

## SENSORIAMENTO REMOTO DE ÁGUAS INTERIORES: PERSPECTIVAS

Evlyn Marcia L. de Moraes Novo  
Instituto de Pesquisas Espaciais  
Ministério da Ciência e Tecnologia  
Caixa Postal 515, 12201 - São José dos Campos, SP, Brasil

José Galisia Tundisi  
Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada  
Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - SP  
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 - 13570 - São Carlos, SP

### RESUMO

Este trabalho apresenta uma breve discussão sobre as necessidades básicas de informação para o manejo da qualidade dos recursos hídricos e das limitações das técnicas convencionais de limnologia no tocante à representatividade espacial dos dados. Faz-se também uma avaliação das técnicas de sensoriamento remoto como fonte adicional de informação sobre a qualidade d'água e das perspectivas de pesquisa e aplicação que se abrem com sua incorporação ao elenco de técnicas limnológicas convencionais. Apresentam-se também resultados preliminares de estudos em andamento na represa de Barra Bonita, através da cooperação técnica entre INPE/MCT e CRHEA/USP.

### ABSTRACT

This work presents a short discussion on the information requirements for water quality management as well as on the limitations of limnological methods concerning to the spatial significance of the point samples. Remote sensing techniques are also assessed as additional source of information for water quality management and as motif for new research and application aiming their incorporation to the framework of conventional limnology. Preliminary results from a study carried out in the Barra Bonita Reservoir as part of a technical cooperation between INPE/MCT and CRHEA/USP are also presented.

### 1. INTRODUÇÃO

O território brasileiro pode ser classificado em 8 grandes regiões hidrográficas (Brasil, 1985) com características distintas quer do ponto de vista de ocupação humana quer do ponto de vista de seus fatores abióticos (geologia, hidrologia, relevo, solos). O confronto entre certas características naturais e antrópicas (Tabela 1) das regiões hidrográficas em questão evidencia 3 aspectos preocupantes: 1) a pressão demográfica sobre as diferentes bacias é variável, indicando níveis diferenciados de intervenção antrópica; 2) a disponibilidade hídrica dessas bacias é diferenciada havendo algumas bacias potencialmente mais ricas que outras; 3) as áreas de menor potencial de aproveitamento hídrico são em geral as de maior pressão populacional. A bacia amazônica, por exemplo, concentra 73% do potencial hídrico do país (Barth et alii, 1987), mas apenas 3% de sua população. A bacia do Paraná, por outro lado concentra 30% da população mas apenas 7% da disponibilidade hídrica.

Esse potencial hídrico está sujeito a aproveitamentos múltiplos com requisitos variáveis em termos de qualidade de água e com efeitos variáveis sobre o equilíbrio dos sistemas aquáticos. A Tabela 2 resume alguns dos usos mais frequentes desse potencial hídrico e seus efei-

tos sobre a quantidade e qualidade das águas superficiais. A análise das informações contidas na Tabela 2 permite concluir que qualquer dos usos considerados implica sobretudo num comprometimento da qualidade da água, o qual resulta numa "escassez artificial" desse recurso uma vez que limita sua utilização e encarece seu tratamento.

Os recursos hídricos continentais do Brasil, entretanto, não se limitam apenas ao volume escoado pelos rios. O território brasileiro possui também três grandes sistemas lacustres naturais (Tundisi, 1980): o sistema amazônico, o sistema do pantanal matogrossense e os lagos do vale do rio Doce. Os lagos amazônicos e os lagos do pantanal encontram-se intimamente conectados aos sistemas fluviais, sofrendo portanto os reflexos das modificações sofridas por aqueles. As consequências do aproveitamento hídrico de tais sistemas aquáticos são em princípio mais graves. Enquanto as águas dos rios são constantemente renovadas, as águas dos lagos têm uma longa permanência, tornando-se sujeitos a processos bióticos e abióticos internos os quais levam à acumulação de substâncias de modo diverso ao do que ocorre em rios, (Junk e Furch, 1985).

**TABELA 1**  
**CARACTERÍSTICAS DAS REGIÕES HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS**

REGIÃO HIDROGRÁFICA	ÁREA APROXIMADA MIL (KM <sup>2</sup> )	POPULAÇÃO (MIL DE HAB.)	DENSIDADE HAB./KM <sup>2</sup>	VAZÃO MÉDIA (MIL M <sup>3</sup> /S)	VAZÃO/HABIT.
Bacia Amazônica	4.000	4.000	1,0	202	0,0500
Bacia do Tocantins	800	2.500	3,0	12	0,0040
Bacias do Atlântico - Nor te e Nordeste	1.000	2.300	2,3	5	0,0020
Bacia do São Francisco	600	11.500	19,0	3	0,0002
Bacias do Atlântico Leste	500	27.000	51,0	4	0,0001
Bacia do Paraná/Paraguai	1.200	38.000	31,6	12	0,0003
Bacia do Uruguai	200	4.000	20,0	7	0,0017
Bacias do Atlântico Sude ste	200	10.000	50,0	8	0,0008

FONTE: Brasil, (1985)

**TABELA 2**  
**CLASSIFICAÇÃO DOS USOS DA ÁGUA**

TIPO DE USO	PERDA	REQUISITOS DE QUALIDADE	EFEITOS NA QUALIDADE
Abastecimento Urbano	10%	Altos ou médios	Poluição orgânica e bacteriológica
Abastecimento Indus.	20%	Médios	Poluição orgânica, térmica e tóxica
Irrigação	90%	Médios	Carreamento de agrotóxicos e fertilizantes
Agricultura	10%	Altos	Carreamento de matéria orgânica
Hidroeletricidade	evaporação	Baixos	Eutrofização
Assimilação de esgotos	não há	Não há	Poluição orgânica, física, química e bacteriológica

FONTE: Barth e Pompeu, (1987).

