo de água de profundidade e dimensões quase-infinitas.

Outro aspecto importante na realização dos experimentos de laboratório é a simulação das diferentes concentrações. O método de simulação utilizado para as suspensões de partículas inorgânicas consiste da adição de quantidades conhecidas de sedimento a um volume constante de água. Após a adição, a água é misturada através de um misturador de alta rotação para que as partículas se mantenham em suspensão de forma homogênea. Os resultados até o momento (Novo et al., 1990; Cabral et al., 1990) indicam que o sistema de mistura é adequado para as frações mais finas. Quando as simulações são realizadas com partículas mais grosseiras (areia fina, p.ex.), a concentração simulada superestima a concentração real.

Uma fase fundamental nos estudos espectrorradiométricos é a de redução e tratamento dos dados. Para isso, foi desenvolvido pelo LABORATÓRIO de RADIOMETRIA do INPE - LARAD uma série de programas específicos para tratamento dos dados de radiometria da água. Devido à baixa radiância da água, os dados espectrais brutos fornecidos pelo espectrorradiômetro apresentam ruídos. Esses ruídos precisam ser removidos antes do cálculo do Fator de Reflectância da água (razão entre a radiância da água e a radiância de uma placa de sulfato de bário). Para a remoção dos ruídos foi desenvolvido um filtro digital que é aplicado a cada um dos espectros. As características do filtro encontram-se descritas em Novo et al. (1990a).

Outro processamento preliminar a que devem ser submetidos os dados espectrorradiométricos é o do cálculo da Reflectância Residual. Este cálculo foi proposto por Sydor (1980) e permite que o efeito da reflexão especular da superfície da água, bem como o efeito do espalhamento molecular da água sejam removidos, facilitando a detecção das variações espectrais relacionadas ao componente da água em estudo. Assim sendo, foi desenvolvido um programa que permite a subtração automática do espectro da água pura dos espectros das diferentes concentrações.

Os arquivos de saída são compatíveis com sistemas de tratamento estatístico de dados. Os dados de reflectância e das diferentes concentrações são submetidos aos seguintes tipos de análise: análise de correlação e análise de regressão. Na literatura (Whitlock et al., 1982 e Munday e Alfoldi, 1979) é recomendada a utilização do coeficiente de correlação (r) como indicador da adequação de uma determinada banda espectral à estimativa de uma dada variável ambiental. A análise dos dados preliminares de laboratório indicou que o coeficiente de regressão também deve ser analisado no caso de estudos radiométricos da água, pois eles dão informações sobre a sensibilidade da banda espectral ao parâmetro mensurado. Duas bandas espectrais quaisquer poderão estar altamente correlacionadas a um dado parâmetro, mas terem sensibilidade diferenciada. A banda de maior êxito seria a mais sensível, uma vez que permitiria estimar o parâmetro em questão numa faixa menor de variação. Estes aspectos encontram-se discutidos em Novo et al. (1990a).

2.2.2 - MÉTODOS DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS ORBITAIS

A partir da análise da bibliografia existente sobre o assunto foi definida uma metodologia de aquisição e tratamento dos dados orbitais. A Figura 2.3 apresenta de forma esquemática as principais etapas da abordagem adotada para a consecução dos objetivos do projeto.

2.2.2.1 - ANÁLISE DE DADOS HISTÓRICOS

Esta análise consistiu na compilação de dados limnológicos e dados de satélite já existentes sobre o Reservatório de Barra Bonita de modo a se ter um conhecimento prévio do funcionamento do sistema.

Os dados limnológicos existentes (Calijuri, 1988) indicam que o Reservatório de Barra Bonita apresenta variação sazonal de suas propriedades. No INVERNO, devido ao maior tempo de retenção da água no reservatório, há um aumento de seu nível trófico. No VERÃO, apesar da maior entrada de nutrientes provenientes do escoamento superficial, a redução do tempo de retenção da água, o maior volume de água e a maior velocidade do escoamento, fazem com que, em média, haja uma redução do seu nível trófico.

A análise qualitativa de imagens TM/LANDSAT representativas das situações de INVERNO e VERÃO indicou variações sensíveis na **cor** e na **distribuição espacial** das massas de água do reservatório. Nas imagens de INVERNO o reservatório pôde ser classificado em 6 classes espectrais. Nas de verão puderam ser reconhecidas apenas 4 classes espectrais. Os resultados desta análise permitiram chegar às seguintes conclusões: a) existem variações na cor da água do Reservatório de Barra Bonita que podem ser detectadas através de dados orbitais do sensor TM; b) o significado ecológico dessas variações só pode ser determinado a partir de um amplo programa de coleta simultânea de dados limnológicos e de satélite; e c) a classificação digital das imagens de VERÃO e INVERNO auxiliaram a determinação de estações amostrais. Os resultados dessa fase encontram-se descritos em Novo e Tundisi (1990).

2.2.2.2 - DEFINIÇÕES: PARÂMETROS DE CAMPO, EQUIPAMENTO SENSOR, REDE DE AMOSTRAGEM E DATAS DE COLETA

Foi realizada uma primeira coleta simultânea de dados em 17 de julho de 1988 para auxiliar na definição de aspectos básicos da metodologia, tais como: que parâmetros de campo medir?; que sensor utilizar: TM/LANDSAT, HRV/SPOT?; quantas amostras coletar?; onde coletar?; e em que datas? Nessa missão foram coletadas amostras em oito estações alocadas com o auxílio de um mapa alfanumérico resultante da classificação temática de uma imagem de INVERNO (Novo e Tundisi, 1988). Os seguintes parâmetros foram determinados para cada amostra: profundidade Secchi; temperatura superficial; penetração de

luz (total, azul, verde e vermelha); total de sólidos em suspensão (TSS); material inorgânico do TSS; material orgânico do TSS; concentração de clorofila total; concentração de nutrientes (nitrato, nitrito, amônia, fosfato inorgânico, fosfato total dissolvido, silicato); ph; e condutividade. As determinações foram feitas no CENTRO de RECURSOS HÍDRICOS e ECOLOGIA APLICADA da Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo, conforme metodologia descrita em Calijuri (1988).

O processamento digital da imagem de 17 de julho de 1988 permitiu definir a metodologia de análise dos dados TM/LANDSAT. Os aspectos mais significativos desta metodologia encontram-se discutidos em Novo et al. (1990c). Os níveis digitais de cada canal espectral foram transformados em reflectância aparente. As estações amostrais foram localizadas nas imagens e a média dos níveis digitais de uma região equivalente a 16 "pixels" (120m x 120m) foi extraída. A reflectância espectral aparente de cada estação amostral foi então correlacionada com os parâmetros medidos no campo. Os resultados da correlação indicaram que a variação na concentração de clorofila no Reservatório de Barra Bonita estava naquela data respondendo pela variação na reflectância aparente da água. A aplicação de técnicas de regressão múltipla passo a passo, permitiu a definição de um modelo estatístico para mapear a distribuição superficial de clorofila na barragem. Os resultados deste teste encontram-se descritos em Novo et al. (1990c) e permitiram concluir que: a) a concentração superficial de clorofila poderia ser mapeada para todo o reservatório a partir da integração de dados de campo e dados de sensoriamento remoto orbital; b) o modelo de estimativa da concentração de clorofila poderia ser melhorado em termos de precisão se houvesse um aumento no número de estações amostrais; c) o número de estações amostrais deveria ser ampliado para trinta para aumentar a significância estatística dos dados; d) a representatividade dos dados no tempo deveria ser avaliada através da aquisição de dados de campo e de satélite em mais do que uma data e mais do que um ano; e e) o sensor a ser utilizado no estudo deveria ser o TM/LANDSAT tendo em vista a qualidade dos resultados preliminares.

A partir da análise dos resultados preliminares uma nova rede de amostragem foi definida e alocada em um mapa. Neste mapa cada estação amostral é numerada e seu posicionamento definido por triangulação. Os pontos notáveis do terreno são utilizados para posicionar as embarcações durante a missão de coleta de dados no campo.

2.2.2.3 - PREPARAÇÃO DE COLETAS SIMULTÂNEAS DE DADOS DE CAMPO E DADOS DE SATÉLITE

A preparação das missões de coleta simultânea de dados envolve uma série de atividades de rotina, quais sejam: 1) confecção de um calendário anual com as datas de todas as passagens do satélite LANDSAT sobre o Reservatório de Barra Bonita (Este calendário é enviado no início de cada ano civil ao CRHEA e à CESP de modo que estes órgãos possam incluir as atividades do PROJETO em suas programações anuais); 2) acompanhamento das condições meteorológicas da região de interesse junto ao Centro de Previsão do Tempo do INPE para evitar a mobilização das equipes sem que o tempo seja favorável à coleta de dados; 3) contacto com a equipe do CRHEA e da CESP para colocá-los em condições de sair para o campo na semana do evento; 4) contacto com a Usina de Barra Bonita para avaliar as condições do tempo na véspera da passagem, principalmente se as previsões do INPE forem ambíguas; 5) contacto com a Estação de Rastreamento do Satélite em Cuiabá para o controle do imageamento em tempo real, ou seja, simultaneamente à passagem.

Estas atividades de rotina não impedem, entretanto, que missões de campo sejam realizadas sob condições desfavoráveis à aquisição de imagens. Quando isto ocorre a coleta de amostras de campo é mantida, e os dados são analisados para integrarem o BANCO DE DADOS LIMNOLÓGICOS GEORREFERENCIADOS DO RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA.

No início do PROJETO, colocou-se como meta a aquisição de pelo menos três conjuntos de dados orbitais simultâneos à passagem do satélite. Ao término do primeiro ano de coleta de dados constatou-se que esta meta não é realista, visto que no período de INVERNO foram realizadas 6 missões, das quais em apenas duas obtiveram-se imagens com 0% de cobertura de nuvens. Nas demais datas, somente pequenas regiões do reservatório encontram-se livres de nuvens. No VERÃO, as dificuldades de aquisição dos dados de campo e de satélite aumentam devido a problemas de enchentes e nebulosidade não previsíveis no atual estado de desenvolvimento das técnicas de previsão do tempo em regiões tropicais. Assim sendo, no VERÃO, entre dezembro de 1989 e março de 1990, foram realizadas apenas quatro missões de coleta de dados com a obtenção de apenas um conjunto de dados de campo e de satélite simultâneos. Para o ano de 1990 esperava-se realizar o mesmo número de missões de INVERNO, iniciadas em 21 de junho, e aumentar o número de missões de VERÃO iniciando as coletas em novembro.

2.2.2.4 - MISSÃO DE CAMPO

As duas primeiras missões de campo em Barra Bonita foram realizadas sem o apoio da CESP. Foram missões experimentais voltadas à definição da melhor estratégia de coleta e análise de amostras de campo. Na primeira missão foram coletadas amostras em apenas oito estações amostrais. Os dados foram coletados em duas profundidades (à superfície e à profundidade Secchi). Além daqueles parâmetros mencionados na Seção 2.2.2.2, foram também coletadas amostras de fitoplâncton e zooplâncton, bem como foram feitas determinações de oxigênio dissolvido. Após a coleta das amostras de água, estas foram filtradas em laboratório montado no campo, e preparadas para posterior determinação dos nutrientes e da concentração de clorofila e TSS. O tempo gasto para a coleta e análise preliminar de amostras de água na primeira Missão de Campo demonstrou ser inviável a amostragem em duas profundidades em todas as estações amostrais. A análise dos resultados também demonstrou que a coleta de amostras após episódios de vento e chuva não produz resultados coerentes.

A segunda Missão de Campo também foi realizada com apenas duas embarcações. O procedimento foi modificado, instalando-se um laboratório para filtragem de amostras em um dos barcos para que se pudesse permanecer mais tempo no reservatório e assim ampliar a amostragem. O processo de filtragem a bordo, entretanto, se mostrou mais lento e mais sujeito a erro amostral. O tempo gasto por estação amostral excedeu ao da primeira missão de coleta de dados. Concluiu-se que, a menos que se pudesse contar com um barco adicional e dividir a equipe em três grupos, cada um responsável pela coleta de amostras em 10 estações, não haveria tempo hábil para se cobrir todo o reservatório (300 km²) num intervalo de mais ou menos 2 horas em relação ao horário da passagem do satélite.

