



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5683-TDI/569

**COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA: FAIXAS
ESPECTRAIS DE MAIOR SENSIBILIDADE AO FITOPLÂNCTON
NA PRESENÇA DE MATÉRIA ORGÂNICA DISSOLVIDA E DE
MATÉRIA INORGÂNICA PARTICULADA**

José Eduardo Mantovani

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pela
Dra. Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo, aprovada em julho de 1993

528.711.7:574.583

MANTOVANI, J.E.

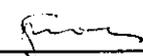
Comportamento espectral da água: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e matéria inorgânica particulada / J.E. Mantovani. - São José dos Campos: INPE, 1993.

119p. - (INPE-5683-TDI/569)

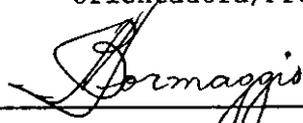
1. Plantas aquáticas. 2. Fitoplâncton. 3. Reflectância bidirecional. 4. Sedimentos. 5. Radiometria. I. Título.

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

Dra. Evelyn Marcia Leão Moraes Novo


Orientadora/Presidente

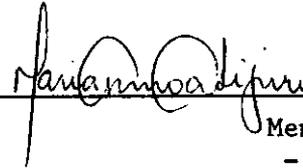
Dr. Antonio Roberto Formaggio


Membro da Banca

Dr. José Carlos Neves Epiphanyo


Membro da Banca

Dra. Maria do Carmo Calijuri


Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: José Eduardo Mantovani

• São José dos Campos, 13 de julho de 1993

AGRADECIMENTOS

À Dra. Evelyn M.L.M. Novo, pela orientação, amizade e permanente interesse com que acompanhou esta pesquisa;

aos Drs. Jose Galizia Tundisi e Maria do Carmo Calijuri pela colaboração e incentivo na fase de coleta dos dados;

à Dra. Thelma Krug pelo apoio e interesse na fase de análise estatística dos dados;

ao Sr. Carlos A. Steffen pelas valiosas sugestões sobre os passos metodológicos;

aos amigos Alexandre, Angelica, Ernesto, Iara, Joaquim, Marley e Ney pelo carinho, amizade, incentivo e colaboração na fase final da dissertação;

ao Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA/USP) pela disponibilidade do Laboratório de Limnologia e dos equipamentos utilizados na coleta de dados;

à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de bolsa de estudos;

ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), mais diretamente ao Laboratório de Radiometria (LARAD), pelas disponibilidades oferecidas durante o mestrado;

à banca examinadora pelas discussões e sugestões;

e a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Em experimentos de laboratório foi determinado o fator de reflectância bidirecional (FRB) de diferentes combinações de três componentes comuns aos ecossistemas aquáticos. As combinações foram feitas em tanques sob iluminação artificial controlada. Foram combinadas C. vulgaris, substâncias húmicas e argila (caulim). As amostras de C. vulgaris foram obtidas de culturas puras mantidas em laboratório. Substâncias húmicas foram extraídas de amostras de turfa e da decomposição de uma macrófita aquática. Caulim foi obtido de amostras de solo. O comportamento espectral dos três componentes foi analisado através das curvas de FRB, e as bandas de maior sensibilidade aos pigmentos fotossintetizantes presentes em C. vulgaris foram determinadas através de análise de sensibilidade e da distância normalizada. Caulim promoveu aumento da reflectância no intervalo de 400 a 900 nm. As substâncias húmicas promoveram diminuição da reflectância entre 400 e 670 nm, e aumento entre 670 e 900 nm. C. vulgaris mostrou faixas de aumento e faixas de diminuição da reflectância dependentes do revestimento interno dos tanques. As bandas de maior sensibilidade ficaram próximas dos picos de maior absorção pelos pigmentos clorofila **a** e carotenóides, e ainda próximas do pico de fluorescência da clorofila **a**.

SPECTRAL BEHAVIOUR OF WATER: SPECTRAL BANDS OF LARGER
SENSIBITIVITY TO PHYTOPLANKTON IN PRESENCE OF DISSOLVED
ORGANIC MATTER AND PARTICULATE INORGANIC MATTER

ABSTRACT

The bidirectional reflectance factor (BRF) of different combinations of three components commonly found in aquatic ecosystems was determined in laboratory experiments. The combinations were performed in tanks under controlled artificial light. C. vulgaris, humic substances and clay (caulim) were combined. The C. vulgaris samples were obtained from laboratory monospecific cultures. Humic substances were obtained by decomposition of an aquatic macrophyte and by extraction from a turfa sample. Caulim was extracted of a soil sample. The spectral response was analyzed through BRF curves. Sensitivity analysis and normalized distance were applied to identify the bands sensitive to photosynthetic pigment. The results showed an increase in the reflectance in the 400 to 900 nm interval due to caulim. Humic substances caused a decrease in the 400-670 nm interval and an increase in 670-900 nm. C. vulgaris caused an increase and a decrease in the BRF curve depending on the wavelenght. The bands of larger sensitivity were near the absorption maximum of chlorophyll a and carotenoid pigments, and also the bands near the maximun of chlorophyll a fluorescence.

SUMÁRIO

	<u>Pag.</u>
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xix
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - O sensoriamento remoto e o ecossistema aquático	1
1.2 - Objetivos	4
<u>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DE LITERATURA</u>	5
2.1 - O conceito de comportamento espectral	5
2.2 - O fitoplâncton, a matéria orgânica dissolvida e a matéria inorgânica particulada no ecossistema aquático	8
2.3 - Comportamento espectral da água	9
2.4 - Comportamento espectral do fitoplâncton	14
2.5 - Comportamento espectral do material inorgânico particulado	22
2.6 - Comportamento espectral da matéria orgânica dissolvida	27
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS</u>	31
3.1 - Descrição geral	31
3.2 - Infraestrutura	33
3.2.1 - Os tanques de radiometria	33
3.2.2 - Equipamentos, suporte e geometria de aquisição.	33
3.2.3 - As placas de referência	36
3.2.4 - Tanque de filtração de água	38
3.2.5 - Material inorgânico particulado	39
3.2.6 - Produção de matéria orgânica dissolvida	39
3.2.7 - A alga fitoplanctônica	42
3.3 - O experimento radiométrico	45
3.3.1 - A sequência de um experimento radiométrico ...	45
3.3.2 - Os núcleos dos experimentos radiométricos ...	46
3.4 - Processamento dos dados	50
3.4.1 - Comportamento espectral do fitoplâncton isoladamente.....	50
3.4.2 - Do fitoplâncton na presença de MIP e MOD	51
3.4.2.1 - Comportamento espectral da MOD	51

3.4.2.2 - Comportamento espectral do MIP	51
3.4.2.3 - Dos tratamentos com MIP e MOD	51
3.4.2.4 - Dos tratamentos com Fitoplâncton, MIP e MOD.	51
3.4.3 - Seleção das faixas espectrais	52
3.4.3.1 - Para o fitoplâncton isoladamente	52
3.4.3.2 - Para os tratamentos com fitoplâncton, MIP e MOD	53
 <u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	 55
4.1. - Comportamento espectral do fitoplâncton isoladamente	55
4.1.1 - Análise descritiva	55
4.1.2 - Análise estatística	63
4.2 - Comportamento espectral do fitoplâncton na presença de MIP e MOD	66
4.2.1 - Comportamento espectral da matéria orgânica dissolvida	67
4.2.2 - Comportamento espectral do material inorgânico particulado	69
4.2.3 - Comportamento espectral dos tratamentos com MIP e MOD	71
4.2.4 - Comportamento espectral dos tratamentos com Fitoplâncton, MIP e MOD	73
4.3 - Faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton	76
4.3.1 - Para o fitoplâncton isoladamente	76
4.3.2 - Para os tratamentos com Fitoplâncton, MIP e MOD	79
 <u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	 83
 GLOSSÁRIO	 87
 <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	 89

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - O alvo entendido como um sistema.....	06
2.2 - Modelo compartimental simplificado da ciclagem de matéria em um ecossistema aquático genérico.....	08
2.3 - Interação da REM com a água.....	10
2.4 - Comparação entre valores de radiância obtidos em diferentes altitudes sobre um corpo d'água...	11
2.5 - Espectro de absorção da água (do mar).....	13
2.6 - Distribuição angular da intensidade de radiação espalhada por um dado volume, no campo de radiação submerso.....	14
2.7 - Curvas de absorção de luz pela água e pelos pigmentos algais; as curvas aproximam-se das curvas obtidas "in vivo".....	17
2.8 - Reflectância espectral sobre o oceano Atlântico à uma altitude de 305 m, em função da concentração de clorofila.....	19
2.9 - Curvas teóricas de razão de irradiância para algumas concentrações de clorofila e feopigmentos.....	20
2.10 - Curvas teóricas da razão de irradiância em subsuperfície para algumas concentrações de clorofila a.....	21
2.11 - Padrões de espalhamento por partículas de diferentes tamanhos.....	22
2.12 - Radiância espectral para suspensões de amostras de solo em água.....	24
2.13 - Reflectância espectral residual de suspensões de material inorgânico particulado.....	25

2.14 - Reflectância de uma suspensão em função da concentração e da geometria de aquisição.....	26
2.15 - Comparação entre curvas de absorção de ácidos húmicos (A) e amostras com MOD (B).....	28
2.16 - Curvas de razão de irradiância em subsuperfície em função da variação da concentração de COD.....	30
3.1 - Fluxograma das atividades ligadas à realização dos experimentos radiométricos.....	32
3.2 - Estrutura básica de um experimento radiométrico. Exemplo com 3 tanques.....	34
3.3 - Geometria de aquisição (A), e o diâmetro do tanque de coleta (B).....	35
3.4 - Curvas de distribuição relativa da radiação das fontes de REM utilizadas.....	36
3.5 - FRB (valores médios) das placas de referência alternativas testadas.....	37
3.6 - Tanques de filtragem (A) e de armazenamento de água. (B).....	38
3.7 - Tanque de decomposição de matéria orgânica.....	40
3.8 - Curvas de coeficiente de absorção para as amostras de SHT.....	41
3.9 - Tanque de cultura de alga, construído em fibra de vidro.....	43
3.10 - Cultura de <i>C. vulgaris</i>	44
3.11 - Fluxograma das atividades de uma sessão de radiometria e processamento posterior dos dados.....	47
4.1 - FRB de 5 concentrações de Cla em três tanques de revestimentos diferentes.....	56
4.2 - FRB para cinco concentrações de Cla no tanque preto, obtidos em experimentos do tipo I.....	57