Tais ecossistemas aquáticos naturais, entretanto, são pouco conhecidos (Tundisi, 1980) e correm o risco de terem seu funcionamento natural alterado mesmo antes de terem sido convenientemente estudados.

No panorama dos recursos hídricos do território brasileiro, entretanto, o mais preocupante é a falta de conhecimento sobre as seqüências ecológicas a médio e longo prazo da construção de grandes reservatórios. Um reservatório funciona como um "vaso de reação" em que diferentes tipos de materiais são introduzidos a partir de origens diversas (Tundisi, 1980; Tundisi, 1985). Os reservatórios concentram, como os lagos, substâncias derivadas de sua área de captação, criando condições, para que em um número crescente de casos, a qualidade da água seja comprometida pela poluição e

eutrofização, frutos do tratamento inadequado dos esgotos e da ocupação desordenada do solo (Brasil, 1985).

O manejo dos recursos hídricos do território nacional em termos de reduzir a "escassez artificial" é entretanto uma tarefa difícil devido: 1) à imensa área ocupada por aqueles recursos; 2) à intensa taxa de transformação geográfica das bacias hidrográficas brasileiras; 3) ao desequilíbrio natural entre disponibilidade hídrica e demanda. Apenas como ilustração do dinamismo a que estão sujeitos os recursos hídricos no território brasileiro, a Tabela 3 apresenta uma comparação entre as principais bacias hidrográficas no tocante aos aproveitamentos hidrelétricos existentes e planejados para o ano 2000 em termos apenas da área inundada e do volume d'água armazenado.

TABELA 3

## APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS EXISTENTES E PREVISTOS PARA O ANO 2000

BACIA HIDROGRÁFICA	EXISTENTE/EM CONSTRUÇÃO		PLANEJADO PARA O ANO 2000	
	ÁREA TOTAL INUNDADA (KM <sup>2</sup> )	VOLUME ARMAZENADO (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	ÁREA TOTAL INUNDADA (KM <sup>2</sup> )	VOLUME ARMAZENADO (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
Amazonas	300	-	50.000	-
Araguaia/Tocantins	2.500	48.200	21.000	340.000
Paranaíba	1.700	50.000	500	20.000
Paranapanema	1.840	21.000	90	2.000

FONTE: Brasil (1985).

A análise dos dados contidos nessa tabela indica que apenas para essa pequena amostra a área inundada aumentará de 9.040km<sup>2</sup> para 72.590km<sup>2</sup>. Isso representará um formidável impacto sobre os ecossistemas terrestres pré-existentes. A construção do reservatório de Tucuruí, por exemplo, determinou a inundação de 17 vilas e gerou a necessidade de reassentamento de 15.000 pessoas, numa região de baixa densidade populacional. Com relação ao volume de água armazenado, haverá um aumento de 119.000 x 10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> para 362.000 x 10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>.

Mas a construção de reservatórios não tem apenas aquele impacto direto. Essa construção já é motivada pela demanda energética (no sul do país, por exemplo) ou pela necessidade de fomentar o desenvolvimento econômico regional (norte do país, por exemplo). Assim é, que, no caso específico da bacia do Tocantins/Araguaia há numerosos projetos regionais implantados ou em vias de implantação (Programa grande Carajás, Complexo Albrás Alunorte) cujo potencial de impacto é considerável. Na síntese do programa industrial do PRODIAT (Projeto de Desenvolvimento Integrado da Bacia do Araguaia-Tocantins), por exemplo, há uma previsão de que a produção de carvão vegetal passe de 150 x 10<sup>3</sup> toneladas em 1985 para 2.000 x 10<sup>3</sup> toneladas em 1994, e que a produção de madeira salte de 265 x 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup> em 1985 para 2662 x 10<sup>3</sup>m<sup>3</sup> em 1994, havendo consciência por parte dos planejadores que embora o "modelo de exploração" auto-sustentada seja ecologicamente atraente, ele tem viabilidade econômica questionável" (Brasil, 1986). Face às perspectivas de ocupação da bacia de captação do reservatório de Tucuruí, pôde-se prever que este estará sujeito ao processo de eutrofização, processo esse comum a numerosos lagos artificiais brasileiros (Tundisi, 1986; Brasil, 1985).