A partir da terceira Missão de Campo a equipe pôde contar com o apoio técnico da Divisão de Operações Hidráulicas da CESP, que forneceu um barco para auxiliar nas coletas.

Durante as Missões de Campo são rotineiramente coletados dados "in situ", tais como temperatura, profundidade Secchi e luz. As amostras de água são filtradas em campo e depois levadas para o CRHEA, onde são submetidas às análises necessárias. Os equipamentos e métodos de análise de amostras encontram-se discutidos em Calijuri (1988). Os resultados da análise são então enviados para o INPE/SJC onde integram um banco de dados georreferenciados e um Banco de Dados para Modelagem Estatística (BDME).

2.2.2.5 - PROCESSAMENTO DE IMAGENS TM/LANDSAT

Após identificadas as imagens TM/LANDSAT com qualidade satisfatória, estas são solicitadas em formato compatível com computador (CCT). No período de inverno (maio a setembro de 1989) foram obtidas duas cenas com boa qualidade (04 e 20 de julho de 1989).

A cena de 04 de julho de 1989 foi submetida aos seguintes processamentos:

a) Definição dos Módulos de Trabalho

Os módulos de trabalho são definidos em função dos tipos de processamento a que serão submetidos os dados digitais. Tendo em vista as necessidades do projeto e as limitações de hardware e software disponíveis, foram definidos dois tipos de módulos de trabalho: módulos para extração de dados radiométricos (MR), com resolução de 30m por 30m, e módulos para integração de dados no Sistema de Informações Geográficas (MI), com resolução de 60m por 60m. A área de estudo pôde assim ser dividida em 2 MRs e 1 MI.

b) Transformação para Reflectância Aparente

Os dados digitais de cada um dos módulos foram transformados em Reflectância Aparente (Godoy Jr. e Novo, 1989) utilizando-se o programa "REFLETE". Estes módulos foram gravados em disquetes de 1,2 megabytes para agilizar a utilização posterior.

c) Registro Imagem/Carta

Os módulos MR de 04 de julho de 1989 foram registrados com as cartas topográficas na escala 1:50.000 (Folhas de BARRA BONITA, SÃO MANUEL e SANTA MARIA DA SERRA). Através do registro, a cena foi geometricamente corrigida em relação ao sistema de projeção das cartas topográficas. Esta operação permite que os dados de campo sejam referenciados aos dados orbitais com maior precisão.

Os módulos MRs de 04 de julho passaram a ser, portanto, as IMAGENS de REFERÊNCIA (IR) para o registro das demais cenas a ser adquiridas no decorrer do projeto.

d) Remoção de Ruídos

Após o registro, as estações amostrais foram localizadas nas MRs e suas coordenadas anotadas para utilização posterior. A região a ser amostrada foi submetida à filtragem para remoção de faixas de ruído. Foi utilizado um sistema de filtragem não-linear, com o "FILTRO MEDIANA" conforme sugestão de Godoy Jr. e Novo (1989).

e) Aquisição de Níveis Médios de Reflectância

Os valores médios de reflectância aparente foram extraídos com o auxílio do programa "AQUISIÇÃO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS". Estes valores foram armazenados para utilização posterior, constituindo-se do CONJUNTO DE DADOS ORBITAIS. Este conjunto, ao término do trabalho, será formado por uma matriz de dados de Reflectância Aparente em quatro faixas espectrais (azul, verde, vermelho, infravermelho) em tantas datas quantas forem as aquisições de dados simultâneos. Este arquivo é transferido para disquetes para integrar uma Base de Dados para Modelagem Estatística (BDME) em conjunto com os dados de campo. Atualmente este banco possui dados referentes à coleta de 04 de julho de 1989 e 20 de julho de 1989.

2.2.2.6 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Os dados de campo e os dados de reflectância aparente que integram o BDME foram submetidos a dois tipos de tratamento estatístico.

a) Análise de Correlação Simples dos Dados de Campo

Os parâmetros limnológicos de campo foram submetidos a análises de correlação simples. O primeiro tipo de análise teve como objetivo avaliar as estruturas de correlação entre os diferentes parâmetros limnológicos data a data. Deste modo, foram obtidas, para os dados de inverno, 6 matrizes de correlação entre as variáveis. Estas matrizes se encontram anexas a este relatório. A análise preliminar das matrizes é apresentada na Seção de RESULTADOS PRELIMINARES.

b) Análise de Correlação Simples - Dados de Campo versus Dados de Reflectância Aparente.

Os dados de reflectância aparente nas bandas TM1, TM2, TM3, TM4, referentes às passagens de 04 de julho de 1989 e 20 de julho de 1989 foram correlacionados com os parâmetros de campo na respectiva data.

c) Desenvolvimento de Modelos Estatísticos

Esta etapa ainda não foi realizada em relação aos dados de INVERNO, mas o método já foi testado para o conjunto de dados de julho de 1988 e encontra-se descrito em Novo e Braga (1990).

2.2.2.7 - GERAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS

Estes mapas serão gerados tanto através do SIG quanto através do SITIM. Os procedimentos a ser utilizados no SGI encontram-se descritos em Pereira Filho (1990), e os procedimentos a ser utilizados no SITIM encontram-se descritos em Godoy e Novo(1989) e Novo et al. (1990c).

OBS.: As técnicas de correção atmosférica das imagens não foram utilizadas devido à ausência de dados ao nível de aeronave. Estão sendo estudadas alternativas de correção atmosférica que serão testadas oportunamente. Dentre os métodos a serem testados destaca-se o de Chavez (1989), utilizado por Pereira Filho (1990).

2.2.3 - MÉTODO DE INTEGRAÇÃO DE DADOS EM SISTEMA GEOGRÁFICO DE INFORMAÇÕES- SGI

2.2.3.1 - AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS LIMNOLÓGICOS

Os dados limnológicos que compõem o **Banco de Dados Limnológicos Georreferenciados de Barra Bonita** foram coletados em 30 estações amostrais selecionadas, em duas épocas do ano: verão e inverno. Os critérios de seleção das estações amostrais levaram em conta os resultados da análise de dados históricos sobre a região (Novo e Tudisi, 1990; Novo et al., 1990c). Estas análises demonstraram que o reservatório apresenta basicamente quatro massas d'água distintas: a do braço do rio Tietê, a do braço do rio Piracicaba, a da zona de mistura (confluência dos rios Tietê e Piracicaba) e a do corpo principal do reservatório. As imagens de satélite permitiram identificar, entretanto, variações óticas no interior dessas massas de água numa mesma data e modificações em sua configuração espacial do inverno para o verão. Estas diferenças óticas pareceram ser mais acentuadas nas regiões próximas às confluências de rios que drenam para o reservatório. Assim sendo, foram alocadas estações amostrais que alternadamente contemplavam locais de confluência entre a represa e seus tributários locais sem tais confluências. Com isso estariam disponíveis dados para testar hipóteses quanto à importância relativa de fontes pontuais e não-pontuais de poluição. A Figura 2.4 apresenta a localização espacial das estações amostrais.

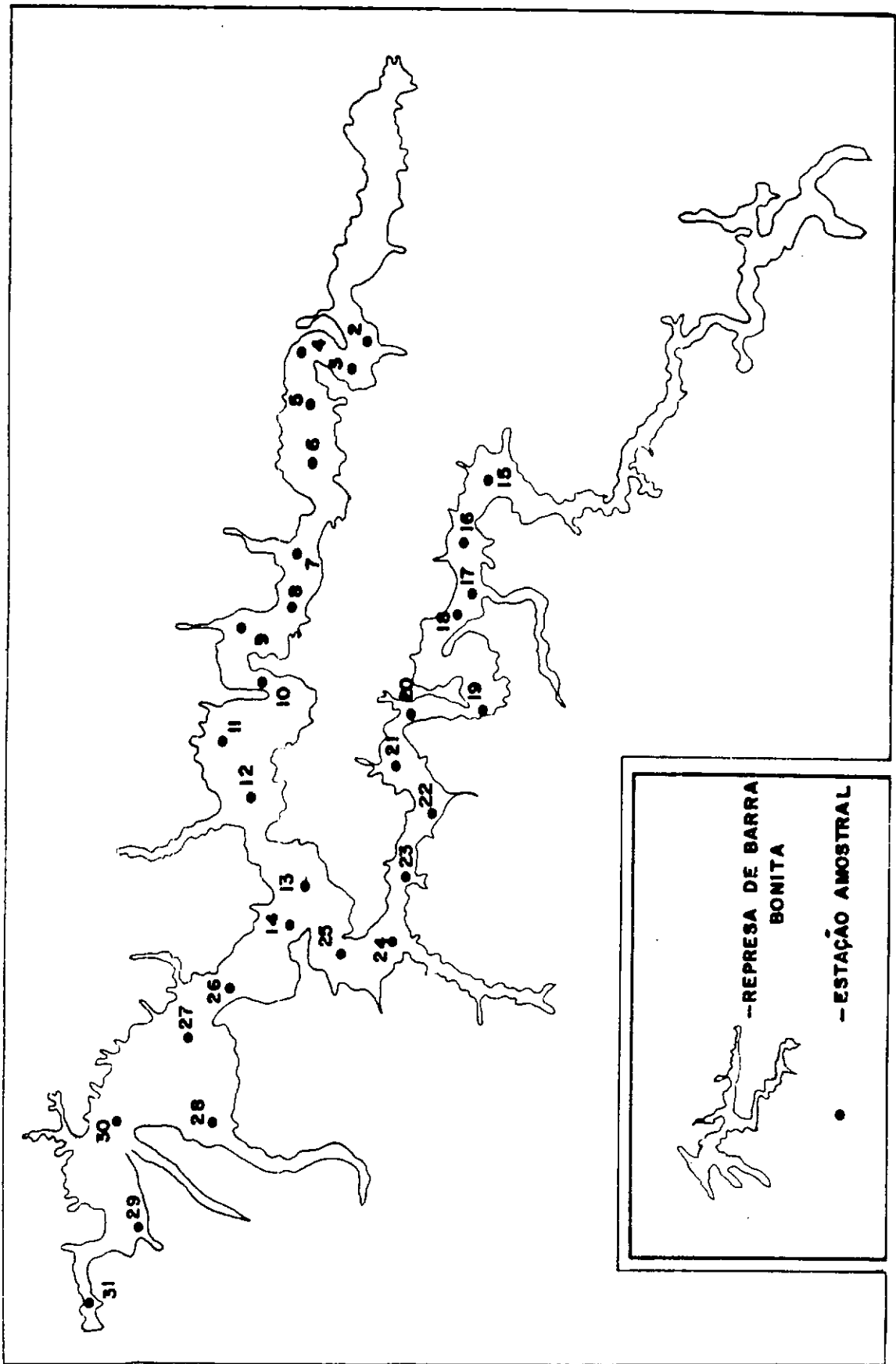


Fig. 2.4 - Localização das estações amostrais.

As variáveis medidas em cada estação amostral foram selecionadas tendo em vista dois aspectos: 1 - a necessidade de se caracterizar o corpo d'água em termos de suas propriedades físico-químicas e biológicas; e 2 - a necessidade de se relacionar essas propriedades aos dados coletados por satélite.