4.3 - FRB para quatro concentrações de Cl_a_t no tanque preto, obtidos em experimentos do tipo II.....	58
4.4 - FRB para seis concentrações de Cl_a_t no tanque preto, obtidos do 4º tanque durante os experimentos do tipo III.....	59
4.5 - FRB da água no tanque preto.....	60
4.6 - FRB para duas concentrações de Cl_a_t no tanque preto, sob iluminação intermitente.....	64
4.7 - FRB para duas concentrações de Cl_a_t no tanque preto sob iluminação contínua.....	65
4.8 - FRB para duas amostras de SHT no tanque preto, com diferentes valores de a (m^{-1}).....	69
4.9 - FRB de cinco concentrações de MIP ($mg\ l^{-1}$) no tanque preto.....	70
4.10 - FRB para as nove combinações de MIP e MOD escolhidas.....	71
4.11 - FRB para duas concentrações de Cl_a_t ($\mu g\ l^{-1}$) e as nove combinações de MIP e MOD escolhidas.	74
4.12 - FRB para duas concentrações de Cl_a_t e as nove combinações de MIP e MOD escolhidas....	75
4.13 - Curvas de sensibilidade para os três tanques com as cinco concentrações utilizadas (1:3:5:9:13), correspondentes à figura 4.1....	77
4.14 - Curvas de distância normalizada para três grupos de concentrações de Cl_a_t , correspondentes as figuras 4.2 (A); 4.3 (B) e 4.3 (C).....	78
4.15 - Curvas de distância normalizada resultante das combinações correspondentes às figuras 4.11a (A) e, 4.11b (B), e 4.12a (C).....	80

4.16 - Curvas de distância normalizada resultante da aplicação aos dados das figuras 4.11a e b e 4.12a.....	81
---	----

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Distribuição relativa dos pigmentos nos grupos algais	16
3.1 - Conteúdo de impurezas nas amostras de SHT utilizadas.....	42
3.2 - Concentrações utilizadas nos experimentos radiométricos com 3 tanques iguais.....	49
3.3 - Concentrações utilizadas nos experimentos radiométricos com 4 tanques iguais.....	49

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

a -	Coeficiente de absorção
ALP -	Tanque de radiometria de fundo preto e lateral cinza
AVIRIS -	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer
Cl _a (t) (a)	Clorofila a (total) (ativa)
COD -	Carbono orgânico dissolvido
CSS -	Concentração de sólidos em suspensão
CV -	Coeficiente de variação
CZCS -	Coastal Zone Color Scanner
DN -	Distância normalizada
EEM -	Energia eletromagnética
FOV -	Campo de visada
FRB -	Fator de reflectância bidirecional
FV -	Tanque de radiometria sem revestimento interno
GIFOV -	Área projetada no alvo pelo IFOV
G ₄₄₀ -	Coeficiente de absorção no comprimento de onda de 440 nm
IFOV -	Campo de visada instantâneo
HIRIS-	High Resolution Imaging Spectrometer
HRV -	High Resolution Visible
MI -	Matéria inorgânica
MIP(S) -	Material inorgânico particulado (em suspensão)
MO -	Matéria orgânica
MOD -	Matéria orgânica dissolvida
MSS -	Multispectral Scanner
P -	Tanque de radiometria com revestimento preto
REM -	Radiação eletromagnética
S -	Sensibilidade
SHT -	Substâncias húmicas totais
SHTN -	Substância húmica extraída do Neorgan-51
SHTD -	Substância húmica obtida via decomposição
SR -	Sensoriamento remoto
TM -	Thematic Mapper

ψ_i - Ângulo azimutal de iluminação
 ψ_o - Ângulo azimutal de observação
 θ_i - Ângulo zenital de iluminação
 θ_o - Ângulo zenital de observação

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - O SENSORIAMENTO REMOTO E O ECOSISTEMA AQUÁTICO

Os ecossistemas aquáticos estão sujeitos a grandes alterações, em muitos casos originadas por atividades antrópicas que modificam suas condições físico-químicas e biológicas. Em virtude da velocidade com que essas alterações ocorrem, aumenta a necessidade de estudos aprimorados desses ecossistemas, visando a compreensão dos processos que neles ocorrem, a fim de monitorá-los e tomar medidas adequadas para sua conservação ou recuperação.

Devido à heterogeneidade espaço-temporal dos ecossistemas aquáticos, os trabalhos de monitoramento precisam abranger grande parte da área ocupada (superfície líquida) e ser freqüentes. De modo geral, estas necessidades não são atendidas, e no Brasil em particular, com seus grandes rios, grandes planícies de inundação, crescente número de reservatórios e extenso litoral, esta deficiência torna-se marcante, fazendo com que os dados gerados tenham baixa representatividade espacial (Novo e Tundisi, 1988).

Neste contexto insere-se o sensoriamento remoto como um valioso potencial para obtenção de informações, na medida em que apresenta uma grande abrangência espacial e temporal de imageamento da superfície terrestre, auxiliando sobremaneira, ao lado da Limnologia e da Oceanografia, no estudo e monitoramento dos ecossistemas aquáticos (Schiebe e Ritchie, 1974; Collins e Pattiaratchi, 1984; Robinson, 1985; Curran e Novo, 1988).

Em sensoriamento remoto os dados são, fundamentalmente, as quantidades discretizadas espaço-temporalmente de radiação eletromagnética (REM) provenientes de alvos e que atingem um sistema sensor de radiação. A REM que atinge o sistema sensor é a fração daquela espalhada pelo alvo e que se propaga em sua direção dentro do ângulo sólido definido pelas suas características estruturais (subsistema óptico nos sensores ópticos e antena nos sensores não ópticos).

A REM refletida na superfície do ecossistema aquático, pode fornecer informações sobre a rugosidade da superfície e velocidade do vento, sobre macrófitas emersas e manchas de óleo, e sobre área e forma da superfície líquida. A REM que penetra no volume d'água e retorna em direção ao sensor pode fornecer informações sobre os componentes com os quais interagiu durante sua propagação na coluna d'água (Jerlov, 1968; Smith e Baker, 1978; Kirk, 1986).

Dentre os componentes distribuídos na coluna d'água e que alteram significativamente o comportamento espectral da água estão o fitoplâncton, as macrófitas imersas, as substâncias orgânicas dissolvidas oriundas da decomposição de matéria orgânica e as partículas minerais oriundas de solos e rochas erodidos, sendo que, geralmente, todos se encontram simultaneamente presentes nos ecossistemas aquáticos. A ocorrência simultânea desses componentes, sua complexa interação, e a interferência atmosférica, tornam os dados remotamente obtidos de difícil análise e interpretação.

O desenvolvimento de novos sensores e o refinamento das técnicas atualmente empregadas nos estudos de ecossistemas aquáticos exigem um conhecimento básico referente ao comportamento espectral dos corpos d'água, com suas peculiaridades no que tange às características físico-químicas e biológicas (Bricaud e Sathyendranath, 1981; Deering, 1989).

Embora estejam sendo utilizados dados gerados pelos sensores orbitais TM, MSS (LANDSAT) e HRV (SPOT), para estudos sobre ecossistemas aquáticos, os resultados não têm sido de grande fidelidade, seja pela dificuldade de correção atmosférica, seja por serem excessivamente largas suas bandas espectrais, ou ainda por terem resolução espacial ruim, principalmente para estudos em ecossistemas de maior heterogeneidade espacial como os continentais e os costeiros (Shu e Chen, 1987; Topliss, 1989).

Melhores resultados têm sido obtidos com os dados do sensor CZCS (NIMBUS), o qual foi projetado especificamente para estudos sobre o oceano (Carder et al., 1986; Dupoy et al., 1988; Vertucci e Likens, 1989).

Novos sensores estão sendo desenvolvidos, e ainda nesta década deverá entrar em operação o sistema EOS (Sistema de Observação da Terra), com sensores de grande resolução espectral. Um destes, o HIRIS (Espectrômetro Imageador de Alta Resolução), um sensor projetado com a preocupação de atender às necessidades do estudo de alvos aquáticos, gerará uma quantidade de dados muito grande (192 bandas no intervalo de 0,4 a 2,5 μm), ao ponto de obrigar o usuário a fazer uma seleção criteriosa das bandas de interesse para a requisição de imagens (NASA, 1987).

Com o objetivo de conhecer o comportamento espectral da água e de seus componentes, com a maior fidelidade possível, são recomendados estudos aos níveis de campo e de laboratório onde possam ser controladas ou escolhidas as condições de iluminação e a geometria de aquisição, bem como evitada a interferência atmosférica sobre a pequena intensidade de REM proveniente de alvos aquáticos (Morel e Prieur, 1977).

Desde o ano de 1989, com a melhoria da relação sinal-ruído, vem sendo testado o sensor AVIRIS (Espectrômetro imageador visível/infravermelho aerotransportado), um protótipo do HIRIS, no desenvolvimento de métodos e algoritmos para o estudo dos componentes aquáticos (Novo, 1992).

Estudos radiométricos em laboratório e em campo podem resultar em comportamentos espectrais diferentes, principalmente em função de diferenças na iluminação e na presença de alvos interferentes, o que ressalta a importância de estudos em ambos os níveis de aquisição (Bowker et al., 1985). Embora ao nível de campo os dados sejam mais fiéis à realidade dos ecossistemas aquáticos, uma proposta de amostragem nesse nível seria inviabilizada pelo grande número necessário de amostras de águas diferentes, pelo alto custo envolvido, e pela impossibilidade de controlar todos os outros fatores que afetam a reflectância da água.

Numa coleta ao nível de campo deveriam ser consideradas a profundidade, a profundidade Secchi, a direção e intensidade do vento, a composição da irradiância solar, e, principalmente, a enorme dificuldade de caracterizar completamente as amostras de água, devido à

insuficiências dos métodos analíticos (Rai, 1978; Mobley, 1993) e dos equipamentos disponíveis.

No presente trabalho foi estudado, ao nível de laboratório, o comportamento espectral da água contendo três componentes: fitoplâncton, matéria inorgânica particulada e substâncias orgânicas dissolvidas, com ênfase no estudo do fitoplâncton.

Embora esta pesquisa seja de aplicabilidade aos ecossistemas aquáticos de modo geral, seu enfoque está voltado para os ecossistemas aquáticos de água doce.