O breve quadro aqui apresentado demonstra a necessidade de se desenvolver tecnologias adequadas à solução de problemas ligados aos recursos hídricos. Para esse desenvolvimento, entretanto, é essencial o conhecimento dos sistemas aquáticos continentais, suas peculiaridades, seus mecanismos de interação com os ecossistemas terrestres, ciclo de nutrientes, etc. Esse conhecimento, entretanto, é escasso e sujeito às limitações impostas pelos métodos

limnológicos convencionais (Tundisi, 1978; Junk et alii, 1981; Esteves e Barbieri, 1983; Tundisi, 1984; Esteves et alii, 1985; Cordeiro Neto e Colares, 1985; Tundisi et alii, 1986; Henry, 1986).

## 2. MÉTODOS CONVENCIONAIS DE ESTUDO DOS SISTEMAS AQUÁTICOS CONTINENTAIS

A análise de uma amostra da produção científica brasileira em limnologia e ecologia aquática demonstra que uma questão crucial é a da representatividade espacial dos dados coletados. Grande parte desses estudos baseia-se em um número limitado de amostras. A Tabela 4 resume alguns desses trabalhos. Através de sua análise observa-se que: 1) a representatividade espacial dos dados é bastante variável, tornando os dados resultantes dificilmente comparáveis entre si; 2) o problema da representatividade espacial das amostras se agrava com o aumento das dimensões do sistema aquático em estudo.

Obviamente esta observação não representa uma crítica aos trabalhos em questão, mas apenas uma constatação das dificuldades de se aplicar métodos limnológicos no estudo de sistemas aquáticos com as dimensões e variedades encontradas no território brasileiro. Os métodos que se adequam a pequenos corpos d'água, tornam-se inadequados a estudos de grandes corpos d'água. E se tornam mais ainda inadequados pelo fato de que, quanto maior o corpo d'água em questão, maior a variabilidade de fatores bióticos, abióticos e antrópicos a que se encontra sujeito. A necessidade de dados frequentes (semanais e/ou quinzenais) por longos períodos de tempo (ou mais estações) inviabilizam o aumento do número de estações amostrais.

Por outro lado, a necessidade de informação espacial mais fina já foi sentida. Cordeiro Neto e Colares (1985) estudando o Lago Paranoá salientam que as regiões formadas por seus braços e semi-braços podem ser compartimentadas em 5 zonas distintas entre si, e que, embora o lago como um todo seja eutrófico, há zonas que poderiam ser classificadas como mesotróficas. A falta de representatividade espacial das amostras entretanto, pode encobrir

**TABELA 4**  
**REPRESENTATIVIDADE ESPACIAL DE AMOSTRAGENS DE PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS**  
**E BIOLÓGICAS**

FORTE	NOME DO SISTEMA	DIMENSÃO (KM²)	NÚMERO DE AMOSTRAS	RESOLUÇÃO ESPACIAL
Tundisi e Tundisi, 1976	Reservatório do Broa	6,80	1	6,8km²
Tundisi et alii, 1978	Reservatório do Broa	6,80	2	3,4km²
Carbosa e Tundisi, 1980	Lago Carioca	0,13	2	0,06km²
Schmidt, 1976	Baixo rio Negro	-	1	-
Laceres et alii, 1987	Reservatórios do Estado de São Paulo	10.000*	114*	87km²*
Teves et alii, 1984	Reservatório de Três Marias	1.120	4	280km²
Tundisi et alii, 1966	Lago do Taquaral	0,16	3	0,05km²
Frank e alii, 1981	Curua-lina	100	7	1428km²

\* Valores aproximados.

tais diferenças cujo conhecimento é fundamental para uma política diferenciada de uso do solo.

É nesse quadro de limitações das técnicas convencionais de estudo dos sistemas aquáticos que o sensoriamento remoto pode se inserir como a tecnologia que possibilita ampliar a representatividade espacial das amostragens convencionais.

### 3. SENSORIAMENTO REMOTO DE SISTEMAS AQUÁTICOS

Existem numerosos trabalhos de pesquisa que tentam relacionar propriedades óticas da água às propriedades físico-químicas e biológicas dos sistemas aquáticos. Há evidências experimentais que comprovam a variação da cor retroespalhada pela água em função da variação da concentração de clorofila (Clark et alii, 1970). Essa variação tem sido utilizada no desenvolvimento de modelos de estimativa de produtividade primária de oceanos (Perry, 1986). A aplicação de tais modelos a sistemas aquáticos continentais ficou sempre comprometida pela baixa resolução espacial dos sistemas sensores dedicados a estudos aquáticos, própria apenas para grandes superfícies líquidas. Com a disponibilidade de dados do sensor TM, entretanto, abriram-se novas perspectivas de utilização de dados orbitais em estudos de sistemas aquáticos. Na Tabela 5 pode-se observar a relação entre as faixas espectrais do TM e suas respectivas aplicações no estudo de sistemas aquáticos.

Embora sejam encontrados modelos de estimativa de concentração de clorofila através de dados de sensoriamento remoto (Gordon et alii, 1983; Brown et alii, 1985) a utilização de tais estimativas na determinação de produtividade primária do fitoplâncton ainda depende de pesquisas adicionais (Sturm, 1987). As metas atuais por parte da comunidade internacional (Tassan, 1988) são no sentido de desenvolver algoritmos que permitam melhor estimar propriedades de águas tais como: a) concentração de sedimentos em suspensão; b) clorofila; c) poluição química; d) propriedades de fundo, etc.