Como já se encontra evidenciado na literatura (Kirk, 1986), a informação detectada pelos sensores remotos se limita à profundidade de atenuação da luz pela água. Assim, abaixo da profundidade Secchi, a composição da água não interfere em seu espectro de reflexão. Com isso, as amostras d'água para análise se limitaram à camada de água contida entre a superfície e a profundidade Secchi. Como já foi dito, em algumas estações amostrais e em algumas datas foram feitas coletas em várias profundidades, mas para a integração com dados de sensoriamento remoto só são consideradas as informações de superfície. Foram também coletados dados de luz e de temperatura na coluna d'água, os quais serão objeto de análise em outros relatórios. As variáveis medidas foram: nitrogênio em suas diferentes formas (nitrato, nitrito, amônia, íon amônio, e total); fósforo (fosfato dissolvido, ortofosfato, e fosfato total); sílica; sólidos totais em suspensão (orgânico, inorgânico e total); e clorofila (pigmentos totais). Em campo foram tomadas medidas de profundidade Secchi, temperatura e luz submersa. As amostras foram coletadas todas num intervalo de tempo de aproximadamente duas horas em relação à passagem do LANDSAT-5. Os aspectos metodológicos que envolveram a análise dos dados em laboratório se encontram em Calijuri (1988) e os aspectos operacionais das missões de coleta simultânea à passagem do satélite já foram discutidos na seção 2.2.2.2.

Foram realizadas até o momento seis missões de campo referentes ao Inverno de 1989, quatro missões de campo referentes ao verão de 1989/1990 e três missões de campo referentes ao inverno de 1990. Os dados apresentados neste relatório se referem às seis missões do inverno de 1989. As demais datas ainda estão sendo objeto de análises preliminares antes de serem integradas ao sistema de informações.

2.2.3.2 - SISTEMA DE INFORMAÇÕES LIMNOLÓGICAS GEORREFERENCIADAS DE BARRA BONITA

a) Definição do Projeto

Como foi mencionado na seção 2.1.3 deste relatório, a entrada de dados georreferenciados no SGI/INPE

se faz a partir da definição de um Projeto, o qual reúne dados sobre a região geográfica de interesse. A área de interesse neste estudo foi definida como sendo a bacia de captação imediata do reservatório, ou seja, o conjunto de bacias de até 5^a ordem (Horton, 1945) que drenam diretamente para aquele corpo d'água. Em sentido montante, a área foi limitada pelo início do alargamento dos braços do reservatório. Não foi incluída toda a área de nascente dos rios Piracicaba e Tietê porque se partiu da idéia de que a contribuição das respectivas bacias estaria sumariada pelas características da água destes dois principais rios formadores do reservatório. A definição da ordem de grandeza das bacias de drenagem foi baseada nas considerações de Wishmeier e Smith (1978) que propuseram o conceito de "delivery ratio" ou razão de entrada de material num dado corpo d'água em relação ao que é produzido em sua bacia de captação. Segundo os autores esta razão varia com uma potência de 0,2 em relação ao tamanho da bacia de drenagem. Entretanto, a distância da área de produção de material em relação ao corpo d'água também tem um grande impacto sobre o volume de entrada do material. Sivertum et al. (1988) propõem o conceito de zona de drenagem tal que a contribuição de uma bacia seja inversamente proporcional à sua distância. Com estes aspectos em mente, a área geográfica do projeto foi definida pelas coordenadas geográficas de 22°15'LS a 23°00'LS e 48°00'LO a 48°30'LO.

b) Definição dos Planos de Informação do Projeto

Como na primeira fase deste estudo serão analisados dados referentes ao reservatório apenas, foi então definido um Plano de Informação contendo apenas os limites do reservatório. Este plano foi extraído de cartas topográficas, na escala 1:50.000. Os demais planos de informação a integrar o banco de dados limnológicos foram os dados referentes a 13 variáveis limnológicas em seis diferentes datas e dados batimétricos.

c) Entrada de Informações

O Plano de Informação referente aos limites do reservatório foi digitalizado a partir da carta topográfica, sendo originalmente um PI de categoria vetorial, do tipo polígono.

Os PIs referentes aos dados limnológicos entraram no sistema na categoria "Modelo Numérico do Terreno" (MNT). As coordenadas geográficas das estações amostrais foram determinadas a partir das cartas

topográficas. O valor de cada variável pode ser posteriormente associado a pares de coordenadas. Para isso foram criados arquivos no formato ASCII, os quais foram transformados para o formato SGI (Engespaço, 1989). Este procedimento permitiu a rápida entrada de dados no sistema.

Como o SGI pode incorporar um número máximo de 50 PIs por Projeto, e o número de PIs de INVERNO (6 datas x 13 variáveis limnológicas + PI limite do reservatório + PI batimetria = 80 PIs de dados brutos) excedia a capacidade do Sistema, criou-se um código para cada data e os PIs referentes a uma determinada data eram introduzidos no Projeto, copiados em disquetes e removidos do projeto. Assim, para cada data, o Projeto está associado a um arquivo PRJ com a relação dos PIs referentes àquela data. Com isso, pode-se entrar com todos os dados e ainda preservar espaço de memória para os planos derivados das manipulações posteriores. A Tabela 2.1 apresenta os parâmetros adotados para a geração dos PIs limnológicos.

TABELA 2.1

PARÂMETROS ADOTADOS NA GERAÇÃO DE GRADE REGULAR

| Parâmetro | Características do Projeto |
|--|--|
| Retângulo envolvente da região interpolada (coordenadas UTM em metros) | xmin = 753.000 xmax = 808.000 ymin = 7.482.000 ymax = 7.590.000 |
| Tamanho da Grade | número de linhas = 40 número de colunas = 80 |
| Tipo de Interpolador | mais próximo por quadrante/cota $w = 1/d^{**n}$ onde: w = função peso d = distância euclidiana |
| Expoente da função peso | n = 1 |

O PI referente à batimetria da represa também entrou na categoria MNT. Tendo em vista a limitação dos dados originais de batimetria, os quais se referiam a seções transversais equidistantes de 10 km ou mais, houve necessidade de uma manipulação preliminar envolvendo interpolação. Como parte ainda da entrada de dados, os PIs referentes às variáveis limnológicas foram organizados para facilitar a geração de grade regular.

Com relação ao PI batimetria os parâmetros finais ainda não foram definidos, pois estão sendo testados interpoladores adequados às limitações dos dados originais.

O tipo de interpolador utilizado para a geração de grade regular foi selecionado tendo em vista os seguintes pressupostos: a - o gradiente horizontal da concentração de uma dada variável limnológica é mínimo; b - qualquer ponto do corpo d'água tenderá a ter sua medida de concentração de uma dada variável igual à da estação de coleta mais próxima. Deste modo, o interpolador do tipo selecionado permitiu que o valor de cada estação amostral fosse expandido para sua vizinhança.

d) Conversão de Formato de Dados

Com o auxílio do programa "CONVERSÃO VETOR-VARREDURA" pode-se converter o Plano Limite do Reservatório (RES) para o formato raster. Essa transformação gera uma imagem a partir dos dados vetoriais. Para isso deve-se fornecer as coordenadas da área envolvente e a resolução da imagem resultante.

A conversão de formato MNT para o formato imagem é obtida através do processo de "REFINAMENTO DE GRADE". A Tabela 2.2 resume os parâmetros adotados para o refinamento da grade regular dos PIs limnológicos.

TABELA 2.2

PARÂMETROS ADOTADOS NO REFINAMENTO DE GRADE REGULAR

| Parâmetro | Característica Adotada no Projeto |
|----------------------|---|
| Janela de Imagem | xmin= 753.000 xmax= 808.000 ymin= 7.482.000 ymax 7.590.000 |
| Resolução da Imagem | Vertical = 300m Horizonatal= 300m |
| Tipo de Interpolador | Bilinear |

e) Manipulação dos Planos de Informações Limnológicas

Um aspecto crucial na manipulação de dados é o da classificação. E a classificação, por sua vez, depende dos objetivos do estudo em questão, ou do que se fará com o banco de dados. É claro que o conjunto de PIs gerados na etapa anterior poderá ser manipulado segundo diferentes critérios. No presente relatório, serão apresentadas as manipulações dos PIs tendo em vista responder às seguintes questões de interesse neste estudo: 1 - como as diferentes variáveis limnológicas se comportaram ao longo do Inverno?; 2 - houve alguma tendência definida de aumento ou diminuição de nutrientes, sólidos em suspensão ou clorofila no decorrer do Inverno?; 3 - essa tendência é espacialmente homogênea?; e 4 - existe uma situação típica de inverno para todo o reservatório, ou as variabilidades temporal e espacial não permitem tal afirmação?

Para responder a essas questões um dos primeiros aspectos é o da definição do número e do intervalo de classes. Se o objetivo é comparar o comportamento da represa ao longo do tempo, torna-se necessário que as classes sejam temporalmente uniformes. Para isto, os dados limnológicos de inverno foram tabulados e identificados os valores mínimos e máximos de cada

variável para cada data. O menor e o maior valor de cada parâmetro foi tomado como limite para a partição em cinco classes. Os intervalos das classes são constantes para uma mesma variável, sendo que o número cinco levou em conta as sugestões de Silvertun et al. (1988), de que não se deve trabalhar com um número excessivo de classes. Ao se escolher um número de classes igual a cinco, teve-se em mente também manter um grau relativamente baixo de generalização.

Este sistema de classificação não está isento de defeitos e nem é definitivo. Ele servirá para que em análises mais refinadas se adotem classificações que levem em conta o significado ecológico das classes. Esse tipo de classificação não foi adotado por que, até o momento, as classificações disponíveis se referem a sistemas aquáticos de regiões temperadas, classificações estas que muitas vezes não podem ser transpostas para regiões tropicais (Esteves, 1988).

Após a definição das classes e seus intervalos os PIs originais foram classificados utilizando-se a opção FATIAR MNT. Através desta opção criam-se novos PIs da categoria vetorial.

Como no processo de geração de grade regular, os valores das variáveis limnológicas são extrapolados para toda a área do Projeto Ativo, os PIs classificados são submetidos a um tipo de manipulação que permite restringir a classificação ao limite do reservatório. Para isto foi utilizada a opção de SOBREPOSIÇÃO DE PIs. Através desta opção é gerado um novo PI a partir da combinação de dois PIs: o PI classificado e o PI com o limite do reservatório (PI Res). No caso específico, a operação lógica de sobreposição é a Intersecção do Plano "Res" com cada plano classificado. Os planos resultantes apresentam apenas a área do reservatório classificada.

Outro tipo de manipulação a que foram submetidos os PIs envolveu a "COMBINAÇÃO DE GRADES" que permitiu calcular a razão entre duas variáveis limnológicas, como a razão N/P de grande interesse para o manejo de reservatórios (Esteves, 1988). Esta razão é calculada utilizando-se a opção "DIVISÃO DE GRADES", que permite dividir ponto a ponto um PI pelo outro, criando um novo PI. O PI resultante deve ser convertido para o formato raster através da opção "REFINAR GRADE REGULAR", podendo posteriormente ser classificado como um MNT.

2.3 - RESULTADOS PRELIMINARES

2.3.1 - REGISTRO DE IMAGENS

Um dos passos fundamentais do projeto foi gerar um conjunto de "Imagens de Referência", ou seja, imagens corrigidas geometricamente em relação às cartas topográficas na escala 1:50.000. A Figura 2.5 representa um dos módulos de trabalho corrigidos geometricamente nas bandas TM1, TM2, TM3 e TM4.



Fig. 2.5 - Módulos corrigidos geometricamente.

A Tabela 2.3 apresenta os resultados do registro de cada um dos módulos de 04 de julho de 1989.

TABELA 2.3
PRECISÃO DO REGISTRO IMAGEM/CARTA
(em pixel)

| MÓDULO | ERRO HORIZONTAL | ERRO VERTICAL | ERRO TOTAL |
|--------|-----------------|---------------|------------|
| MRD1 | 1,38 | 0,75 | 1,51 |
| MR2 | 0,84 | 0,55 | 0,99 |

A Tabela 2.4 apresenta o resultado do registro dos módulos MRD e MRE de 20 de julho de 1989.