1.2 - OBJETIVOS

- 1) Conhecer o comportamento espectral de uma espécie fitoplanctônica quando na presença de matéria orgânica dissolvida e de matéria inorgânica particulada.
- 2) Determinar as faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton sob as condições propostas.
- 3) Desenvolver metodologias para o estudo do comportamento espectral do fitoplâncton em condições de laboratório.
- 4) Oferecer subsídios para o uso dos dados a serem gerados pelos novos sensores espectro-imageadores, no estudo do fitoplâncton.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DE LITERATURA

Como esta pesquisa envolveu, além da própria água, mais três componentes distintos, esta revisão é apresentada em seções. A primeira é dedicada a algumas questões referentes ao estudo do comportamento espectral de alvos; a segunda traz uma breve apresentação da posição, dentro da ciclagem de matéria, destes três componentes em um ecossistema aquático genérico; e, em seguida, é abordado o comportamento espectral de cada componente separadamente.

2.1 - O CONCEITO DE COMPORTAMENTO ESPECTRAL

O termo "comportamento", muito empregado nas ciências naturais, referindo-se às reações dos seres vivos, pode ser empregado em sensoriamento remoto, considerando-se que os alvos podem ser entendidos como sistemas.

Para a questão: Como se comporta tal sistema ... ?, é necessário definir as condições sob as quais tal sistema é subordinado, e isto é válido tanto para sistemas que respondem deterministicamente quanto para aqueles que respondem estocasticamente.

A resposta a essa questão é dada pelo próprio comportamento do sistema, o qual deve ser analisado e interpretado para: 1) tornar possível prognósticos sobre o comportamento do sistema em condições diversas; 2) identificar as entradas quando são conhecidas as respostas e, 3) estudar as características do sistema quando são conhecidas as entradas e as respostas.

Em sensoriamento remoto, o objetivo é identificar o sistema (alvo) ou suas características através do estudo integrado da radiância e da irradiância, ou ainda pela comparação entre valores diferentes de radiância, para alvos emissores de REM. (Figura 2.1).

Se o entendimento do sistema depende da fidelidade da observação, pode-se afirmar que o conhecimento adquirido sobre as reais/totais características do alvo através do sensoriamento remoto (SR) é apenas parcial, pois a REM que pode ser captada e

registrada é uma fração daquela que deixa o alvo. Devido ao grande avanço tecnológico atual, que se reflete em todos os segmentos do sensoriamento remoto, presencia-se uma melhora significativa nas capacidades de detecção e registro da REM proveniente dos alvos na superfície terrestre.

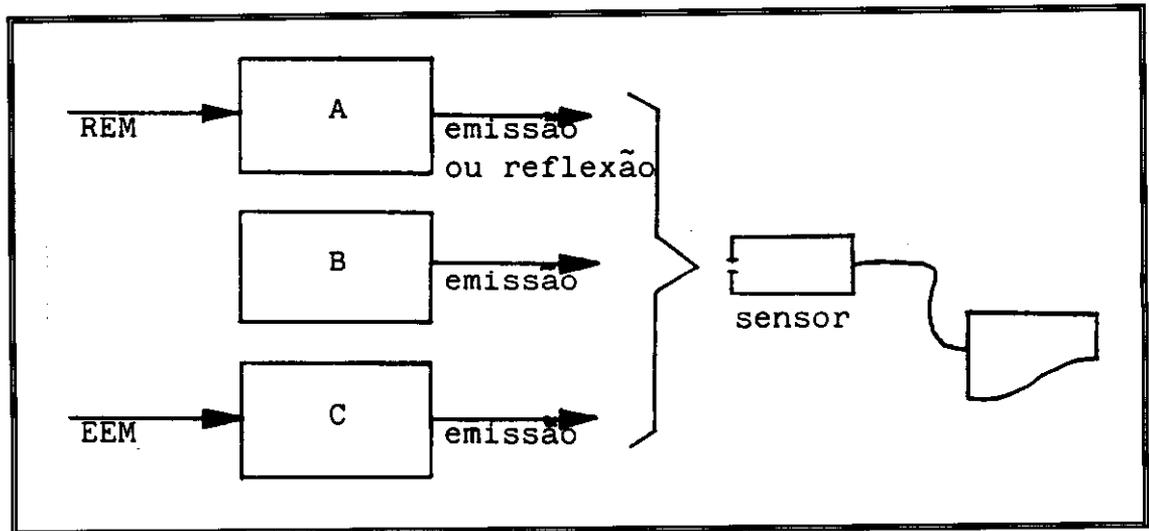


Fig. 2.1 - O alvo entendido como sistema que emite REM. (A) respondendo a uma incidência de REM; (B) respondendo a condições internas; (C) respondendo à entrada de EEM. O sensor fornece um sinal que deve ser proporcional à REM detectada.

Na literatura é freqüente a presença da expressão "assinatura espectral" ("spectral signature" e "signature spectrale", em inglês e em francês, respectivamente), para designar curvas de reflectância do alvo ou fator de reflectância. Tais curvas são apresentadas muitas vezes sem que sejam mencionadas as condições do alvo, as características da REM incidente e a geometria de aquisição, fatores estes que influenciam decisivamente na resposta do alvo (Nicodemus et al., 1977; Slater, 1980; Sturm, 1980; Sydor, 1980; Novo, 1989).

Outro problema relacionado ao conceito de comportamento espectral é o do significado da expressão "assinatura espectral", a qual denota uma condição de imutabilidade carregada pelo seu primeiro termo "assinatura". Termo que é utilizado cotidianamente como

designação de um padrão gráfico de identificação individual.

Assim sendo, neste trabalho esta expressão foi substituída pela expressão "reflectância espectral", baseada na definição de Slater (1980, Cap. 10, p. 288) para a expressão "assinatura espectral", e é a seguinte: "reflectância espectral de um alvo é o conjunto de seus valores de reflectância, obtidos numa situação definida de irradiância e geometria de aquisição, sendo cada valor correspondente à reflectância num dado intervalo de comprimentos de onda, dentro da faixa espectral empregada".

Decorrentes desta definição, tornam-se possíveis inúmeras curvas de reflectância espectral, para um alvo qualquer, em função da mudança de quaisquer das variáveis por ela englobadas.

Neste ponto, pode-se apresentar uma definição para a expressão utilizada no título desta dissertação, ou seja, "Comportamento Espectral", como sendo: "a manifestação das características de um alvo através de uma ou mais curvas de reflectância ou de emitância espectral".

Tendo em mente que as variações nas condições de aquisição podem influenciar a resposta do alvo, pode-se supor a existência de uma ou mais condições ótimas de aquisição para cada tipo de alvo.

Outra questão fundamental no estudo do comportamento espectral é a da heterogeneidade espaço-temporal inerente aos alvos "naturais", isto é, um alvo é uma entidade definida por um conjunto de características e/ou propriedades geralmente dinâmicas. Um exemplo pode ser a extrema variabilidade que um corpo d'água apresenta em várias de suas características (Wetzel, 1975).

Diante disso, assume real importância o estudo detalhado do alvo, através de seu comportamento espectral, em suas diversas condições, como por exemplo, os diversos estádios de uma sucessão vegetal, ou de desenvolvimento de uma cultura agrícola, ou ainda da intemperização de rochas.

Embora em SR os alvos sejam estudados através de seus comportamentos espectrais, medidas ópticas complementares podem ser obtidas para alvos translúcidos. Vegetação e água, por exemplo, são alvos translúcidos em certas faixas espectrais, permitindo que medidas de transmitância auxiliem no entendimento de seus comportamentos espectrais.

2.2 - O FITOPLÂNCTON, A MATÉRIA ORGÂNICA DISSOLVIDA E A MATÉRIA INORGÂNICA PARTICULADA NO ECOSISTEMA AQUÁTICO

Estes três componentes guardam estreita relação com a água, pois, sua distribuição depende fundamentalmente da movimentação e densidade das massas de água.

O fitoplâncton ocupa papel de destaque no ecossistema aquático por formar, juntamente com as macrófitas aquáticas e o perifiton, o nível dos produtores primários responsáveis pela produção autóctone de matéria orgânica (MO). (Figura 2.2).

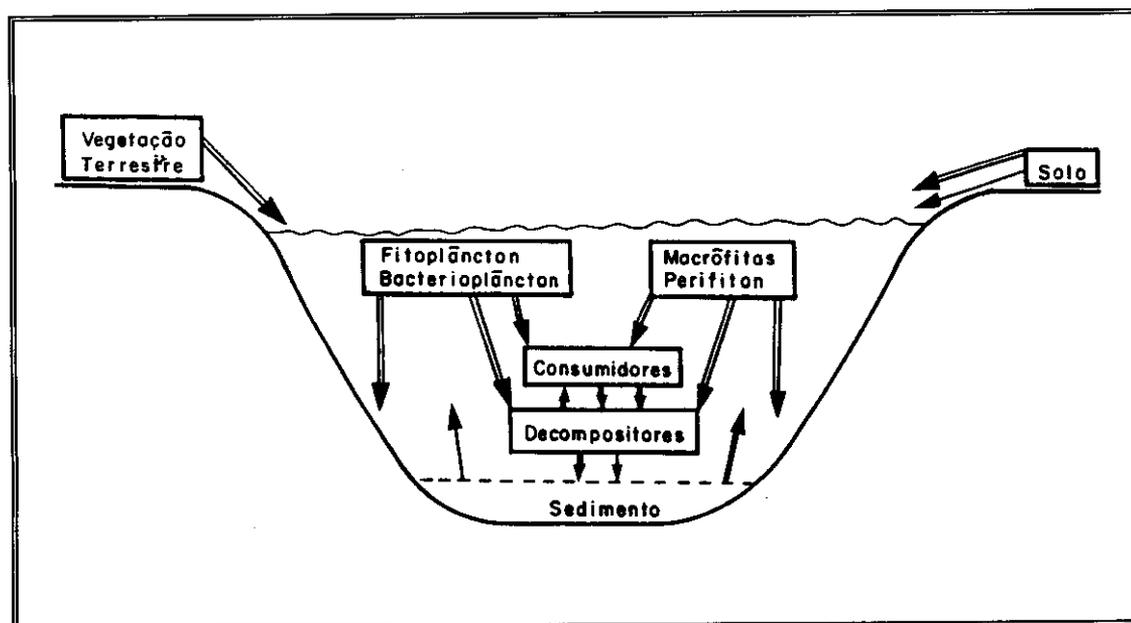


Fig. 2.2 - Modelo compartimental simplificado da ciclagem de matéria em um ecossistema aquático genérico. (→) fluxo de matéria inorgânica (MI); (⇒) fluxo de MO.