É necessário também desenvolver sistemas

que minimizem ou corrijam efeitos ambientais que afetam a relação entre reflectância da água e suas propriedades físico-químicas e biológicas (Curran e Novo, 1988). A possibilidade de utilização de dados de espectrorradiômetros imageadores na década de 90 como parte do programa EOS (Earth Observing System) abre maiores perspectivas de detecção de propriedades dos ecossistemas aquáticos. O sistema HIRIS (High-Resolution Imaging Spectrometer) foi projetado para operar entre 0.4 e 2.5µm com uma resolução espectral de cerca de 10nm, resultando em dados em cerca de 200 diferentes faixas espectrais e uma resolução espacial de 30mx30m (Goetz e Hering, 1987).

Enquanto no exterior tem havido um volume considerável de pesquisas que utilizam sensoriamento remoto como fonte de dados limnológicos e oceanográficos (Nihoul, 1984; Gower, 1987; Rios et alii, 1988), no Brasil esta utilização não é sistemática. Dentre os trabalhos já realizados destacam-se as contribuições de Herz, (1977); Sausen (1981); Betancourt (1981), e Hartman, (1987).

Tendo em vista, entretanto, o volume dos recursos hídricos brasileiros, o grau de comprometimento a que estão sujeitos, é fundamental um esforço mais sistemático de integração das técnicas de sensoriamento remoto às atividades de pesquisa limnológica em andamento no país.

### 4. PERSPECTIVAS DE INCORPORAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO ÀS PESQUISAS LIMNOLÓGICAS

De modo a tornar mais sistemática a incorporação de dados de sensoriamento remoto à pesquisa limnológica, o INPE/MCT e o CRHEA/USP estão desenvolvendo atividades de pesquisas voltadas a aspectos relevantes a ambas áreas de conhecimento. Os principais tópicos que estão sendo contemplados dentro desse programa são:

- 1 - Desenvolvimento de modelos empíricos de estimativa de propriedades físico-químicas da água a partir de dados de sensores remotos.

**TABELA 5**  
**POTENCIALIDADE DAS BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR TM/LANDSAT PARA ESTUDOS**  
**DE ECOSISTEMAS AQUÁTICOS**

FAIXAS ESPECTRAIS (µm)	PICOS DE ABSORÇÃO DE CLOROFILAS				ALGAS FLUTUANTES (MÁXIMA REFLEXÃO)	BATIMETRIA	TURBIDEZ	DETECÇÃO DE CLOROFILA EM AMBIENTE TURBIDO	SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO	DELIMITAÇÃO TERRA/ÁGUA
	a	b	c	d						
0.45 - 0.52		*		*					*	
0.52 - 0.60						*			*	
0.63 - 0.69	*	*	*	*		*	*	*	*	
0.76 - 0.90				*	*		*		*	*
1.55 - 1.75										*
2.08 - 2.35										*

Estes modelos estão sendo desenvolvidos inicialmente para o reservatório de Barra Bonita e serão posteriormente estendidos aos demais reservatórios do Estado de São Paulo. O desenvolvimento de tais modelos é fundamental para a avaliação do nível trófico dos diferentes compartimentos de um reservatório.

Para o desenvolvimento desses modelos há a necessidade de coleta de amostras de água simultânea a passagem do satélite. Em 17 de julho de 1988 foi realizada a primeira missão de coleta de dados pela equipe do CRHEA em pontos amostrais selecionados com base em dados históricos de sensoriamento remoto. A Tabela 6 apresenta os parâmetros determinados em 10 diferentes estações amostrais.

A análise da Tabela 6 evidencia que alguns dos parâmetros medidos tem efeitos consideráveis sobre o comportamento espectral do volume d'água. Outros parâmetros, entretanto, têm efeitos desconhecidos, e estarão sendo estudados através de coleta e análise de dados espectrorradiométricos ao nível de campo e laboratório.

2 - Incorporação de dados de sensoriamento remoto em modelos de qualidade d'água já existentes.

A avaliação do nível trófico de reservatórios em geral é feita através de técnicas de modelagem (Cordeiro Neto e Colares, 1985) nos quais os dados de entrada do modelo são a carga de fósforo obtida a partir da estimativa dos seguintes parâmetros: vazões afluentes ao reservatório, vazões afluentes das estações de tratamento de esgotos, contribuição do lençol freático, escoamento superficial urbano, precipitação direta, vazão efluente do reservatório, etc. A aplicação desses modelos, entretanto não permite avaliar variações internas do nível trófico dos reservatórios. No lago Paranoá, por exemplo, a presença de braços permite identificar diferentes zonas quanto ao nível trófico, e implementar políticas diferenciadas de uso do solo para conter o processo de eutrofização. Neste caso, os dados de sensoriamento remoto poderiam ser utilizados como entrada

no modelo, permitindo um refinamento dos cálculos e a identificação dos limites espaciais dos diferentes compartimentos.