TABELA 2.4
PRECISÃO DO REGISTRO IMAGEM/CARTA

| MÓDULO | ERRO HORIZONTAL | ERRO VERTICAL | ERRO TOTAL |
|--------|-----------------|---------------|------------|
| MRD | 1,256 | 0,650 | 1,414 |
| MRE | 1,013 | 1,026 | 1,442 |

A Tabela 2.5 apresenta o resultado do registro Imagem x Carta e Imagem x Imagem para os módulos de integração ao SGI. Estes módulos possuem uma resolução de 60m x 60m.

TABELA 2.5
PRECISÃO DE REGISTRO DOS MÓDULOS DE INTEGRAÇÃO AO SGI

| TIPO DE REGISTRO | ERRO HORIZONTAL | ERRO VERTICAL | ERRO TOTAL |
|---|-----------------|---------------|------------|
| Carta x Imagem 20/julho | 0,709 | 0,371 | 0,801 |
| Imagem x Imagem 04/julho x 20/julho | 0,660 | 0,509 | 0,833 |

Pela análise das tabelas pode-se observar que os ajustes entre carta - imagem e imagem - imagem são bastantes bons com erros internos inferiores a 45 metros. As diferenças de ajuste entre os módulos se devem às diferenças de disponibilidade de pontos de controle no terreno em cada módulo e às variações nas deformações das imagens originais, que são variáveis de uma data para outra.

2.3.2 - ESTRUTURAS DE CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DE CAMPO

As correlações entre as variáveis de campo podem ser observadas nos Apêndices A, B, C, D, E e F. Através de sua análise, pode-se observar que certas estruturas de relacionamento entre os parâmetros limnológicos se mantêm ao longo de todas as coletas, com exceção das correlações nas datas referentes às missões 1 e 2. Estas missões, como já foi mencionado na metodologia, tiveram um caráter de teste para a avaliação do tempo necessário à coleta de dados, parâmetros a ser coletados, etc.

Assim sendo, pares de variáveis correlacionadas em todas as datas, excetuando-se as duas primeiras, foram considerados indicadores de estruturas de correlação válidas para todo o período de inverno, pelo menos. Com o decorrer do projeto e o processamento dos dados de verão, poder-se-á avaliar se existem variações sazonais nessas estruturas e de que tipo seriam.

Com relação aos dados de inverno, podem-se definir os seguintes pares de variáveis correlacionadas no campo, com um nível de significância (α) de 0,025: PDIS e SIO₂, PDIS e NO₃, NTOT e NO₃, SEC e NO₃, SEC e MI, SEC e TSS, MI e TSS e MO e TSS.

PDIS representa o fósforo sob a forma de Fosfato Total Dissolvido (Esteves, 1988) que inclui o fosfato orgânico dissolvido e o fosfato inorgânico dissolvido. O fosfato presente em sistemas aquáticos continentais tem sua origem nas rochas da bacia de drenagem, nos esgotos domésticos e industriais e nos fertilizantes agrícolas. Como no inverno a precipitação é pequena (índices pluviométricos de até 0mm no mes de julho), o fosfato encontrado no reservatório pode estar associado aos esgotos urbanos e industriais. O Reservatório de Barra Bonita é alimentado pela Bacia do rio Piracicaba e do rio Tietê, as quais drenam uma das regiões mais densamente povoadas do território brasileiro (185hab/km²).

O parâmetro SiO_2 representa a sílica biogênica (incorporada ao fitoplâncton), e sua alta correlação com PDIS pode estar associada ao fato de que este representa um dos elementos que limitam a produtividade primária.

O parâmetro NTOT representa o nitrogênio presente na água em todas as suas formas e o NO_3 representa o nitrogênio presente sob a forma de nitrato. O nitrato é um dos elementos mais importantes do sistema aquático, pois representa uma das principais fontes de nitrogênio para os produtores primários. A alta correlação entre NTOT e NO_3 indica que a principal forma de nitrogênio presente no sistema é o nitrato.

A correlação observada entre TSS e SEC atesta a forte influência do material em suspensão no aumento da turbidez da água. A correlação entre SEC e MI indica o papel do particulado inorgânico no aumento da turbidez, o que é esperado devido aos maiores índices de refração das partículas inorgânicas, as quais têm maior poder de espalhar a radiação que penetra no corpo d'água.

As correlações entre MI e TSS e entre MO e TSS também são esperadas pois ambos representam frações do TSS ($TSS=MI+MO$). Outras correlações observadas em algumas das datas isoladas caracterizam condições específicas do meio em determinados momentos, e serão úteis por ocasião da análise dos resultados dos testes de correlação entre dados de campo e dados orbitais.

2.3.3 - CORRELAÇÕES ENTRE DADOS DE CAMPO E DADOS TM/LANDSAT

Das seis datas de coleta apenas duas puderam contar com dados TM de boa qualidade (04 de julho e 20 de julho).

Até o presente momento foram analisados os dados referentes a 04 de julho de 1989, cujos resultados encontram-se no Apêndice G. Foram observadas as seguintes estruturas de correlação entre as variáveis ($\alpha=0,025$): NO_3/B_2R , NO_3/B_3R , PO_4/B_1R , B_2R , B_3R , $PTOT/B_3R$, B_4R , NH_4/B_2R , $NTOT/B_2R$, $CLTOT/B_1R$, B_2R , B_3R , SEC/B_1R , B_2R , B_3R , B_4R .

Dentre estes parâmetros de qualidade de água, a concentração de pigmentos (CLTOT) e a profundidade Secchi (SEC) são os melhores indicadores das condições gerais de um corpo d'água: o primeiro por indicar a produtividade primária e o segundo por fornecer uma medida da profundidade da camada eufótica.

Estes resultados permitirão, numa próxima etapa, a elaboração de algoritmos para cálculo destes parâmetros em todo o reservatório. Os resultados de outras coletas de dados de campo e orbitais simultâneos atestarão a validade destas primeiras relações.

2.3.4 - BANCO DE DADOS LIMNOLÓGICOS GEORREFERENCIADOS

A relação dos PIs originais encontra-se na Tabela 2.6. Eles estão organizados por data e número da variável limnológica. Deste modo, o PI r304, por exemplo, se refere à variável limnológica 04, medida na data 3, ou seja, 04 de julho de 1989.

A partir da manipulação de alguns dos PIs originais foram gerados os PIs com a classificação temática das variáveis limnológicas. Os dados da Tabela 2.7 foram utilizados para definir os intervalos de classe. Nela se encontram os valores mínimos e máximos observados nas estações amostrais para cada variável limnológica em cada uma das datas estudadas. Uma análise da Tabela 2.7 permite verificar que a concentração de certas variáveis limnológicas tende a crescer ao longo do período de inverno, principalmente em relação aos máximos. Por exemplo, a concentração máxima de NO₂ aumenta de 5,45µg/l em maio para 163,28µg/l em setembro, ou seja, cerca de 30 vezes. Outras variáveis, entretanto, não apresentam um aumento consistente no tempo. O aumento nas concentrações máximas de nitrito (NO₂) de maio para setembro pode estar associado a uma redução das concentrações de oxigênio dissolvido na água. O nitrito é encontrado em baixas concentrações em ambientes oxigenados, ocorrendo em altas concentrações no hipolimnio de lagos eutróficos (Esteves, 1988). Isto indicaria um aumento do nível trófico do reservatório de Barra Bonita ao longo da estação seca principalmente em decorrência do maior tempo de retenção da água no reservatório, fenômeno já observado por Calijuri (1988).

TABELA 2.6

RELAÇÃO DOS PIs ORIGINAIS JÁ INTEGRADOS AO BANCO DE DADOS
LIMNOLÓGICOS DE BARRA BONITA

| Data | Símbolo | Variável | Símbolo | Nome de Arquivo |
|--------|---------|----------|---------|-----------------|
| 01/05 | 1 | NO2 | 02 | r102 |
| | | NO3 | 03 | r103 |
| | | SIO2 | 04 | r104 |
| | | PO4 | 05 | r105 |
| | | PDIS | 06 | r106 |
| | | PTOTAL | 07 | r107 |
| | | NH4 | 08 | r108 |
| | | NTOTAL | 09 | r109 |
| | | SST | 10 | r110 |
| | | MI | 11 | r111 |
| | | MO | 12 | r112 |
| | | CLOR | 13 | r113 |
| | | 17/05 | 2 | NO2 |
| NO3 | 03 | | | r203 |
| SIO2 | 04 | | | r204 |
| PO4 | 05 | | | r205 |
| PDIS | 06 | | | r206 |
| PTOTAL | 07 | | | r207 |
| NH4 | 08 | | | r208 |
| NTOTAL | 09 | | | r209 |
| SST | 10 | | | r210 |
| MI | 11 | | | r211 |
| MO | 12 | | | r212 |
| CLOR | 13 | | | r213 |

(continua)

Tabela 2.6 - Continuação

| | | | | |
|-------|---|--------|----|------|
| 04/07 | 3 | NO2 | 02 | r302 |
| | | NO3 | 03 | r303 |
| | | SIO2 | 04 | r304 |
| | | PO4 | 05 | r305 |
| | | PDIS | 06 | r306 |
| | | PTOTAL | 07 | r307 |
| | | NH4 | 08 | r308 |
| | | NTOTAL | 09 | r309 |
| | | SST | 10 | r310 |
| | | MI | 11 | r311 |
| | | MO | 12 | r312 |
| | | CLOR | 13 | r313 |
| 20/07 | 4 | NO2 | 02 | r402 |
| | | NO3 | 03 | r403 |
| | | SIO2 | 04 | r404 |
| | | PO4 | 05 | r405 |
| | | PDIS | 06 | r406 |
| | | PTOTAL | 07 | r407 |
| | | NH4 | 08 | r408 |
| | | NTOTAL | 09 | r409 |
| | | SST | 10 | r410 |
| | | MI | 11 | r411 |
| | | MO | 12 | r412 |
| | | CLOR | 13 | r413 |

(continua)

Tabela 2.6 - Conclusão

| | | | | |
|--------|----|--------|----|------|
| 21/08 | 5 | NO2 | 02 | r502 |
| | | NO3 | 03 | r503 |
| | | SIO2 | 04 | r504 |
| | | PO4 | 05 | r505 |
| | | PDIS | 06 | r506 |
| | | PTOTAL | 07 | r507 |
| | | NH4 | 08 | r508 |
| | | NTOTAL | 09 | r509 |
| | | SST | 10 | r510 |
| | | MI | 11 | r511 |
| | | MO | 12 | r512 |
| | | CLOR | 13 | r513 |
| | | 22/09 | 6 | NO2 |
| NO3 | 03 | | | r603 |
| SIO2 | 04 | | | r604 |
| PO4 | 05 | | | r605 |
| PDIS | 06 | | | r606 |
| PTOTAL | 07 | | | r607 |
| NH4 | 08 | | | r608 |
| NTOTAL | 09 | | | r609 |
| SST | 10 | | | r610 |
| MI | 11 | | | r611 |
| MO | 12 | | | r612 |
| CLOR | 13 | | | r613 |