Os produtores primários caracterizam-se pela transformação de MI em MO, utilizando principalmente nutrientes inorgânicos e a energia da luz solar.

A vegetação terrestre pertencente à bacia hidrológica também pode contribuir para a manutenção da rede trófica do ecossistema aquático.

As águas de lixívia e o vento transportam substâncias dissolvidas e partículas, orgânicas e inorgânicas, para o ecossistema aquático fornecendo, junto com o sedimento de fundo do corpo d'água, nutrientes para os produtores primários aquáticos.

As partículas inorgânicas são principalmente silte e minerais de argila, que são as menores e permanecem mais tempo em suspensão (Cabral et al., 1990).

A MO é consumida pelos consumidores e pelos decompositores, sendo que estes últimos aceleram grandemente os processos de transformação da MO em MI, completando o ciclo da matéria.

Através de excreções e secreções por parte dos organismos aquáticos e durante os processos intermediários da decomposição é liberada a matéria orgânica dissolvida, um conjunto de moléculas orgânicas que inclui substâncias que conferem cor marrom-amarelado à água.

A fração dissolvida pode ser a maior fração da matéria orgânica total de um ecossistema, dependendo dos fluxos de entrada e da densidade de produtores primários presentes (Wetzel, 1975; Esteves, 1988).

2.3 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA

A abordagem a seguir sobre as propriedades espectrais da água foi baseada nos trabalhos de Jerlov (1976), de Kirk (1986) e Curran e Novo (1988).

A radiação que atinge o sensor é formada por radiação espalhada pela atmosfera e por radiação proveniente das interações macroscópicas e microscópicas com o volume d'água (Figura 2.3).

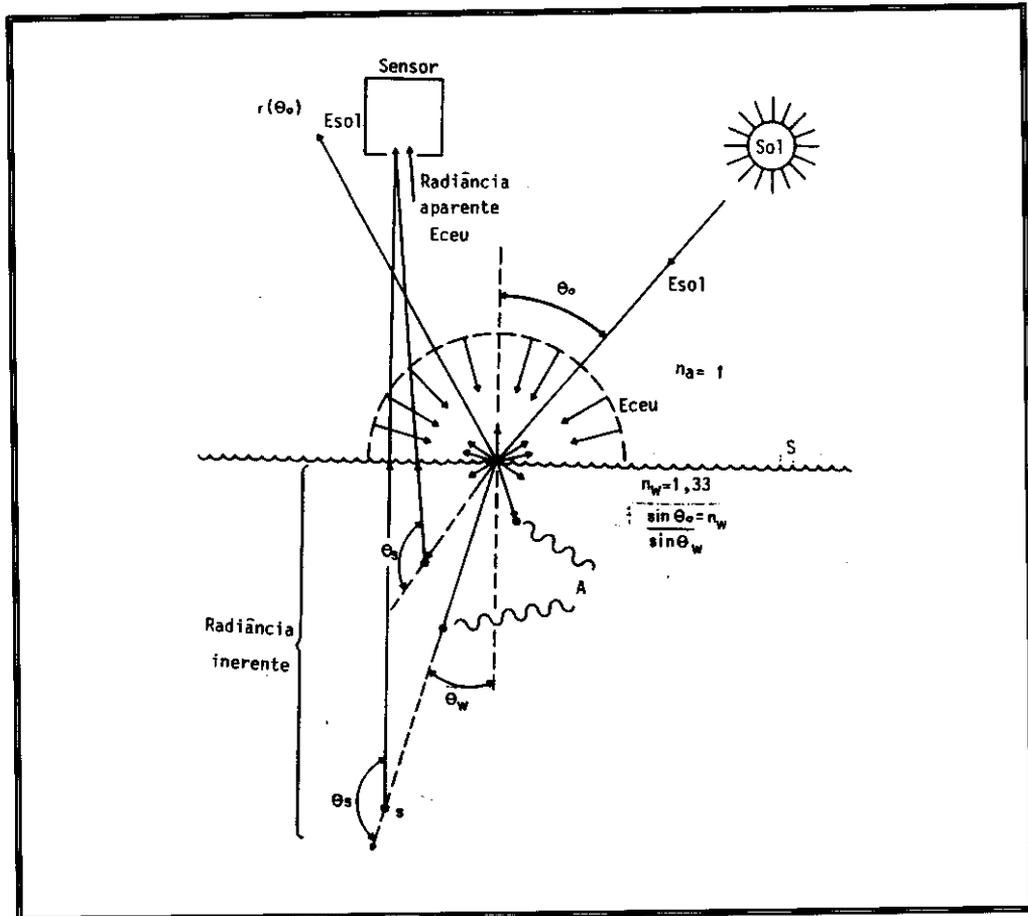


Fig. 2.3 - Interação da REM com a água.

E_{sol} : irradiância solar; E_{ceu} : irradiância difusa;
 θ_0 : ângulo solar zenital; S : interface; r : ângulo de reflexão especular; θ_w : ângulo de refração; θ_s : ângulo de espalhamento; A : absorção; n_a e n_w : índices de refração do ar e da água respectivamente.

FONTE: Curran e Novo (1988), p. 355.

A radiação refletida na interface ar-água e que atinge o sensor depende, basicamente, além do índice de refração, da rugosidade da superfície e da geometria de aquisição.

Uma característica importante da reflexão é a polarização total da radiação refletida que ocorre no ângulo de Brewster, permitindo a separação da radiação refletida na superfície daquela proveniente da coluna d'água através de filtros polarizadores.

A radiação proveniente da atmosfera pode chegar a cerca de 90% da radiação que atinge um sistema sensor orbital posicionado sobre um corpo d'água, dependendo das condições próprias da atmosfera e da geometria de aquisição (Hovis, 1977), (Figura 2.4).

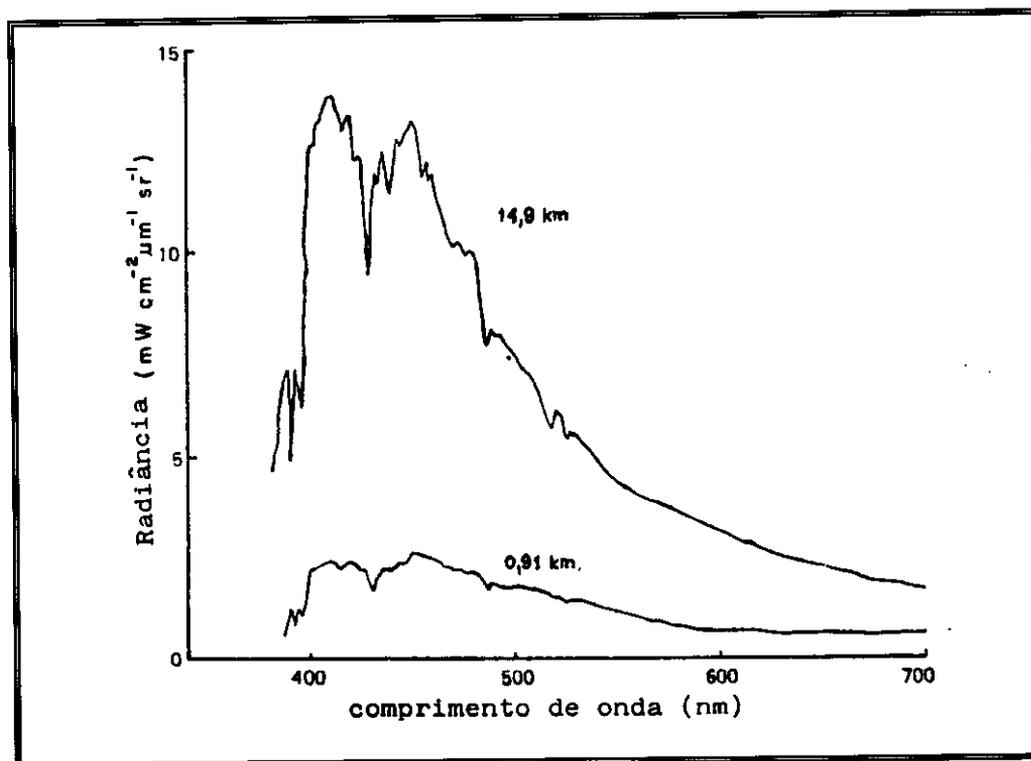


Fig. 2.4 - Comparação entre valores de radiação obtidos em diferentes altitudes sobre um corpo d'água.
FONTE: Hovis (1977), p. 142.

Finalmente, a radiação proveniente do volume d'água é aquela que pode fornecer informações sobre as características físico-químicas e biológicas da coluna d'água e do leito, sendo útil no estudo do comportamento espectral do ecossistema aquático.

A radiação que penetra na água sofre absorção e espalhamento, que juntos atenuam a sua propagação.

O coeficiente de absorção (a) é determinado pela fração absorvida (A) do fluxo incidente sobre uma fina camada de água, dividida pela espessura dessa camada (r):

$$a = A/ r.$$

O coeficiente de espalhamento (b) é determinado pela fração espalhada (B) do fluxo incidente sobre uma fina camada de água, dividida pela espessura dessa camada:

$$b = B/ r.$$

A absorção está ligada intimamente à quantização da REM e às propriedades da molécula de água, e ocorre com a molécula passando de um estado energético para outro, em intervalos discretos, através de processos vibracionais ou rotacionais (responsáveis pelo aquecimento da água). A liberação da energia absorvida promove a volta da molécula ao estado anterior.

Estas características moleculares fazem com que a absorção aumente à medida em que se afasta da faixa do azul no espectro eletromagnético, em direção ao ultravioleta e ao infravermelho, o que limita uma pequena faixa útil para estudos sobre o volume d'água, isto é, na faixa do espectro refletivo os menores coeficientes ocorrem no visível (Figura 2.5).

O espalhamento promove a mudança de direção da luz, e na água (pura), é causado por pequenas flutuações de densidade que agem como dipolos, segundo a teoria de Smoluchowski-Einsten, com constantes dielétricas diferentes, resultando num espalhamento muito próximo daquele previsto pela teoria de Rayleigh, segundo a qual o espalhamento é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda.