3 - Estudo das relações entre uso da terra e qualidade d'água.

A disponibilidade de dados históricos do sistema LANDSAT desde 1973 e de dados limnológicos sobre os reservatórios do Estado de São Paulo (Henry et alii, 1985) desde 1979, abre pers

**TABELA 6**  
**PARÂMETROS DE QUALIDADE D'ÁGUA AMOSTRADOS**  
**"IN SITU"**

PARÂMETRO	EFEITO PREVISÍVEL SOBRE A COR DA ÁGUA
pH	nenhum
Material em suspensão	elevado
Clorofila	elevado
Nutrientes (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>---</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	desconhecido
Radiação subaquática	elevado
Qualidade espectral	elevado
Perfil térmico	regular
Coefficiente de contraste de atenuação vertical	desconhecido

pectivas para uma ampla avaliação dos efeitos que a ocupação do solo na área de captação das represas têm sobre as propriedades físico-químicas da água. É conhecido, por exemplo, que o reservatório de Furnas sofreu um aumento rápido nos níveis de fósforo e nitrogênio entre 1975 e 1980, enquanto outros reservatórios mantiveram níveis estáveis. A avaliação das variações de uso do solo entre estas datas (aumento da atividade agrícola, tipos de culturas, etc.) permitirá quantificar o impacto do uso do solo sobre o processo de eutrofização.

4 - Incorporação de dados de sensoriamento remoto na otimização de esquemas de amostragem de dados de qualidade d'água.

Essa linha de cooperação está sendo adotada principalmente nos estudos de qualidade d'água do reservatório de Tucuruí. Neste reservatório existe uma rede de estações de amostragem localizadas em regiões heurísticamente definidas. Com o auxílio de dados de sensoriamento remoto digitalmente processados são gerados mapas com a compartimentação do reservatório em diferentes classes espectrais. Esses mapas podem ser utilizados para a distribuição de pontos de amostragem durante missões especiais. A partir da análise dos resultados pode-se então alocar novas estações amostrais para coletas de rotina.

5 - Estudo das relações entre albedo da água e produtividade primária dos sistemas aquáticos continentais.

O albedo da água limpa é de cerca de 2%, e representa a contribuição da energia refletida pela superfície d'água e da energia retroespalhada do volume d'água e transmitância atmosférica (Katsaros et alii, 1985). A energia refletida pela superfície é afetada por parâmetros tais como ângulo de incidência solar e velocidade dos ventos. A energia retroespalhada pelo volume, entretanto, varia com as propriedades físico-químicas da água. Deste modo, as variações de albedo da água podem estar associadas (mantidas constantes as variáveis transmitância atmosférica, vento e incidência solar) às modificações do campo de luz submerso. Este campo pode ser definido pela energia radiante total disponível a várias profundidades (Vollenweider, 1974). Este campo é caracterizado pelo gradiente vertical de atenuação e pelas modificações espectrais do campo de radiação com a profundidade. Em ambientes turbidos, por exemplo, o albedo da água é maior, e pode representar uma menor disponibilidade de luz nos ecossistemas aquáticos para que se processe a atividade fotossintética pelos organismos autótrofos. A intensidade de luz que atinge a camada autotrófica controla o ecossistema todo por meio de sua influência sobre a produção primária (ODUM, 1983).

O albedo de diferentes materiais da superfície pode ser estimado a partir de dados de sensoriamento remoto. Assim sendo, um campo de investigação, importante, seria o de

avaliar as relações entre albedo e produtividade de primária.

6 - Avaliação dos dados de sensoriamento remoto no estabelecimento de tipologia de reservatórios artificiais.

Existem diversos parâmetros de classificação de reservatórios. Em 1979 os reservatórios do Estado de São Paulo foram classificados em diferentes tipos (Tundisi, 1981) em função de suas propriedades físico-químicas e biológicas. Tais reservatórios, entretanto, estão em constante interação com os ecossistemas terrestres adjacentes, e estão sujeitos a diferentes níveis de interferência a trópica. Assim sendo, as características tipológicas de um reservatório num dado momento podem ser modificadas. Um meio rápido de avaliar tais modificações é através da utilização de dados de sensoriamento remoto em combinação com métodos limnológicos convencionais.

7 - Avaliação do processo de eutrofização dos reservatórios.

De acordo com o Plano Nacional de Recursos Hídricos, a eutrofização deve ser objeto de crescente ação preventiva e de controle. Para isso há a necessidade de se ter meios de se avaliar alterações nos níveis tróficos dos diferentes reservatórios.

As técnicas convencionais de avaliação tornar-se-ão, a médio prazo, de difícil aplicação dada a extensão ocupada pelos reservatórios em território brasileiro. Apenas no Estado de São Paulo há atualmente mais de 8.000km<sup>2</sup> de área ocupada por reservatórios. No ano 2000 haverá mais de 50.000km<sup>2</sup> de área ocupada por reservatórios em território nacional. O controle de nível trófico desses reservatórios se tornará proibitivo por métodos convencionais. Deste modo, um dos tópicos de cooperação técnico-científica entre os CRHEA e o INPE é voltado ao desenvolvimento de métodos de avaliação do processo de eutrofização através da incorporação de dados de sensoriamento remoto aos dados convencionais.