TABELA 2.7

VARIAÇÕES MÁXIMAS E MÍNIMAS DAS VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS NAS ESTAÇÕES AMOSTRAIS DO RESERVATÓRIO DA UHE BARRA BONITA

| VARIÁVEL | DATA | | | | | | |
|--------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | LIMNOLÓGICA | 01/05 | 17/05 | 04/07 | 20/07 | 21/08 | 22/09 |
| NO2 g/l | MIN | 1,48 | 1,1 | 0,82 | 0,98 | 1,23 | 3,76 |
| | MAX | 5,45 | 17,31 | 45,05 | 26,02 | 41,02 | 163,28 |
| NO3 g/l | MIN | 542,20 | 483,17 | 234,30 | 199,80 | 268,25 | 674,48 |
| | MAX | 921,00 | 1.533,94 | 1.594,00 | 1.705,00 | 1.573,15 | 1.629,67 |
| SI02 mg/l | MIN | 5,61 | 4,87 | 2,95 | 3,96 | 2,64 | 3,20 |
| | MAX | 6,81 | 6,07 | 6,34 | 5,99 | 5,53 | 4,93 |
| PO4 g/l | MIN | 5,70 | 4,64 | 3,33 | 2,27 | 4,91 | 2,1 |
| | MAX | 19,68 | 11,90 | 11,50 | 12,82 | 29,97 | 19,74 |
| PDIS ug/l | MIN | 18,08 | 12,64 | 10,54 | 9,43 | 13,09 | 11,28 |
| | MAX | 35,10 | 17,80 | 24,21 | 23,93 | 46,82 | 46,40 |
| PTOT g/l | MIN | 28,56 | 12,64 | 16,25 | 43,43 | 26,27 | 18,90 |
| | MAX | 45,72 | 17,80 | 43,72 | 16,54 | 67,47 | 56,47 |
| NH4 g/l | MIN | 4,27 | 2,78 | 0,56 | 2,04 | 7,97 | 0,79 |
| | MAX | 9,45 | 81,24 | 344,01 | 247,01 | 346,98 | 250,51 |
| NTOT g/l | MIN | 1.007,20 | 1.953,00 | 909,85 | 671,80 | 403,4 | 1.215,46 |
| | MAX | 1.554,25 | 3.967,00 | 2.379,00 | 3.001,00 | 3.544,77 | 2.468,85 |
| MI g/l | MIN | 3,76 | 1,19 | 1,89 | 1,01 | 2,14 | 0,86 |
| | MAX | 5,02 | 3,79 | 8,40 | 5,22 | 12,76 | 6,69 |
| MO mg/l | MIN | 1,68 | 1,30 | 0,34 | 0,47 | 1,29 | 1,30 |
| | MAX | 2,56 | 2,44 | 2,88 | 2,38 | 5,41 | 4,28 |
| TSS mg/l | MIN | 5,44 | 2,49 | 3,19 | 1,48 | 3,43 | 1,94 |
| | MAX | 7,36 | 5,09 | 11,28 | 6,49 | 14,68 | 8,82 |
| CLTOT g/l | MIN | 8,24 | 2,53 | 3,30 | 0,96 | 5,93 | 3,06 |
| | MAX | 12,31 | 8,24 | 12,31 | 8,24 | 47,25 | 56,83 |

Em geral houve um aumento nos níveis de nitrogênio em suas diferentes formas ao longo do período de inverno. Os níveis de fósforo, entretanto, não apresentaram esta tendência. Os níveis de fosfato total variaram entre 16µg/l e 68µg/l, aproximadamente, na estação de inverno, mas não mostraram tendência de aumento ao longo da mesma. Estes níveis de fósforo são bastante elevados e colocam o reservatório na categoria de eutrófico em quase todo o período analisado, se for adotada a classificação de Vollemweider ou a classificação da United States Environmental Protection Agency (Esteves, 1988). Como resultado do aumento de nitrogênio ao longo do inverno e dos níveis altos de fósforo total, a clorofila total também aumentou sensivelmente.

Devido à elevada colinearidade encontrada entre certas variáveis limnológicas, foram selecionadas apenas algumas para análise preliminar, quais sejam, NO₃, PTOT, NH₄, NTOT, SST, MI, MO e CLOR. Devido ao número insuficiente de amostras nas datas 1 e 2, a manipulação dos dados ficou limitada, até o momento, a apenas 4 das 6 datas de coleta.

A Tabela 2.8 apresenta cada uma das variáveis limnológicas classificadas com seus respectivos intervalos de classificação, válidos para todas as datas.

A Figura 2.6 apresenta um exemplo de um PI limnológico após o processo de refinamento de grade (criação de um arquivo imagem), ao qual foi superposto um PI com a classificação de uma dada variável limnológica.

A Figura 2.7 é um exemplo de PI limnológico após o processo de classificação. Foram gerados até o momento 4 PIs com a distribuição de fósforo no reservatório de Barra Bonita. O PI do exemplo se refere aos dados coletados em 20 de julho de 1989. Nesta data as concentrações estiveram basicamente distribuídas em três classes principais. As mais baixas concentrações, no corpo principal do reservatório; e as concentrações mais elevadas, nos braços do Tietê e Piracicaba. Esta figura ilustra claramente a importância da espacialização dos dados limnológicos, a qual permite identificar regiões do corpo d'água em que se verificam as diferentes concentrações.

TABELA 2.8

INTERVALOS DE CLASSE DAS VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS

| Variável | Intervalo de Classe |
|-------------------------------|-------------------------|
| NITRATO (NO ₃) | 0,00 - 350,00 ug/l |
| | 351,00 - 701,00 ug/l |
| | 702,00 - 1 052,00 ug/l |
| | 1 052,00 - 1403,00 ug/l |
| | 1 404,00 - 1705,00 ug/l |
| ÍON AMÔNIO (NH ₄) | 0,56 - 70,00 ug/l |
| | 71,00 - 141,00 ug/l |
| | 142,00 - 212,00 ug/l |
| | 213,00 - 283,00 ug/l |
| | 284,00 - 354,00 ug/l |
| FÓSFORO TOTAL (PTOT) | 0,00 - 13,00 ug/l |
| | 14,00 - 26,00 ug/l |
| | 27,00 - 40,00 ug/l |
| | 41,00 - 54,00 ug/l |
| | 55,00 - 68,00 ug/l |
| NITROGÊNIO TOTAL | 0,00 - 710,00 ug/l |
| | 711,00 - 1421,00 ug/l |
| | 1422,00 - 2132,00 ug/l |
| | 2133,00 - 2843,00 ug/l |
| | 2844,00 - 3554,00 ug/l |

(continua)

Tabela 2.8 - Conclusão

| | | |
|------------------------------|---------|------------|
| TOTAL DE SÓLIDOS EM | 0,00 - | 2,80 mg/l |
| SUSPENSÃO (TSS) | 2,90 - | 5,70 mg/l |
| | 5,80 - | 8,60 mg/l |
| | 8,70 - | 11,50 mg/l |
| | 11,50 - | 14,00 mg/l |
| MATERIAL INORGÂNICO | 00,00 - | 02,55 mg/l |
| (MI) | 02,56 - | 05,11 mg/l |
| | 05,12 - | 07,66 mg/l |
| | 07,67 - | 10,21 mg/l |
| | 10,22 - | 12,78 mg/l |
| MATERIAL ORGÂNICO | 00,00 - | 00,85 mg/l |
| (MO) | 00,86 - | 01,71 mg/l |
| | 01,72 - | 02,57 mg/l |
| | 02,58 - | 03,42 mg/l |
| | 03,43 - | 04,38 mg/l |
| CLOROFILA TOTAL | 0,00 - | 11,36 ug/l |
| (CLOR) | 11,37 - | 22,73 ug/l |
| | 22,74 - | 34,00 ug/l |
| | 34,01 - | 45,37 ug/l |
| | 45,38 - | 56,74 ug/l |
| RAZÃO NITROGÊNIO/ FÓSFORO | 5 - | 20 |
| | 21 - | 41 |
| | 42 - | 63 |
| | 64 - | 85 |
| | 86 - | 104 |



Fig. 2.6 - Exemplo de processamento ao qual foram submetidos os dados limnológicos no Sistema de Informações Geográficas.

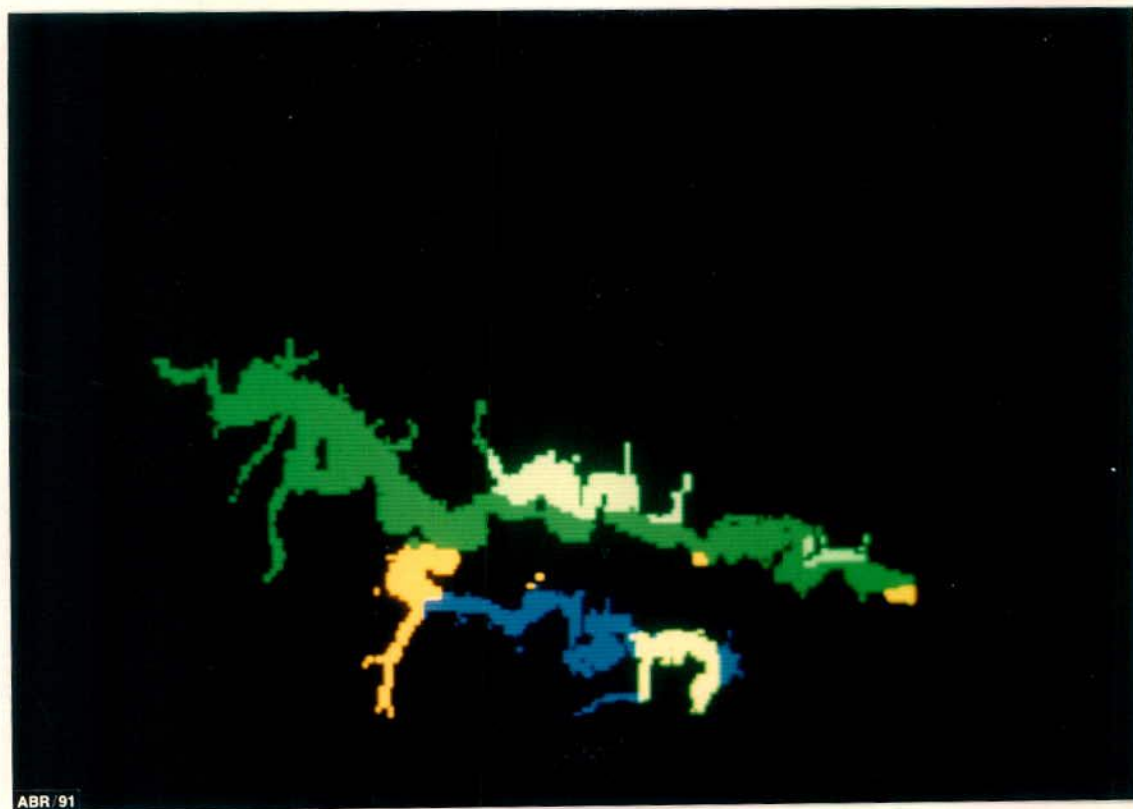


Fig. 2.7 - Exemplo de PI limnológico após classificação.

2.4 - ATIVIDADES A SEREM REALIZADAS NAS PRÓXIMAS ETAPAS DO ESTUDO

Como foi mencionado na introdução deste relatório, a criação de um banco de dados limnológicos tem a função de melhorar a compreensão das relações entre a reflectância da água detectada por sensores remotos e as propriedades da água. Assim sendo, as próximas etapas da pesquisa estarão voltadas para a incorporação dos resultados do processamento de imagens TM/LANDSAT. Durante o período correspondente ao Inverno de 1989 foram obtidas duas imagens (04 e 20 de julho) com qualidade adequada. Estas imagens já se encontram registradas à base de dados limnológicos, não tendo sido entretanto processadas até o momento. O método de processamento já foi desenvolvido e se encontra descrito em Novo et al. (1990b e 1990c)

O cruzamento das informações limnológicas contidas no banco de dados georreferenciados permitirá elucidar de que modo as propriedades limnológicas do reservatório afetam seu espectro refletivo. Este é o primeiro passo para que dados de satélite possam ser usados de modo eficiente no manejo de reservatórios. A partir disso as imagens poderão ser utilizadas para atingir a um outro objetivo de longo prazo do projeto que é o da modelagem das relações entre o estado do sistema aquático e suas condições de uso e ocupação do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, H.M.; Horne, A.J. **Remote Sensing of water Quality in Reservoirs and Lakes in semi-arid climates.** University of California, Berkley, Dec., 1975. 132 p. (NASA-CR-166178).
- Atlas, D.; Bannister, T.T. Dependence of mean spectral extinction coefficient of phytoplankton on depth, water color, and species. **Limnology and Oceanography**, 25(1):157-159, Jan, 1980.
- Austin, R.W. Gulf of Mexico, ocean-color surface-truth measurements. **Boundary-Layer Meteorology**, 18:269-285, 1980.
- Blackwell, R.J. **Image processing developments and applications for water quality monitoring and trophic state determination.** JET PROPULSION LABORATORY, PASADENA, março, 1982, 116 p. (NASA CR 169139).
- Balch, W.M.; Eppley, R.W.; Abbout, M.R.; Reid, F.M.H. Bias in satellite-derived pigment measurements due to coccolithophores and dinoflagellates. **Journal of Plankton Research**, 11(3):575-581, mar, 1989.
- Bartolucci, L.A.; Robinson, B.F.; Silva, L.F. Field measurements of the spectral response of natural waters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 43(5):599-612, mar, 1977.
- Bowker, D.E.; Witte, W.G. Evaluation of ERTS MSS digital data for monitoring water in the lower Chesapeake bay area. In: Sharokhi, F., ed. **Remote sensing of Earth resources.** Tullahoma, University of Tennessee, 1975a 4 p. 591-600.
- Bowker, D.E.; Witte, W.G. An investigation of the waters in the lower Chesapeake Bay Area. 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment. , 1975b, **Proceedings**, p. 411-419.
- Bowker, D.E.; Davis, R.E.; Myrick, D.L.; Stacy, K.; Jones, W.T. **Spectral Reflectance of Natural Targets for Use in Remote Sensing Studies.** Langley Research Center. Virginia, Hampton, 1985. 181 p. (NASA Reference Publication 1139).