Destas duas propriedades inerentes decorrem outras que são também fundamentais para o estudo dos ecossistemas aquáticos.

Os corpos d'água naturais podem ser caracterizados através de duas propriedades ópticas fundamentais, que são a função de volume de espalhamento e a função de volume de atenuação. Estas propriedades dependem apenas das características do meio hídrico e não de características do campo de radiação incidente.

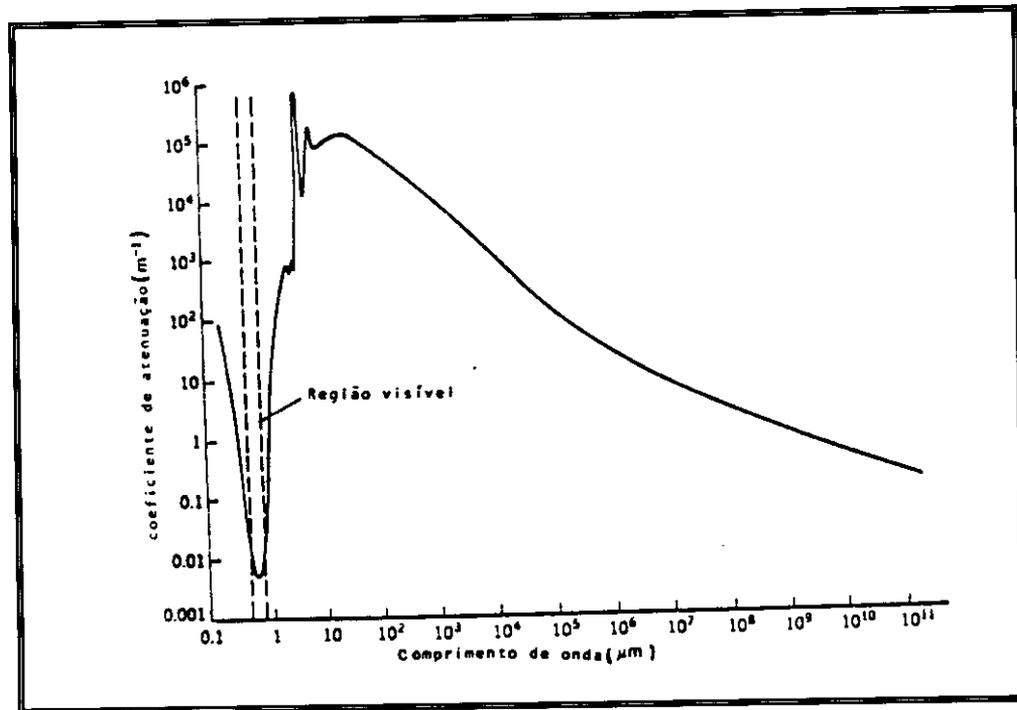


Fig. 2.5 - Espectro de absorção da água (do mar).
Fonte: Szekiêlda (1988), p. 83.

A função de volume de espalhamento (σ) fornece a distribuição espacial da intensidade de radiação proveniente de um dado volume d'água, em função da radiação incidente sobre o mesmo:

$$\sigma = dI(\theta)/E dV$$

onde $I(\theta)$ é a intensidade radiante no ângulo θ e E é a irradiância que atinge o volume V .

No espalhamento em água pura verifica-se uma simetria entre o espalhamento frontal e o retroespalhamento, e em águas túrbidas, um maior espalhamento frontal (Figura 2.6).

A função de atenuação de volume (α) fornece uma medida da perda (absorção + espalhamento) de radiação num dado comprimento de onda, segundo a equação:

$$\alpha = (-1/r) \ln Tr$$

onde r é a distância percorrida pela radiação e Tr é a radiação transmitida nesta distância.

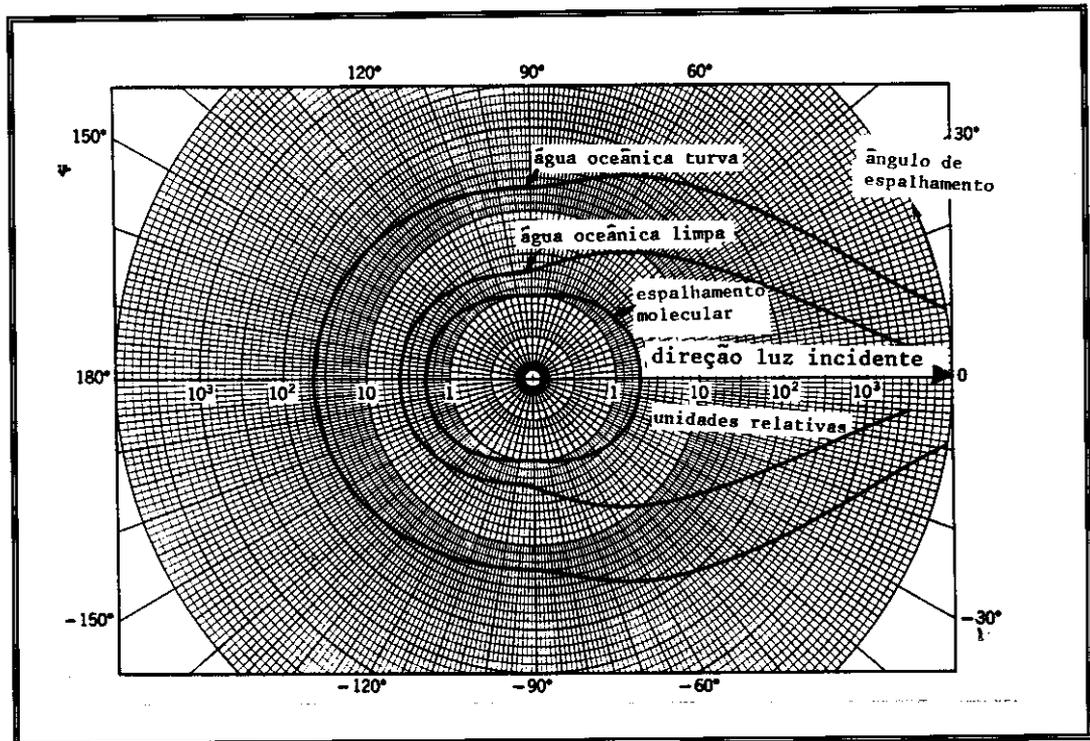


Fig. 2.6 - Distribuição angular da intensidade da radiação espalhada por um dado volume, no campo de radiação submerso.

FONTE: Mertens (1970), p. 35.

Segundo esta equação, a radiação transmitida decresce exponencialmente com a distância percorrida.

Como estas duas propriedades dependem apenas das características do meio líquido, elas fornecem informações sobre a presença de substâncias na água, ou seja, o estudo da água através do SR baseia-se no fato de que características intrínsecas ao corpo d'água determinam suas propriedades ópticas independentes, que por sua vez, influenciam a REM que atinge o sistema sensor.

2.4 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO FITOPLÂNTON

Ao contrário dos outros dois componentes envolvidos, as algas planctônicas absorvem REM ativamente, para a realização da fotossíntese, que é a fixação de energia eletromagnética radiante na síntese de compostos orgânicos.

A captura dos fótons é feita por estruturas especializadas, sendo que o pigmento clorofila *a* é o único presente em todos os vegetais e também é aquele que realmente dá início à síntese dos compostos orgânicos.

Os demais pigmentos são considerados acessórios, isto é, apenas capturam os fótons e transferem para o primeiro (Steeman-Nielsen, 1975). A Tabela 2.1 mostra a distribuição de pigmentos nos grupos algais.

A proporção entre os pigmentos nas células varia, dependendo das condições reinantes e da história fótica do fitoplâncton (Calijuri, 1988). A quantidade de pigmentos dentro da célula varia muito em função da luz, sendo maior para algas sob baixa iluminação e menor para aquelas sob alta intensidade luminosa. O conteúdo de clorofila em algas situa-se normalmente entre 0,5 e 1,5% do peso seco, mas já foram observados valores entre 0,01 e 6% em *Chlorella* sp (Spoc e Milner (1949), citados por Round, 1983).

Segundo Fogg (1975), a resposta fisiológica de algas em cultivo para mudanças na intensidade luminosa é muito rápida, em torno de 1 ou 2 gerações, e a eficiência na captura de luz é maior nos organismos sob baixa intensidade luminosa.

Os diferentes pigmentos capturam fótons com máxima eficiência em comprimentos de onda distintos, sem entretanto haver prejuízo para qualquer um, uma vez que a diferença energética entre os fótons não tem significado na fotossíntese (Steeman-Nielsen, 1975), (Figura 2.7).

Segundo Round (1983), esta distribuição relativa dos pigmentos dentro dos grupos algais pode permitir uma zonação na distribuição dos grupos, verificável principalmente em macroalgas, em função da disponibilidade de luz na coluna d'água. Desse modo, as Chlorophyta podem distribuir-se pelas camadas superficiais, as Phaeophyta nas camadas intermediárias e as Rhodophyta nas camadas mais profundas da zona eufótica.

TABELA 2.1 - DISTRIBUIÇÃO RELATIVA DOS PIGMENTOS NOS GRUPOS ALGAI.

Pigmentos	Grupos Algais									
	Chlorophyta	Bryopsidophyceae	Euglenophyta	Xanthophyta	Chrysophyta	Bacillariophyta	Phaeophyta	Dinophyta	Rhodophyta	Cyanophyta
Clorofilas										
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
b	2	2	3	-	-	-	-	-	-	-
c	-	-	-	-	3	3	3	3	-	-
d	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-
e	-	-	-	3	3	-	-	-	-	-
Carotenos										
α	3	1	-	-	-	3	3	-	3	-
β	1	3	1	1	1	1	3	1	1	1
γ	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ε	-	3	-	-	-	3	-	-	-	-
Flavacina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Xantofilas										
Luteína	1	3	1	3	3	-	3	-	2	3
Zeaxantina	3	3	-	-	-	-	-	-	3	3
Violoxantina	3	3	-	3	-	-	3	-	3	-
Flavoxantina	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-
Neoxantina	3	3	3	3	-	-	3	-	-	-
Sifoneína	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-
Sifonoxantina	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-
Fucoxantina	-	-	-	3	3	2	1	-	-	-
Neofucoxantina	-	-	-	-	-	3	3	-	-	-
Diatoxantina	-	-	-	-	-	3	3	-	-	-
Diadinoxantina	-	-	-	-	-	3	3	3	-	-
Neodiadinoxantina	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-
Peridinina	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-
Neoperidinina	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-
Mixoxantina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Myxoxantofila	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
Osciloxantina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Astaxantina	3	-	3	-	-	-	-	-	-	-
Xantofila desconhecida	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-
Ficobilinas										
R-ficoeritrina	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
R-ficocianina	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-
C-ficoeritrina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
C-ficocianina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
β-ficoeritrina	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-
Alfococianina	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-

1: pigmentos principais; 2: em concentração intermediária;
3: em pequenas quantidades.