## 5. ESTUDOS PRELIMINARES REALIZADOS NO RESERVATÓRIO DE BARRA BONITA

### 1 - Características gerais de Área de Estudo

O reservatório de Barra Bonita faz parte de um complexo de represas situadas no rio Tietê e localizada pelas coordenadas de 22°29' de latitude sul e 18°34' de longitude oeste. O reservatório é formado pelo rio Tietê e pelo rio Piracicaba e possui uma bacia de captação de cerca de 32.000km<sup>2</sup> (13% da área total do Estado de São Paulo). Essa bacia de captação encontra-se localizada na região mais densamente povoada do Estado de São Paulo, e sujeita a um intenso processo de urbanização. Essa bacia de captação abriga os municípios da área metropolitana de São Paulo, e todos os grandes municípios do eixo industrial compreendido entre São Paulo, Campinas, Piracicaba com uma densidade demográfica média de 570 hab/km<sup>2</sup>.

2 - Análise da Variação Temporal das Propriedades Espectrais do Reservatório de Barra Bonita a partir de dados TM/LANDSAT

### 2.1 - Proposição da Hipótese de Trabalho

A análise da variação temporal dos valores de condutividade da água do reservatório de Barra Bonita entre setembro de 1983 e setembro de 1984 permitiu identificar duas condições ecológicamente distintas do reservatório: a) uma condição de baixa condutividade ( $200 \mu\text{Scm}^{-1}$ ) e vazões elevadas ( $100 \text{m}^3/\text{S}$ ); b) uma condição de alta condutividade de ( $350 \mu\text{Scm}^{-1}$ ) e vazões reduzidas ( $250 \text{m}^3/\text{S}$ ).

A condutividade de uma solução é função das substâncias ionizadas nela presente e de sua temperatura. A condutividade não fornece informações sobre a natureza das substâncias em solução na água mas dá uma idéia de sua concentração. Quanto maior a concentração, maior é a condutividade, embora a relação não seja linear, visto que a condutividade varia com o grau de ionização das substâncias em questão.

A concentração de íons dissolvidos ( $\text{mg l}^{-1}$ ) na água pode ser obtida multiplicando-se a condutividade em  $\mu\text{Scm}^{-1}$  por 0.01. Deste modo pode-se admitir que no período chuvoso (outubro a fevereiro) a concentração de íons no reservatório é da ordem de  $20 \text{mg/l}$ , enquanto no período seco (março a setembro) o valor praticamente dobra.

Em face dessas diferenças de condutividade e vazão, foi levantada a seguinte hipótese: a) as diferenças de condutividade refletem alterações nas propriedades físico-químicas do reservatório as quais podem ser detectadas através de dados de sensoriamento remoto.

Para testar essa hipótese foram adquiridos dados TM/LANDSAT correspondentes às épocas de máxima diferença no nível de condutividade da água do reservatório de Barra Bonita. Tais imagens foram submetidas a processamento digital de modo a se caracterizar os diferentes compartimentos do reservatório e suas respectivas propriedades espectrais.

### 2.2 - Análise Digital de Dados TM/LANDSAT

Os dados TM/LANDSAT utilizados no estudo referem-se a duas datas: a) novembro/86 representando a situação de baixa condutividade e b) agosto/85 representando a situação de período de alta condutividade.

Os dados foram corrigidos radiometricamente e posteriormente submetidos a um procedimento para minimizar os efeitos atmosféricos conforme sugestão de Tassan (1988). Os dados assim corrigidos foram submetidos a um procedimento de classificação supervisionada pelo critério de máxima verossimilhança. A média das classes resultantes foram convertidas em reflectância utilizando procedimentos descritos em Barker et alii (1985) e submetidas a testes estatísticos de diferenças entre médias.

### 2.3 - Resultados Preliminares

#### 2.3.1 - Variação da Reflectância da Água

A Tabela 7 apresenta as porcentagens médias de reflectância das classes espectrais de água nas faixas do azul (TM1); verde (TM2) e vermelho (TM3).

A análise da Tabela 7 permite verificar que no período de alta condutividade a porcentagem de reflectância da água é mais elevada nas diferentes classes espectrais quando comparado ao período de baixa condutividade, em todas as faixas espectrais analisadas. Outra diferença marcante é na distribuição espacial das classes: a) em agosto, não há distinção entre a água do rio Tietê e do rio Piracicaba em termos de reflectância, e há um aumento da reflectância em direção à jusante; b) em novembro, há diferenças entre a água do rio Tietê e do rio Piracicaba no tocante à reflectância, havendo em média a tendência de redução da reflectância em direção à jusante, e um ligeiro aumento na confluência dos dois rios no corpo central do reservatório.