- Braga, C.Z.F. **Utilização de imagens dos satélites Landsat-5 e NOAA-9 na identificação de parâmetros físico-químicos da água na Baía de Guanabara.** (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, dez., 1988, 115 p. (INPE-4761-TDL/349).
- Bricaud, A.; Morel, A.; Andre, J.M. Spatial/temporal variability of algal biomass and potential productivity in the mauritanian upwelling zone, as estimated from CZCS data. **Advances in Space Research**, 7(2):53-62, 1987.
- Bricaud, A.; Sathindranath, S. Spectral signatures of substances responsible for the change in ocean colour. **Signatures Spectrales D'objects em Teledétection**, Avignon, 8-11 Sep. 1981, **Proceedings**, Avignon, 1981. p.
- Buiteveld, H.; Jong, F.; Spanhoif, R.; Donze, M. Shape and variability of the absorption spectrum of aquatic humus. In: **Simposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management.** Enschede. Agost, 1986, **Proceedings**, ISPRS. p. 703-705.
- Bukata, R.P.; Bruton, J.E.; Jerome, J.H. The futility of using remotely-determined chlorophyll concentrations to infer acid stress in lakes. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 8(1):38-42, 1982.
- Bukata, R.P.; Bruton, J.E.; Jerome, J.H.; Jain, S.C.; Zwick, H.H. Optical water quality model of Lake Ontario. 2. Determination of chlorophyll a and suspended mineral concentrations in natural waters from submersible and low altitude optical sensors. **Applied Optics**, 20(9):1704-1714, 1981a.
- Bukata, R.P.; Jerome, J.H.; Bruton, J.E. Validation of a five component optical model for estimating chlorophyll a and suspended mineral concentrations in Lake Ontario. **Applied Optics**, 20(20):3472-3473, 1981b.
- Bukata, R.P.; Jerome, J.H.; Bruton, J.E.; Jain, S.C. Non-zero subsurface irradiance reflectance at 670nm from Lake Ontario water masses. **Applied Optics**, 19(15):2487-2488, 1980.

- Cabral, A.P.; Mantovani, J.E.; Costa, M.P.F.; Lima, R.A.F.; Novo, E.M.L.M. Efeitos da concentração e da granulometria na assinatura espectral do material inorgânico em suspensão. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6.**, Manaus, 24-29 Jun. 1990. **Anais.** São José dos Campos, INPE, 1990. v.2. p. 496-504.
- Calijuri, M.C. **Respostas fisioecológicas da comunidade fitoplantônica e fatores ecológicos em ecossistemas com diferentes estágios de entrofização.** (Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, dezembro de 1988.
- Campbell, J.W.; Thomas, J.P. (ed.) **Chesapeake Bay Plume Study-Supeflux 1980.** Hampton, 1981. (NASA/CP-2188) 521 p.
- Carder, K. L.; Steward, R.G.; Paul, J.H.G.; Vargo, G.A. Relationships between chlorophyll and ocean color constituents as they affect remote-sensing reflectance models. **Limnology and Oceanography**, 31(2):403-413, 1986.
- Caselles, V.; Garcia, M.J. Lopez; Soria, J.M. Estudio del estado trofico del lago de la Albufera (Valencia) a partir de Imagenes del Landsat 5 (TM). **I Reunion Científica del grupo de Trabajo en Teledeteccion.** Barcelona, 1986.
- Catts, G.P.; Khorram, S.; Cloern, J.E.; Knight, A.W.; De Gloria, S.D. Remote sensing of tidal chlorophyll a variations in estuaries. **International Journal of Remote Sensing** 6(11):1685-1706, 1985.
- Centrais Elétricas de São Paulo. **Projeto Aguapé.** São Paulo. 1986.
- Chavez, Jr. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 55(9)1285-1294. Sept., 1989.
- Cheshire, H.M.; Khorram, S. Monitoring North Carolina's nutrient-sensitive reservoirs using Landsat TM digital data. ASPRS-AC Annual convention: Remote Sensing, Baltimore, Mar 29-Apr 2, 1987, **Proceedings**, Falls Church - ISPRS-ACM, v.1, p. 47-56.
- Clark, W.J. Cloud cover as a factor in the utilization of Landsat data for limnological research. **Remote Sensing of Environment**, 13(5):453-460, 1983.

- Clarke, G.L.; Ewing, G.C.; Lorenzen, C.J. Spectra of backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration. **Science**, 167:1119-1121, 1970.
- Curran, P.J. Airborne multispectral scanner data for estimating dye dispersion from sea outfalls. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**. Part 2, 83:213-241, 1987.
- Curran, P.J.; Wilkinson, W.B. Mapping the concentration and dispersion of dye from a long sea outfall using digitized aerial photography. **International Journal of Remote Sensing**, 6(11):1735-1748, 1985.
- Curran, P.J.; Novo, E.M.M. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. **Journal of Coastal Research**, 4(3):351-368, 1988.
- Curran, R.J. Ocean colour determination through a scattering atmosphere. **Applied Optics**, 11(8):1857-1866, 1972.
- Davies-Coley, R.J.; Vant, W.N. Absorption of light by yellow substance in freshwater. **Limnology and Oceanography**, 32(2):416-425, 1987.
- Deering, D.W. Field Measurements of Bidirectional Reflectance. In: Asrar, G., ed. **Theory and Applications of Optical Remote Sensing**. New York, Willey, 1989. cap.1, p.14-61, 1989.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Projeto Tietê** DAEE 4(12), 1987, 103 p.
- Deschamps, P.Y.; Viollier, M. Algorithms for ocean colour from space and application to CZCS data. **Advances in Space Research**, 7(2):11-19, 1987.
- Doerffer, R. Applications of a two-flow model for remote sensing of substances in water. **Boundary-Layer Meteorology**, 18(3):221-231, 1980.
- Dupoy, C.; Demarq, H. CZCS as an aid for understanding modalities of the phytoplankton productivity during upwelling of Senegal. **Advances in Space Research**, 7(2):63-71, 1987.

- Duysens, L.N.M. The flattening of the absorption spectrum of suspensions, as compared to that of solutions. **Biochimica et Biophysica Acta**, 19:1-13, 1956.
- Effler, S.W.; Trama, F.S. Changes in light attenuation during filling, stabilization and operation of a reservoir. **Water, Air & Soil Pollution**, 28:(1/2)27-37, 1986.
- Egan, W.G. Water quality determination in the Virgin Islands fun ERTS-A data. In: 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, MI, 1972. **Proceedings**, Ann Arbor, University Michigan, 1972, p. 685-708.
- Engespaço. Sistema de Informações Geográficas: Manual do Usuário. São José dos Campos, 1990.
- Estado de São Paulo - Departamento de Águas e Energia Elétrica - Aproveitamento Hidro-elétrico de Barra Bonita - Rio Tietê, São Paulo, 1965.
- Esteves, F.A.; Camargo, A.F.M. Caracterização do sedimento de 17 represas do Estado de São Paulo com base no teor de feopigmentos, carbono e nitrogênio orgânico. **Ciência e Cultura**, 5:669-674, 1982.
- Esteves, F.A.; Tolentino, M. Identificação e caracterização de alguns grupos de represas do Estado de São Paulo, com base na composição química dos seus sedimentos. **Ciência e Cultura**, 38:540-545, 1986.
- Esteves, F.A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro, Interciência/FINEP, 1988.
- Fischer, J.; Doerffer, R.; Russo, M. The influence of Yellow Substance on Remote Monitoring of Water Substance in Coastal Waters. Joint Research Center. Italy. (s/d).
- Fujita, Shin-Ichi. Investigation of a Red Tide pattern observed in Osaka Bay by Landsat. In: International Symposium of Photogrammetry and Remote Sensing, Kyoto, julho, 1988, 16, **Proceedings**. Kyoto, ISPRS, 1988, p. 435-443.
- Godoy Jr., M.; Novo, E.M.L.M. Processamento Digital de Dados TM/Landsat no Monitoramento de Águas Interiores. (INPE-4956-PRE/1533), 1989.
- Gordon, H.R. Simple Calculation of the Diffuse Reflectance of the Ocean. **Applied Optics**, 12(12):2803-2804, 1973.

- Gordon, H.R. Remote sensing of optical properties in continuously stratified waters. **Applied Optics**, 17(12):1893-1897, 1978.
- Gordon, H.R.; Brown, O.B. Irradiance reflectivity of a flat ocean as a function of its optical properties. **Applied Optics**, 12(7):1549-1551, 1973.
- Gordon, H.R.; Brown, O.; Jacobs, M.M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean. **Applied Optics**, 14(2):417-427, 1975.
- Gordon, H.R.; Clark, D.K. Atmospheric effects in the remote sensing of phytoplankton pigments. **Boundary-Layer Meteorology**, 18(3):299-313, 1980.
- Gordon, H.R.; Clark, D.K. Clear water radiances for atmospheric correction of coastal zone color scanner imagery. **Applied Optics**, 20(24):4175-4180, 1981.
- Gordon, H.R.; Clark, D.K.; Brown, J.W.; Brown, O.B.; Evans, R.H.; Broenkow, W.W. Phytoplankton pigment concentrations in the middle atlantic bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates. **Applied Optics**, 22(1), 1983.
- Gordon, H.R.; McCluney, W.R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. **Applied Optics**, 14(2):413-416, 1975.
- Graby, H.; Doerfer, R.; Jager, W. The influence of yellow substance on remote sensing of sea-water constituents from space. (ESA contract RFQ3-5060/84/nl/md) GKSS. 1986.
- Grew, G.W. Remote Sensing of Chlorophyll a in Coastal waters. In: Shanrokhi, F. ed. **Remote Sensing of earth resources**. Tullahoma, Univ. of Tennessee, 1972. v.5. Technical papers selected from the Conference on Earth Resources Observation and Information Analysis Systems held in Tullahoma, TN, Mar. 13-14, 1972. p. 217-254.
- Henry, R. O crescimento potencial do fitoplâncton da represa de Barra Bonita (rio Tietê, SP): uma comparação sazonal dos efeitos de enriquecimento artificial em amostras de seus tributários. **Ciência e Cultura**, 38(9):1553-1564, 1986.