FONTE: Simplificada de Round (1983), p. 163.

Além da forte ação absorvedora dos pigmentos, também as outras estruturas celulares das algas interagem com a REM, de modo que são diferentes os espectros de absorção dos pigmentos "in vivo" e "in vitro", fenômeno conhecido como efeito pacote (Kirk, 1986). Este provoca um leve deslocamento lateral e diminuição da intensidade dos picos de absorção. Células desenvolvidas sob baixa iluminação devem apresentar um efeito pacote menor, por terem maior concentração de pigmentos que células cultivadas sob luz intensa.

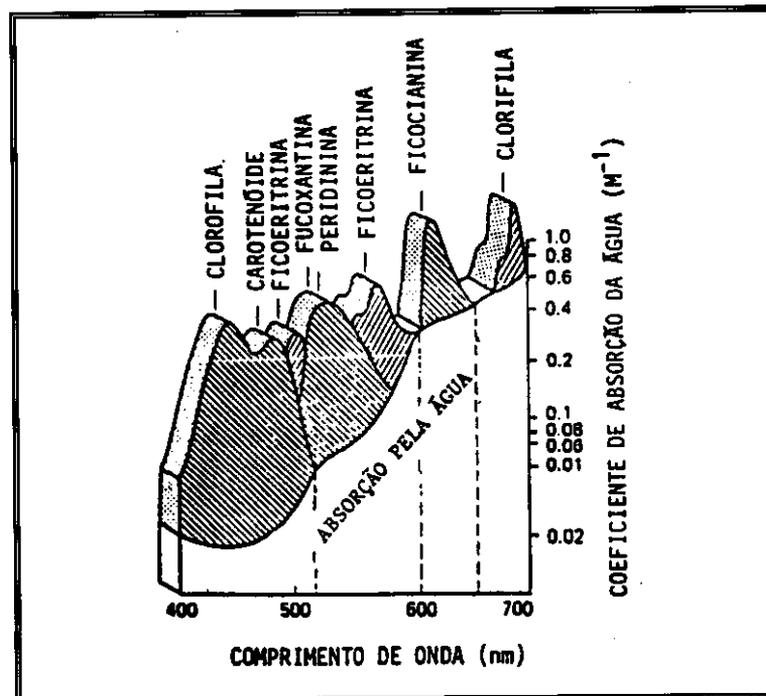


Fig. 2.7 - Curvas de absorção de luz pela água e pelos pigmentos algais. As curvas aproximam-se das curvas obtidas "in vivo".

FONTE: Yentsch (1980), p. 98.

A forma e o tamanho das células ou colônias influenciam grandemente na eficiência com que estas podem absorver a REM incidente, isto é, formas esféricas pequenas apresentam maior eficiência que formas esféricas grandes e formas cilíndricas finas apresentam maior eficiência que formas elipsoidais, para um mesmo volume de biomassa e concentração de pigmentos (Kirk, 1986; Agusti e Philips, 1992).

Vários estudos vêm sendo realizados com o

objetivo de desenvolver algoritmos com os quais seja possível estimar com maior precisão a concentração de pigmentos fitoplanctônicos.

Uma linha de estudos dedica-se à obtenção de dados "in situ", como coeficiente de absorção, coeficiente de espalhamento, reflectância de irradiância em sub-superfície e curvas de reflectância logo acima da superfície, que alimentam modelos desenvolvidos para estimar alguns parâmetros tais como salinidade, concentração de clorofila *a* e feopigmentos, concentração de substâncias amarelas e de material particulado em suspensão (Morel e Prieur, 1977; Smith e Baker, 1978; Bukata et al., 1983; Carder et al., 1986; Bidigare et al., 1989; Megard e Bermam, 1989; Topliss, 1989; Vertucci e Likens, 1989).

Outra linha, empregando dados coletados ao nível orbital, calibrados com dados coletados "in situ", dedica-se à estimativa de clorofila *a* ou de material em suspensão, geralmente com baixa precisão dos valores resultantes (Shu e Chen, 1987; Novo e Godoy, 1989; Topliss, 1989; Vertucci e Likens, 1989). Dentro desta linha, Gordon e Morel (1983), apresentam uma revisão da física óptica que envolve o sensoriamento remoto do oceano, bem como os algoritmos necessários para a utilização de imagens do sensor CZCS (satélite NIMBUS, fora de operação).

Uma terceira linha constitui-se de estudos que empregam dados coletados "in situ" e ao nível de aeronave, em muitos casos no desenvolvimento ou teste de novos sensores. Ao nível de aeronave os resultados são melhores que ao nível orbital, isto porque a interferência atmosférica é menor, a geometria de aquisição pode ser escolhida, a simultaneidade com a coleta "in situ" é maior e o tamanho do GIFOV pode ser escolhido de modo a respeitar a heterogeneidade espacial do ambiente aquático (Bowker, 1983; Rimmer et al., 1987).

Dentro desta mesma linha, mas com o emprego de sensores ativos que induzem a fluorescência de pigmentos fotossintetizantes, pela emissão de feixes colimados de REM, em bandas tão estreitas quanto 1 nm (Laser), alguns estudos mostraram ser possível estimar a concentração de clorofila *a*, diferenciar grupos fitoplanctônicos quanto à predominância relativa de certos pigmentos

fitossintetizantes e diferenciar clorofila *a* de substâncias amarelas (Exton e Houghton, 1981; Farner, 1981; Hoge e Swift, 1981).

Raros são os estudos sobre comportamento espectral de fitoplâncton ao nível laboratorial, como é proposto nesta pesquisa, embora sua importância seja reconhecida (Morel e Prieur, 1977; Sathyendranath et al., 1989; Vertucci e Likens, 1989; Topliss, 1989).

Clarke et al. (1970), registraram ao nível de aeronave (305 m de altitude) a variação na reflectância espectral para concentrações diferentes de clorofila *a* (Figura 2.8).

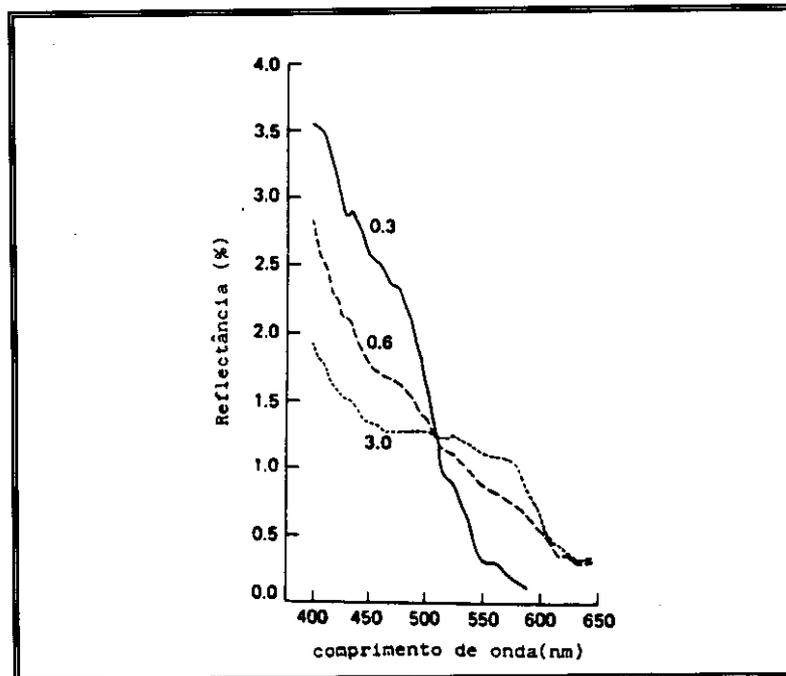


Fig. 2.8 - Reflectância espectral sobre o oceano Atlântico a uma altitude de 305 m, em função da concentração de clorofila *a*.

Concentração em $\mu\text{g l}^{-1}$, indicada nas curvas.

FONTE: Clarke et al. (1970), p. 1121.

Verificaram um decréscimo na faixa do azul e um pequeno acréscimo na faixa do vermelho, o que significa maior sensibilidade à variação da clorofila *a* na faixa do azul.

Entretanto estes autores não determinaram as concentrações de outros componentes que poderiam ter influenciado tal comportamento espectral.

Smith e Baker (1978) calcularam, através de modelos, curvas de razão de irradiância para alguns valores de concentração de clorofila + feofitina, obtendo um aumento da reflectância nas faixas do verde e do vermelho e uma diminuição na faixa do azul (Figura 2.9).

Comportamento parecido foi obtido por Bukata et al. (1983), também através de curvas teóricas da razão de irradiância e com modelos matemáticos, para algumas concentrações de Clorofila ((Figura 2.10).

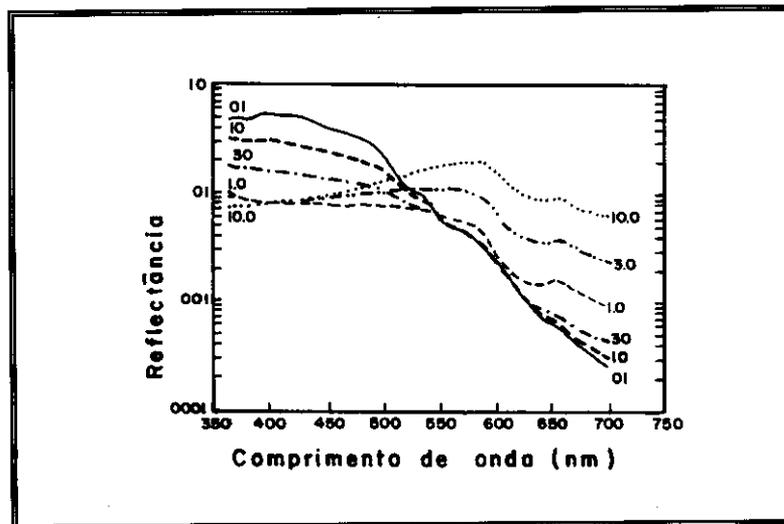


Fig. 2.9 - Curvas teóricas de razão de irradiância para algumas concentrações de clorofila e feopigmentos.