A análise estatística dos dados demonstrou que há diferenças altamente significativas ( $\alpha.0.01$ ) entre as médias de reflectância da água do reservatório do período de alta para o período de baixa condutividade, em todos os comprimentos de onda analisados. Em agosto, as comportas estão fechadas e com isso há um aumento do tempo de retenção da água no reservatório. Essa condição de baixa ou nenhuma circulação da água no reservatório favorece a concentração de sedimentos e íons na água. Essa condição também favorece a homogeneização da água em todo o reservatório, de modo que mesmo com menor vazão, o rio Tietê passa a influenciar nas condições tróficas totais do corpo d'água. Esse fato é evidenciado pela comparação entre a compartimentação do reservatório em novembro e agosto. Em novembro o rio Tietê pertence a uma classe espectral diferente daquela do rio Piracicaba. Em agosto ambos os rios e a parte do corpo central do reservatório pertencem a uma mesma classe.

A grande questão que se coloca, entretanto, é o do significado físico dessas variações do comportamento espectral.

Estudos mais profundos sobre esse tema e eficiência das variáveis propostas por Rios et alii (1988), deverão ser feitos para que se chegue ao significado físico das classes espectrais remotamente determinadas.

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados do experimento inicial realizado em Barra Bonita confirmam as observações e comentários feitos nas seções 1, 2, 3 e 4 desse trabalho, quais sejam:

- 1) a complexidade e dinamismo dos sistemas aquáticos;
- 2) a utilidade dos dados de sensoriamento remoto como fonte adicional de informações sobre os ecossistemas em estudo;
- 3) a necessidade de estudos básicos que permitam inferir o significado físico das variações do comportamento espectral de água.

TABELA 7  
PORCENTAGEM DE REFLECTÂNCIA DA ÁGUA

RELLECTÂNCIA MÉDIA CLASSES ESPECTRAIS	AGOSTO			NOVEMBRO		
	TM-1	TM-2	TM-3	TM-1	TM-2	TM-3
Água do rio Tietê	8.75	6.29	7.06	1.00	2.30	3.8
Água do rio Piracicaba à montante	8.62	6.60	6.36	0.60	1.00	2.0
Água do rio Piracicaba à juzante	8.62	6.60	6.36	0.30	1.00	0.1
Confluência	9.39	7.03	7.40	0.80	0.40	1.0
Barragem	9.92	10.59	9.04			
Reflectância média para o reservatório	9.06	7.42	7.24	0.67	1.17	1.72
desvio padrão	0.57	1.79	1.10	0.29	0.80	1.58
CV	6%	24%	15%	44%	68%	92%

### 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, F.A.R.; TUNDISI, J.G. Primary production of phytoplankton and environmental characteristics of a shallow Quaternary lake at Eastern Brasil. *Archives of Hydrobiology* 90(2):139-161, 1980.
- BARKER, J.L.; ABRAMS, R.B.; BALL, D.L. and LEUNG, K.C. Radiometric Calibration and Processing Procedure for Reflective Bands on LANDSAT 4 Proto flight Thematic Mapper. LANDSAT-4 Science Characterization Early Results (NASA Conf. Pub. 2355). Greenbelt, M. 1985.
- BARTH, F.T.; POMPEU, C.T. Fundamentos para gestão de Recursos Hídricos. In: (Barth, F. T. et alii, ed.) *Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos*. São Paulo. Nobel/ABRH (Coleção AB e H de Recursos Hídricos), 1987.
- BARTH, F.H.; POMPEU, C.T.; GIL, H.D.; TUCCI, C. E.M.; KELMAN, J.; BRAGA JR., B.P.F. *Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos*. São Paulo. NOBEL/ABRH (Coleção ABRH de Recursos Hídricos).1987.
- BENTANCURT, J.J.V. Processamento de Dados Multiespectrais, obtidos por plataformas orbitais da série LANDSAT, para estudos de qualidade d'água na Baía da Guanabara. São José dos Campos. INPE, 1981. (INPE-2181-TDL).
- BRASIL, REPÚBLICA FEDERATIVA (MME/DNAEE/DCRH) Plano Nacional de Recursos Hídricos: documento preliminar, consolidando informações já disponíveis. Brasília, DNEE, 1986.
- BRASIL, REPÚBLICA FEDERATIVA (MI/OEA). PRODIAT Projeto de Desenvolvimento Integrado da Bacia do Araguaia-Tocantins. Programação do Desenvolvimento Industrial para a Região do PRODIAT, Brasília, 1985.
- BROWN, O.B.; EVANS, R.H.; BROWN, J.W.; GORDON, H.R.; SMITH, R.C. e Baker, K.S. Phytoplankton blooming of the U.S. east coast: a satellite description. *Science*, 299:169, 1985.
- CÁCERES, O.; TUNDISI, J.G.; CASTELLAN, O.A.M. Residues of organochloric pesticides in reservoirs in São Paulo State. *Ciência e Cultura* 39(3):259-264, 1987.
- CLARK, G.L.; EWING, G.C. and LOUZEN, C.J., 1970. Spectra of backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration. *Science*. 167:1119-1121.
- CORDEIRO, O.M.; COLARES, S.A.P. Aplicação de Modelos simplificados para a avaliação do nível de Eutrofização dos Lagos Paranoá e Descoberto no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Engenharia*. V 3 (2):21-35, 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*. (aceito para publicação.)
- ESTEVES, F.A.; BARBIERI, R. Dry weight and chemical changes during decomposition of tropical macrophytes in Lobo Reservoir - São Paulo, Brasil. *Aquatic Botany* 16:285-295, 1983.
- ESTEVES, F.A.; AMORIM, J.C.; CARDOSO, E.L.; BARBOSA, F.A.R. Caracterização Limnológica preliminar da represa de Três Marias (MG) com base em alguns parâmetros ambientais básicos. *Ciência e Cultura* 37(4):608-617, 1985.
- ESTEVES, F.A. Identificação e caracterização de alguns grupos de represas do Estado de São Paulo com base na composição química de seus sedimentos. *Ciência e Cultura* 38(3):540-545, 1986.
- GOETZ, A.F.H.; HENRING, M. The High Resolution Imaging spectrometer (HIRIS) for EOS.