- Hojerslev, N.K. Water color and its relation to primary production. **Boundary-Layer Meteorology**, 18(2):203-220, 1980.
- Holm, R.G.; Jackson, R.D.; Yaun, B.; Moran, M.S.; Slater, P.N.; Bigger, S.F. Surface reflectance factor retrieval from Thematic Mapper data. **Remote Sensing of Environment**, 27:47-57, 1989.
- Holyer, R.J. Toward universal multispectral suspended sediment algorithms. **Remote Sensing of Environment**, 7:323-338, 1978.
- Horstman, U.; Ulbricht, K.A.; Schmidt, D. Detection of eutrophication processes from air and space. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 12, Mamba, 20-26 Apr 1978, Ann Arbor, ERIM, 1978. **Proceedings**. p. 1379-1389.
- Horton, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrographical approach to quantitative morphology. **Geological Society America Bulletin** 56(3):275-370. 1945.
- Huete, A.R. Soil influences in remotely sensed vegetation - canopy spectra. In: Asrar, G., ed. **Theory and Applications of Optical Remote Sensing**. New York, Wiley (1st ed), 1989. p. 107-138.
- Jain, S.C.; Miller, J.R. Subsurface water parameters; optimization approach to their determination from remotely sensed water color data. **Applied Optics**, 15(4):886-890, 1976.
- Jensen, J.R.; Davis, B.A. Remote sensing of aquatic macrophyte distribution in selected South Carolina reservoirs. In: **ASPRS-ACSM Annual Convention: Remote Sensing**. Baltimore, Mar 29- Apr 2, 1987. **Proceedings**, Fall Church, ASPRS-ACSM, v.1., p. 57-65.
- Jensen, J.R.; Kjerfve, B.; Ramsey III, E.W.; Magill, K.E.; Medeiros, C.; Sneed, J.M. Remote sensing and numerical modeling of suspended sediment in Laguna Terminos, Campeche, Mexico. **Remote Sensing of Environment**, 27(1):33-45, 1989.
- Johnston, C.A.; Naomi, E.D.; Brnde, J.P.; Niemi, G.J. Geographic Information Systems for Cumulative Impact assessment. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 54(11):1609-1615, 1988.

- Katsaros, K.B.; McMurdie, L.A.; Lind, R.J.; DeVault, J.E. Albedo of a water surface, spectral variation, effects of atmospheric transmittance, sun angle and wind speed. **Journal of Geophysical Research**, 90(c4):7313-7321, 1985.
- Katawar, G.W.; Humphreys, G.J. Remote sensing of chlorophyll in an atmosphere-ocean environment: a theoretical study. **Applied Optics**, 15(1):273-282, 1976.
- Kim, H.H.; Linebaugh, G. Early evaluation of Thematic Mapper data for coastal process studies. **Advances in Space Research**, 5(5):21-29, 1985.
- Kirk, J.T.O. Relationship between Nephelometric Turbidity and Scattering Coefficients in Certain Australian Waters. **Australian Journal of Marine and Freshwater Research**, 31:1-12, 1980a.
- Kirk, J.t.O. Spectral absorption properties of natural waters: contribution of the soluble and particulate fractions to light absorption in some inland waters of south-eastern Australia. **Australian Journal of Marine and Freshwater Research**, 31:287-296, 1980b.
- Kirk, J.T.O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. New York, 2^a ed., Cambridge University Press. 1986.
- Langran, L.E. A review of temporal database research and its use in GIS applications. **International Journal of Geographical Information Systems** 3(3):215-231, 1989.
- Lathrop, J.R.; Lillesand, T.M. Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Green Bay and Central Lake Michigan. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing** 52(5):671-680, 1986.
- Lathrop, R.G.; Lillesand, T.M. Monitoring water quality and river plume transport in Green Bay, Lake Michigan with SPOT-1 imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 55(3):349-354, 1989.
- Link, L.E.; Long, K.S. Large-scale demonstration of aquatic plant mapping by remote sensing. In: **International Symposium on Remote Sensing of Environment**, 12, Manila, 20-26, Apr. 1978, **Proceedings**, Ann Arbor, ERIM, 1978, p. 907-915.

- Lodwick, G.D.; Harrington, R.D. Deriving sediment information for a lake Athabasca using principal components analysis of Landsat data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 11(1):4-16, 1985.
- McCauley, J.R.; Yarger, H.L. Kansas Water quality monitoring using ERTS-1. In: Shahrokhi, F., ed. **Remote Sensing of Earth Resources**. Tullahoma, University of Tennessee, 1972. Technical papers selected from the conference on Earth Resources Observation and Information Analysis System held in Tullahoma, TN, Mar. 13-14, 1972, p. 521-541.
- McCluney, W.R. Ocean color spectrum calculation. **Applied Optics** 13(10):2422-2429, 1974.
- McCluney, W.R. Remote Measurement of Water Color. **Remote Sensing of Environment**, 5(1):3-33, 1976.
- Miller, J.R.; Jain, S.C.; O'Neill, N.T.; McNeillu, R.; Thomson, K.P.B. Interpretation of Airborne Spectral Reflectance Measurements over Georgian Bay. **Remote Sensing of Environment** 6(2):183-200, 1977.
- Miranda, E.E.; Santos, R.Z.; Couvre, M. Implantação de um Sistema de Informações Geográficas para o Estado do Tocantins. In: Simpósio Brasileiro die Sensoriamento Remoto, 6. Manaus, junho, 24-29, 1990, **Proceedings**, Manaus, 1990, v. 3, p. 715-719.
- Morel, A.Y.; Gordon, H.R. Report of the working group on water color. **Boundary-Layer Meteorology**, 18(3):343-355, 1980.
- Morel, A.; Prieur, L. Analysis of variations in ocean color. **Limnology and Oceanography**, 22(4):709-722, 1977.
- Mortmer, C.H. Discoveries and testable hypotheses arising from Coastal Zone Color scanner imagery of southern lake Michigan. **Limnology and Oceanography**, 33(2):203-226, 1988.
- Muralikrishna, I.V. Ocean chlorophyll retrieval algorithms. **Advances in Space Research**, 4(11):149-153, 1984.
- Muller-Karge, F.E.; McClain, C.R.; Richardson, P.L. The dispersal of the Amazon's water. **Nature**, 333(6168):56-59, 1988.

- Munday, J.C., and Alfoldi, T.T. (1979), Landsat test of diffuse reflectance models for aquatic suspended solids measurement, **Remote Sensing Environment**, 8:169-183.
- Negri, D.S.; Doak, E.L. A Study of Rhodamine WT dye dispersion in cooling pond using MSS data. ASPRS-ACMS Annual Convention: Remote sensing. Baltimore, Mar 29-Apr 2, 1987, **Proceedings**, Falls Church, ISPRS-ACMS. v1., p. 37-46.
- Novo, E.M.L.M.; Godoy, M.J. Eutrophication assessment through remote sensing techniques, São José dos Campos, INPE. (INPE-4932-PRE/1422).
- Novo, E.M.L.M.; Hansom, J.D.; Curran, P.J. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, 10(7):1283-1289, 1989a.
- Novo, E.M.L.M.; Hansom, J.D.; Curran, P.J. The effect of viewing geometry and wavelength on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, 10(8):1357-1372, 1989b.
- Novo, E.M.L.M.; Tundisi, J.G. Variações sazonais na cor da água, detectadas através de sensores orbitais e suas implicações ambientais. Submetido à revista **Ciência e Cultura**, janeiro, 1990.
- Novo, E.M.L.M.; Tundisi, J.G. Sensoriamento Remoto de Águas Interiores: Perspectivas. V Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, outubro, 11-15, 1988, **Anais**, Natal, 1988, v.1, p. 13-21. São José dos Campos, 1988. (INPE-4875-PRE/1486).
- Novo, E.M.L.M.; Steffen, C.A.; Braga, C.Z.F. "Results of a Laboratory Experiment on Relating Spectral reflectance to total suspended solids." **Remote Sensing of Environment**, no prelo 1990a.
- Novo, E.M.L.M.; Steffen, C.a.; Braga, C.Z.F. The role of imaging spectrometer systems for the assessment of Amazonian inland water. International Symposium on Primary Data Acquisition. Manaus, Brazil, June 24-29, 1990. **Proceedings**. Manaus, ISPRS, 1990b. 28(1):186-189.

- Novo, E.M.L.M.; Braga, C.Z.F.; Tundisi, J.C. Remote sensing estimation of total chlorophyll pigment distribution in Barra Bonita reservoir. In: Straskraba, M.; Duncan, A.; Tundisi, J.G. ed. **Limnology and Management of Reservoir**. Estocolmo. O. Riebl, 1990c (no prelo).
- Pelaez, J.; McGowan, J.A. Phytoplankton pigment patterns in the California current as determined by satellite. **Limnology and Oceanography**, 31(5):927-950, 1986.
- Pereira Filho, W. Integração de dados de campo e de sensoriamento remoto no estudo das relações entre características da bacia de captação e a concentração de sedimentos em suspensão em reservatórios. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações. São José dos Campos, dezembro, 1990.
- Perry, M.J. Assessing marine primary production from space. **BioScience**, 36(7), 1986.
- Price, S. Modelling the temporal element in land information systems. **International Journal of Geographical Information System** 3(3):232-243, 1989.
- Prieur, L. Transfer radiatif dans les eaux de mer. D.Sc. thesis, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, 243 p., 1976.
- Prieur, L.; Sathyendranath, S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplakton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. **Limnology and Oceanography**, 26(4):671-689, 1981.
- Rigterink, P.V. Remote sensing of Cheasapeake bay water quality required for healthy oyste beds. In: ASPRS-ACMS: Remote Sensing. Baltimore, March 29 - April 3, 1987. **Proceedings**, Falls church ASPRS-ACMS, 1987, v.1. p. 18-24.
- Rimmer, J.C.; Collins, M.B.; Pattiaratchi, C.B. Mapping of water quality in coastal waters using Airborne Thematic Mapper data. **International Journal of Remote Sensing**, 8(1):85-102, 1987.
- Ritchie, J.C.; Schiebe, F.R.; McHenry, J.R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 42:1540-1545, 1976.

- Ritchie, J.C.; Cooper, C.M. Comparison of Landsat MSS pixel array size for estimating water quality variables in small lakes. In: ASPRS-ACMS Annual convention: Remote sensing. Baltimore, Mar 29 - Apr 2, 1987. **Proceedings**. Falls church, ASPRS-ACMS, 1987, v.1. p.27-36.
- Rouse, L.J.; Coleman, J.M. Circulation Observations in the Louisiana Bight using Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, 5(1):55-66, 1976.
- Ruiz, M.D. Problemas relacionados com a Geologia da Barragem de Barra Bonita (Rio Tietê) SP. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS SÃO PAULO (Publicação n^o 866), 1971.
- Sathyendranath, S.; Prieur, L.; Morel, A. An evaluation of the problems of chlorophyll retrieval from ocean colour, for case 2 waters. **Advances in Space Research**, 7(2):27-30, 1987a.
- Sathyendranath, S.; Lazzara, L.; Prieur, L. Variations in the spectral values of specific absorption of phytoplankton. **Limnology and Oceanography**, 32(2):403-415, 1978b.
- Scarpace, F.L.; Holmqvist, K.W.; Fisher, L.T. Landsat analysis of lake quality. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 45(5):623-633, 1979.
- Scherz, J.P. Development of a Practical Remote Sensing Water Quality Monitoring System. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment 8, Ann Arbor, 2-6, outubro, October, 1972, **Proceedings**, Ann Arbor/ERIM, 1972, p. 35-43, 1972.
- Shook, D.F.; Salzman, J.; Svehla, R.A.; Gedney, R.T. Quantitative interpretation of Great Lakes remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, 85(c7):3991-3996, 1990.
- Smith, T.R.; Menon, S.; Star, J.L.; Estes, J.E. Requirements and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information system. **International Journal of Geographical Information Systems**, 1(1):13-21, 1987.