Concentração em $\mu\text{g l}^{-1}$, indicada nas curvas.

FONTE: Smith e Baker (1978), p. 266.

A maior diferença entre os resultados destes dois trabalhos parece ser a presença de um ponto de interseção nas curvas obtidas por Bukata et al. (1983). Este ponto representa o comprimento de onda no qual seria mais difícil a detecção de variações na concentração de clorofila no meio.

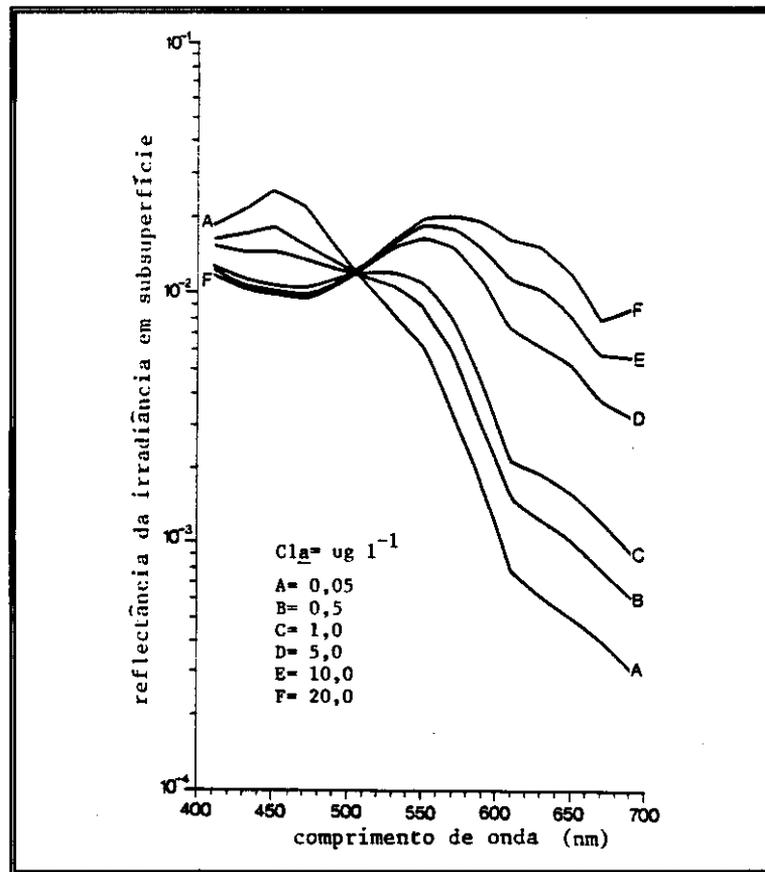


Fig. 2.10 - Curvas teóricas da razão de irradiância em subsuperfície para algumas concentrações de clorofila *a*.

FONTE: Bukata et al. (1983), p. 166.

O comportamento apresentado nestas três últimas figuras, ou seja, decréscimo na faixa do azul e acréscimo nas faixas do verde e do vermelho, deve-se ao fato de que o fitoplâncton pode ser tratado como sendo um caso especial de partículas que espalham em todos os comprimentos de onda, mas que absorvem grandemente na faixa do azul e levemente na faixa do vermelho (Kirk, 1986).

As diferenças podem ser decorrentes dos modelos empregados ou de diferenças nas composições de pigmentos consideradas.

2.5 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO MATERIAL INORGÂNICO PARTICULADO

A origem do material particulado inorgânico em suspensão (MIPS) está associada a: minerais provenientes de rochas ou solos, que são carregados para os corpos d'água por ação do vento ou da chuva, à ressuspensão ou erosão do fundo, detritos inorgânicos como de conchas carbonáticas de moluscos e carapaças silicosas de certas algas planctônicas.

As características do MIPS ligadas à sua constituição mineralógica, ao tamanho das partículas e concentração estão interrelacionadas e desempenham importante papel na determinação do comportamento espectral resultante, e serão analisadas separadamente.

Quando um feixe de luz atinge uma partícula, ele pode ser refletido na superfície, pode ser absorvido, ser refratado ou ainda difratado. O resultado destas interações da luz com partículas maiores que o comprimento de onda é muito próximo daquele previsto pela teoria de Mie, e está de acordo com resultados obtidos experimentalmente (Figura 2.11).

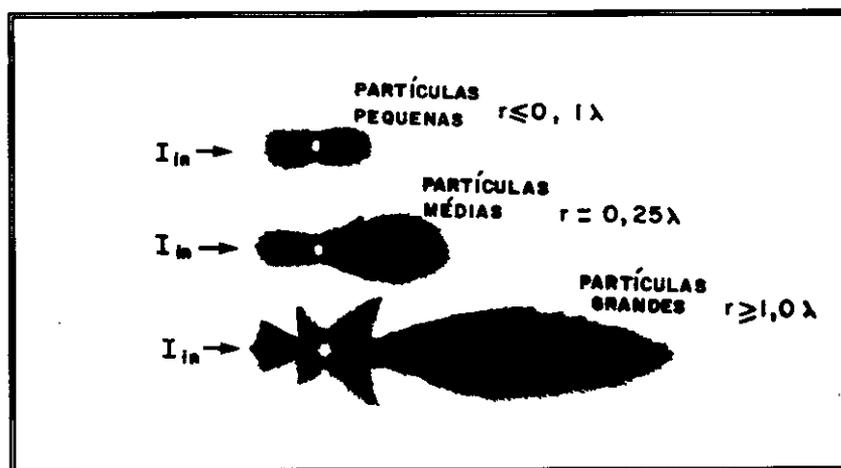


Fig. 2.11 - Padrões de espalhamento por partículas de diferentes tamanhos.

I: radiação incidente; r: raio da partícula;
 λ : comprimento de onda.

FONTE: Maul (1985), p. 285.

O tamanho e a forma das partículas exercem grande influência na função de espalhamento de volume (σ). Segundo Sturm (1980), a distribuição granulométrica do MIPS é o mais importante parâmetro na determinação do espalhamento em águas naturais, e varia de forma hiperbólica, ou seja, o número de partículas diminui com o aumento do diâmetro das mesmas.

Embora as partículas maiores sejam menos abundantes que as menores, elas também exercem grande influência, pois a área acumulada da secção transversal destas partículas é considerável (Sturm, 1980).

A composição química das partículas minerais tem grande influência pois dela dependem as interações microscópicas que envolvem átomos e moléculas, bem como as impurezas presentes na estrutura cristalina (Menezes, 1986).

Nos minerais, as características espectrais dentro das faixas do visível e do infravermelho próximo são produzidas por processos vibracionais e processos de transições eletrônicas. As principais feições devem-se à presença de ferro, água e hidróxidos (Nassau, 1980).

Os óxidos e hidróxidos de ferro são muito importantes na determinação da cor das argilas, pelo efeito da transferência de cargas (Hunt e Ashley, 1979).

Outros elementos de transição como Co, Cr, Ni são importantes para a cor de outros minerais, como alguns minerais formadores de pedras preciosas, pelo efeito do campo cristalino, que é um processo de transição eletrônica (Nassau, 1980).

Segundo Kampf (1988), o elemento ferro pode ocorrer na forma de distintos minerais, sendo os principais os óxidos de Fe^{3+} (incluindo óxidos e oxi-hidróxidos), onde a hematita é a responsável pelas cores avermelhadas dos Latossolos Roxos, a goethita pelas cores amareladas dos Latossolos Amarelos, a lepidrocrocita pelas cores alaranjadas em mosqueados nos Gleissolos, a ferrihidrita pelas cores bruno-amareladas em canais de raízes e paredes de drenos.

Além destes compostos, o ferro pode ocorrer na forma de Fe^{3+} em argilominerais como montmorilonita e nontronita, ou ainda em formas reduzidas em solos hidromórficos de coloração verde-azulada.

Alguns trabalhos em radiometria demonstraram o efeito diferenciador da mineralogia do material particulado nas curvas de reflectância espectral de diferentes amostras.

Whitlock et al. (1977), trabalhando com amostras de diferentes tipos de solos, Calvert (argila de cor vermelha), Ball (argila de cor cinza), Jordan (argila de cor acinzentada) e Feldspar (argila de cor esbranquiçada) obtiveram resultados que permitiram diferenciar os espectros das suspensões, quando em altas concentrações.

Também notaram que a reflectância espectral não variou igualmente para as diferentes amostras quando se aumentava a concentração, e também que amostras de coloração parecida podem requerer bandas espectrais mais estreitas para a diferenciação dos espectros resultantes (Figura 2.12).

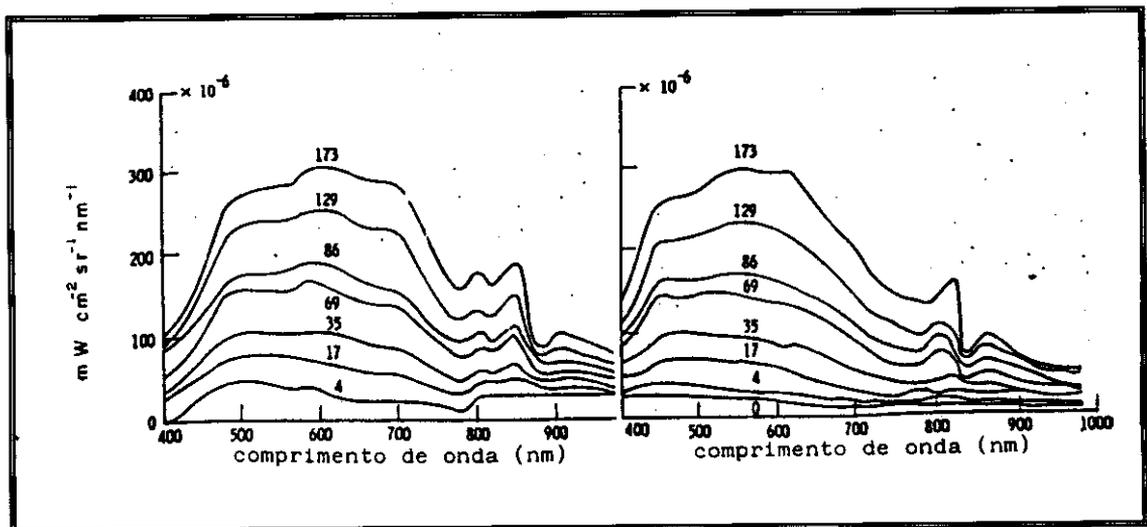


Fig. 2.12 - Radiância espectral para suspensões de amostras de solo em água.