- Proceedings of IGARSS'87 Symposium*, Ann Arbor, 18-21 May, p.367-373, 1987-
- 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 satellite estimates. *Applied Optics*, 22:20, 1983.
- GOWER, J.F.R. (ed). Oceanography from Space. *Advances in Space Research* 7(2):1-101, 1987.
- HARTMAN, C. *Utilização de Dados Digitais do Mapeador Temático para a obtenção dos padrões de distribuição do Material em suspensão na desembocadura da Laguna dos Patos*. Dissertação de Mestrado submetida ao Instituto de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1987.
- 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* 39(9):1553-1564, 1986.
- HENRY, R.; HINO, K.; GENTIL, J.G.; TUNDISI, J. G. Primary Production and Effects of Enrichment with Nitrate and Phosphate on Phytoplankton in the Barra Bonita Reservoir (State of São Paulo, Brazil) *Int. Revue für Hydrobiologie* 70(4):561-573, 1983.
- HERZ, R. Circulação das águas de superfície da lagoa dos Patos. Tese de Doutorado. São Paulo, USP, 1977.
- JUNK, W.J.; ROBERTSON, B.A.; DARWICH, J.A.; VIEIRA, I. Investigações limnológicas e ecotológicas em Curua-Una, a primeira represa hidrelétrica na Amazônia Central. *Acta Amazônica* 11(4):689-716, 1981.
- JUNK, W.J.; FURCH, K. The physical and chemical properties of Amazonian waters and their relationship with the biota. In: *Amazonia* (Prance, G.T. e Lovejoy, T.E. ed), Oxford, Pergamon Press p:3-17, 1985.
- KATSAROS, B.K.; 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(4):7313-7321 1985.
- NIHOUL, J.C.J. (ED.). *Remote Sensing of Shelf Sea Hydrodynamic* :1-24. Amsterdam, Elsevier. 1984.
- ODUM, E.P. *Ecologia*. Rio de Janeiro. Editora Guanabara, 1983.
- PERRY, M.J. Assessing marine primary productivity from space. *Biosc.* 36(71):461-467. 1986.
- RIOS, P.; KHO, S.; WRIGLEY, R.C. Use of LANDSAT TM Digital data for Estuarine water Quality Modeling. *Proceedings of the XVI ISPRS*, Kioto, julho, 1988. p. VII - 673 - 687.
- SAUSEN, T.M. *Estudo da dinâmica do alto São Francisco e reservatório de Três Marias, através de imagens MSS LANDSAT*. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, INPE, out., 1981 (INPE-2249-TDL/006).
- SCHMIDT, G.W. Primary Production of Phytoplankton in the Three Types of Amazonian waters. *Amazoniana* 4:517-528, 1976.
- STURM, B. Application of CZCS data to Productivity and water Quality Studies in the Northern Adriatic Sea. *Advances in Space Research* 7(2):47-52, 1987.
- TASSAN, S. The use of the Thematic Mapper for coastal water analysis. *Proceedings of the XVI ISPRS*, Kyoto, julho, 1988, p. VII - 564-575- 1988.
- TUNDISI, J. e TUNDISI, T.M. 1976. Produção Orgânica em Ecossistemas Aquáticos. *Ciência e Cultura* 28:864-887.
- TUNDISI, J.G.; GENTIL, J.G.; DIRECKSON, M.C. Seasonal cycle of primary production of nanno and microphytoplankton in a shallow tropical reservoir. *Revista Brasileira de Botânica* 1:35-39, 1978.
- TUNDISI, J.G. Ecologia Aquática no Brasil: Problemas e Perspectivas *Interciência* 5(6):373-379, 1980.
- TUNDISI, J.G. Typology of Reservoirs in Southern Brasil. *Internat. Verein. Limnol.* 21:1031-1039, 1981.
- TUNDISI, J.G. "Estratificação hidráulica" em reservatórios e suas consequências ecológicas. *Ciência e Cultura* 36(9): 1489-1496, 1984.
- TUNDISI, J.G. Limnologia de Represas Artificiais. *Boletim de Hidráulica e Aproveitamento* 11:1-46, 1986.
- VOLLENWEIDER, R.A. *A manual on Methods for measuring Primary Production in Aquatic Environments*. Oxford. Blackwell Scientific Publication, 1974.