- Spitzer, D.; Dirks, R.W.J. Classification of bottom composition and bathymetry of shallow waters by passive remote sensing. In: Symposium on Remote sensing for Resources Development and Environmental Management, Ensched, agosto 1986, **Proceedings**, Enschede, ISPRS, 1986, p. 775-777.
- Stow, D.A. Remotely-sensed tracers for hydrodynamic surface flow estimation. **International Journal of Remote Sensing**, 8(3):261-278, 1987.
- Strong, A.E. Chemical whittings and chlorophyll distributions in the Great Lake as viewed by Landsat. **Remote Sensing of Environment**, 7(1):61-72, 1978.
- Stumpf, R.P.; Tyler, M.A. Satellite detection of bloom and pigment distributions in estuaries. **Remote Sensing of Environment**, 24(3):385-404, 1988.
- Sturm, B. Optical properties of water-applications of remote sensing to water quality determination. In: Frayse, G. ed. **Remote Sensing Applications in Agriculture and Hydrology**. (1^a ed.) Rotterdam, Balkema, 1980. p. 471-495.
- Sturm, B. Application of CZCS data to productivity and water quality studies in the northern Adriatic Sea. **Advances in Space Research**, 7(2):47--51, 1987.
- Sullivan, S.A. Experimental study of the absorption in distilled water, artificial sea water, and heavy water in the visible region of the spectrum. **Journal of the Optical Society of America**, 53(8):962-968, 1963.
- Sydor, M. Remote sensing of particulate concentrations in water. **Applied Optics**, 19(16):2794-2800, 1980.
- Tassan, S. Evaluation of the potential of the Thematic Mapper for Marine application. **International Journal of Remote Sensing**, 8(10):1455-1478, 1987.
- Tassan, S. The use of the Thematic Mapper for Coastal Water Analysis. 16th International Symposium of Photogrammetry and Remote Sensing. Kyoto, July 10-21 1988, **Proceedings**. Kyoto, ISPRS, 1988. p. VII-564 - VII-575.
- Tassan, S.; Sturm, B. An algorithm for the retrieval of sediment content in turbid coastal waters from CZCS data. **International Journal of Remote Sensing**, 7(5):643-655, 1986.

- Thomas, I.L. Sediment/siltation monitoring within a tidal basin using repetitive Landsat CCT data. International symposium on remote sensing of environment, 12 Manila, 20-26, Apr, 1978. **Proceedings**, Ann Arbor/ERIM, 1978. p. 1367-1377, 1978.
- Valenzuela, C.R. Ilwis overview. In: Meijerink; Valenzuela; Stewart, ed. **The integrated land and watershed system**. (ITC Publication 7, 1988, ITC/Enschede, p. 3-14.
- Verdin, J.P. Monitoring water quality conditions in a large western reservoir with Landsat imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. 51(3):343-353, 1985.
- Viollier, M.; Deschamps, P.Y.; Lecomte, P. Airborne remote sensing of chlorophyll content under cloudy sky as applied to the tropical waters in the Gulf of Guinea. **Remote Sensing of Environment**, 7(3):235-248, 1978.
- Viollier, M.; Tanré, D.; Deschamps, P.Y. An algorithm of Remote Sensing of water color from space. **Boundary-Layer Meteorology**. 18(3), May 1990.
- Wezernak, C.T. The use of remote sensing in limnological studies. In: International Symposium of Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Mi 15-19 Apr 1974, **Proceedings**. Ann Arbor/ERIM, 1974, p. 963-980.
- Wezernak, C.T.; Tanis, F.J.; Bajza, C.A. Trophic state analysis of inland lakes. **Remote Sensing of Environment**, 5(2):147-165, 1976.
- Whitlock, C.H.; Usry, J.W.; Witte, W.G.; Garganus, E.A. Laboratory Measurements of upwelled radiance and reflectance spectra of Calvert, Ball, Jordan, and Feldspar soil sediments. Washington, DC, NASA, 1977. (NASA TP-1039).
- Whitlock, C.H.; Kuo, C.Y.; Le Croy, S.R. Criteria for the use of regression analysis for remote sensing of sediment and pollutants. **Remote Sensing of Environment**, 12:151-168, 1982.
- Witte, W.G.; Whitlock, C.H.; Harris, R.C.; Usry, J.W.; Poole, L.R.; Houghton, W.M.; Morris, W.E.; Gurganus, E.A. Influence of dissolved organic material on turbid water optical properties and remote sensing reflectance. **Journal of Geophysical Research**, 87(c1):441-446, 1982.

- Yentsch, C.S. Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean. **Limnology and Oceanography**, 7:207-217, 1967.
- Yoder, J.A.; McClain, C.R. Spatial scales in CZCS-chlorophyll imagery of the southeastern U.S. continental shelf. **Limnology and Oceanography**, 32(4):929-941, 1987.

APÊNDICE A

CORRELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS

A.1 - CORRELAÇÕES ESTATISTICAMENTE SIGNIFICATIVAS ENTRE OS DADOS LIMNOLÓGICOS VERIFICADAS EM TODAS AS DATAS DE COLETA

| VAR | | BB3 | BB4 | BB5 | BB6 | VAR | | BB3 | BB4 | BB5 | BB6 |
|------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| NO2 | e NO3 | 0,62 | 0,52 | | 0,62 | PDIS | e PTOT | 0,88 | 0,57 | 0,55 | |
| NO2 | e SIO2 | | | | 0,58 | PDIS | e NH4 | 0,68 | -0,39 | | 0,74 |
| NO2 | e PO4 | | | 0,77 | 0,81 | PDIS | e NTOT | | 0,44 | | 0,51 |
| NO2 | e PDIS | | | 0,65 | 0,74 | PDIS | e CLTOT | | | | 0,41 |
| NO2 | e PTOT | 0,40 | 0,68 | | | PDIS | e TSS | 0,46 | | | 0,77 |
| NO2 | e NH4 | 0,36 | | 0,54 | 0,81 | PDIS | e MI | 0,43 | | | 0,73 |
| NO2 | e NTOT | 0,44 | 0,67 | | 0,49 | PDIS | e MO | | | | 0,51 |
| NO2 | e TSS | | 0,64 | | 0,77 | PDIS | e TEMP | | | | 0,51 |
| NO2 | e MI | | 0,59 | | 0,86 | PDIS | e SEC | -0,53 | -0,53 | | -0,67 |
| NO2 | e MO | | 0,57 | | | PTOT | e NH4 | 0,67 | | 0,41 | |
| NO2 | e TEMP | -0,66 | | | 0,55 | PTOT | e NTOT | | 0,59 | 0,40 | |
| NO2 | e SEC | -0,47 | -0,56 | | -0,67 | PTOT | e CLTOT | | 0,56 | | |
| NO3 | e SIO2 | -0,41 | 0,83 | -0,61 | 0,74 | PTOT | e TSS | 0,56 | 0,73 | 0,51 | |
| NO3 | e PO4 | 0,36 | 0,77 | | 0,63 | PTOT | e MI | 0,57 | 0,68 | 0,45 | |
| NO3 | e PDIS | | 0,54 | | 0,36 | PTOT | e MO | | 0,65 | 0,46 | |
| NO3 | e PTOT | | 0,42 | | | PTOT | e SEC | -0,76 | -0,81 | -0,52 | |
| NO3 | e NTOT | 0,73 | 0,86 | 0,95 | 0,57 | NH4 | e NTOT | | | 0,36 | 0,40 |
| NO3 | e CLTOT | -0,41 | | | 0,36 | NH4 | e TSS | 0,41 | | | 0,69 |
| NO3 | e TSS | | 0,56 | 0,81 | 0,65 | NH4 | e MI | | | | 0,80 |
| NO3 | e MI | | 0,57 | 0,83 | 0,68 | NH4 | e MO | 0,38 | | | |
| NO3 | e MO | | | 0,40 | | NH4 | e TEMP | -0,43 | | | |
| NO3 | e TEMP | | 0,63 | 0,63 | | NH4 | e SEC | | | -0,55 | -0,66 |
| NO3 | e SEC | -0,48 | -0,66 | -0,73 | -0,62 | NTOT | e TSS | | 0,61 | 0,70 | 0,62 |
| SIO2 | e PO4 | | 0,73 | | 0,74 | NTOT | e MI | | 0,64 | 0,70 | 0,63 |
| SIO2 | e PDIS | 0,63 | 0,62 | 0,56 | 0,54 | NTOT | e MO | | | 0,42 | |
| SIO2 | e NH4 | | -0,40 | | | NTOT | e TEMP | | 0,43 | 0,54 | |
| SIO2 | e NTOT | | 0,66 | -0,56 | 0,48 | NTOT | e SEC | -0,46 | -0,67 | -0,59 | -0,52 |
| SIO2 | e CLTOT | | | | 0,57 | CLTOT | e TSS | | 0,47 | 0,45 | 0,55 |
| SIO2 | e TSS | | 0,36 | -0,56 | 0,72 | CLTOT | e MO | | 0,82 | 0,72 | 0,71 |
| SIO2 | e MI | | 0,41 | -0,58 | 0,60 | CLTOT | e SEC | 0,41 | -0,42 | | -0,37 |
| SIO2 | e MO | | | | 0,63 | TSS | e MI | 0,94 | 0,98 | 0,97 | 0,92 |
| SIO2 | e TEMP | | 0,48 | -0,45 | 0,44 | TSS | e MO | 0,55 | 0,72 | 0,66 | 0,70 |
| SIO2 | e SEC | | -0,57 | 0,47 | -0,59 | TSS | e TEMP | -0,50 | | 0,41 | 0,38 |
| PO4 | e PDIS | 0,75 | 0,77 | 0,88 | 0,89 | TSS | e SEC | -0,55 | -0,87 | -0,88 | -0,81 |
| PO4 | e PTOT | 0,83 | 0,40 | 0,61 | | MI | e MO | | 0,57 | 0,44 | 0,38 |
| PO4 | e NH4 | | | 0,59 | 0,73 | MI | e TEMP | -0,45 | | 0,55 | |
| PO4 | e NTOT | 0,40 | 0,63 | | 0,62 | MI | e SEC | -0,60 | -0,87 | -0,89 | -0,79 |
| PO4 | e CLTOT | -0,44 | | | 0,41 | MO | e SEC | | -0,55 | -0,46 | -0,50 |
| PO4 | e TSS | | | | 0,88 | TEMP | e SEC | | | -0,41 | |
| PO4 | e MI | | | | 0,84 | | | | | | |
| PO4 | e MO | | | | 0,56 | | | | | | |
| PO4 | e TEMP | | 0,56 | | 0,45 | | | | | | |
| PO4 | e SEC | -0,72 | -0,53 | | -0,81 | | | | | | |

A.2 - CORRELAÇÕES ESTATISTICAMENTE SIGNIFICATIVAS ENTRE OS DADOS DE CAMPO E DADOS TM EM CADA DATA DE COLETA

| | VAR | BB3 | BB4 |
|--|------------|------|------|
| | NO3 X B1 | | 0.51 |
| | NO3 X B2 | 0.46 | 0.76 |
| | NO3 X B3 | 0.47 | 0.67 |
| | NH4 X B2 | 0.39 | |
| | NTOT X B2 | 0.43 | 0.59 |
| | NTOT X B3 | | 0.66 |
| | PO4 X B1 | 0.54 | 0.49 |
| | PO4 X B2 | 0.49 | 0.71 |
| | PO4 X B3 | 0.65 | 0.55 |
| | PTOT X B3 | 0.60 | 0.57 |
| | PTOT X B4 | 0.39 | |
| | SIO2 X B1 | | 0.66 |
| | SIO2 X B2 | | 0.79 |
| | SIO2 X B3 | | 0.69 |
| | TSS X B3 | 0.42 | 0.72 |
| | TSS X B4 | 0.44 | |
| | MI X B2 | | 0.41 |
| | MI X B3 | 0.50 | 0.79 |
| | MI X B4 | 0.46 | |
| | CLTOT X B1 | 0.69 | |
| | CLTOT X B2 | 0.68 | |
| | CLTOT X B3 | 0.66 | |
| | TEMP X B2 | | 0.42 |
| | SEC X B1 | 0.55 | 0.41 |
| | SEC X B2 | 0.64 | 0.53 |
| | SEC X B3 | 0.84 | 0.83 |
| | SEC X B4 | 0.62 | 0.37 |