(A) solo tipo Ball; (B) solo tipo Jordan. Concentração em ppm, indicada nas curvas. L: radiância ($\text{mW}/\text{cm}^2 \text{sr nm}$).

FONTE: Whitlock et al. (1977), p. 15 e 17.

Novo et al. (1989b) utilizaram dois tipos de MIP com coloração e granulometria diferentes, isto é, uma amostra de material vermelho com distribuição granulométrica de 7 a 37 μm e uma amostra de material branco com uma distribuição granulométrica de 1 a 20 μm . Observaram uma maior reflectância do material de cor branca e granulometria menor, e também que em suspensão na água, promoveu uma forte diminuição na amplitude dos espectros de reflectância das amostras, principalmente nas faixas do vermelho e do infravermelho (Figura 2.13).

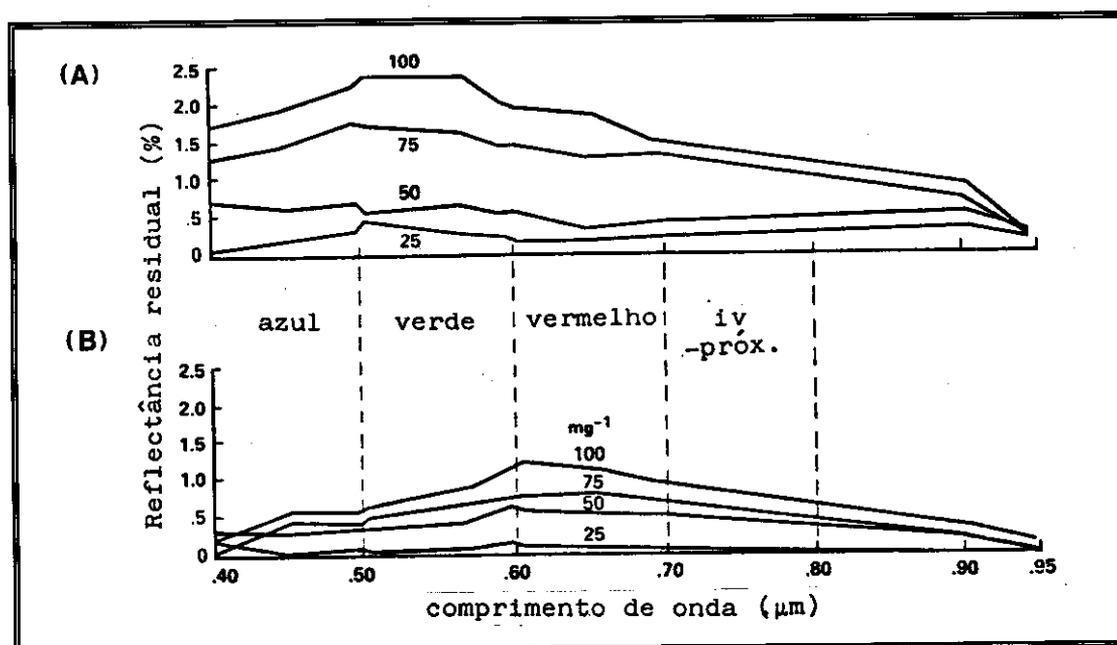


Fig. 2.13 - Reflectância espectral residual de suspensões de material inorgânico particulado.

(A) material branco, diâmetro entre 1 e 20 μm ,

(B) material vermelho, diâmetro entre 7 e 37 μm . Concentração em mg l^{-1} , sobre as curvas.

FONTE: Novo et al. (1989b), p. 1286.

Estudos têm demonstrado que existe uma relação positiva entre a concentração de material particulado inorgânico e a reflectância, mas que a resposta depende não só da concentração, mas também da resolução e

disposição das bandas do radiômetro utilizado e da composição mineralógica do material em suspensão (Whitlock et al., 1977; Witte et al., 1981; Bukata et al., 1988).

Com relação à geometria de aquisição, deve-se considerar que o campo de luz submerso é dependente do ângulo de iluminação (Duntley, 1963; Mertens, 1970) e que a função de espalhamento de volume é dependente da granulometria (Timofeeva, 1974; Kirk, 1986). Pode-se, então, esperar que ao variar-se a geometria de aquisição, obter-se-ão diferentes valores de reflectância (Novo e Godoy, 1988; Ritchie et al., 1974), e que diferentes particulados poderão ser melhor distinguidos (Figura 2.14).

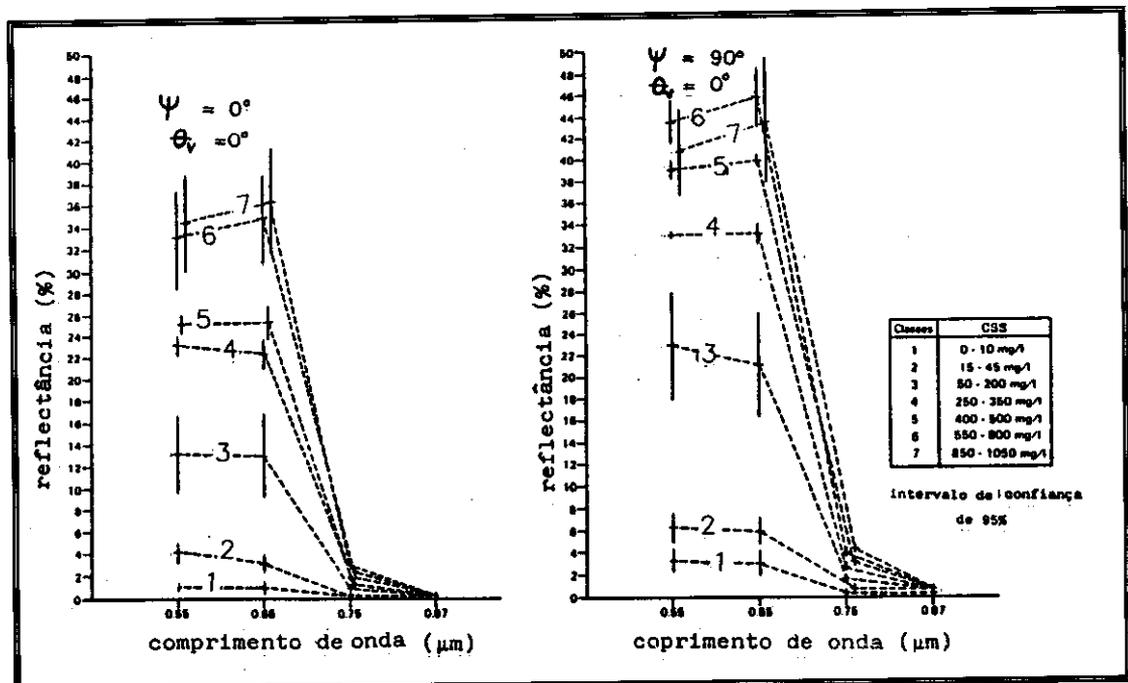


Fig. 2.14 - Reflectância de uma suspensão em função da concentração de partículas e da geometria de aquisição.

Partículas com diâmetro entre 1 e 20 μm .

FONTE: Modificada de Novo et al. (1989a), p. 1364.

2.6 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA MATÉRIA ORGÂNICA DISSOLVIDA

A matéria orgânica dissolvida no volume d'água constituída por um conjunto de substâncias provenientes da excreção, secreção e de processos intermediários da decomposição de organismos terrestres e aquáticos. Inclui principalmente proteínas, aminoácidos, ácidos graxos, resinas e compostos genericamente conhecidos como compostos húmicos, em concentrações que dependem da origem, das condições físicas do meio aquático, da bacia e drenagem e dos organismos decompositores (Wetzel, 1975; Bianchini Jr., 1985).

A MOD pode interagir com a biota da seguinte maneira: 1) como fonte de energia ou carbono orgânico para algas e bactérias; 2) como fator acessório de crescimento, fornecendo vitaminas, por exemplo; 3) exercendo efeitos tóxicos em larvas e algas; 4) formando complexos orgânicos com elementos traço ou com poluentes sintéticos, de efeitos benéficos ou não; 5) reduzindo a REM no meio aquático, prejudicando os organismos que dela necessitam (Wetzel, 1975; Witte et al., 1982).

Além destas interações citadas acima, a presença de MOD altera a aparência da água, tornando-a mais escura, com uma coloração marrom amarelada. Embora esta coloração seja atribuída aos compostos húmicos, não pode ser descartada a influência de complexos organo-metálicos de íons férricos ou mangânicos (Wetzel, 1975; Oades, 1982).

Os compostos húmicos constituem-se de polímeros, cujos monômeros são moléculas hidrofílicas, com peso molecular muito variável (aproximadamente entre 30 e 100.000). Os monômeros contêm grupos fenólicos, carboxílicos e em menor número grupos alifáticos OH. São classificados geralmente segundo a solubilidade: ácidos húmicos são aqueles solúveis em meio básico e insolúveis em meio ácido; ácidos fúlvicos são aqueles solúveis em meio ácido e em meio básico; e a humina, que é insolúvel (Oades, 1982; Bianchini Jr., 1985; Esteves, 1988).

As várias denominações ora existentes, como substância amarela, "gelsbtoff", compostos húmicos, substâncias húmicas totais, ácidos húmicos e "gilvin"

devem-se, talvez, à grande complexidade das substâncias constituintes da MOD, ao insuficiente conhecimento sobre elas e ao incompleto entrosamento entre os diversos ramos da pesquisa que se dedicam a estas substâncias.

Alguns autores apontam os ácidos fúlvicos como os principais responsáveis pela coloração marrom-amarelada da água, por serem os mais solúveis dos três compostos húmicos e estarem presentes em maior quantidade na MOD (Oades, 1982; Ertel et al., 1986; Carder et al., 1989). Segundo Ertel et al. (1986), 60% do carbono orgânico dissolvido no rio Amazonas está na forma de compostos húmicos, sendo que a proporção de ácidos fúlvicos para ácidos húmicos é da ordem de 4,7:1.

A alteração da cor da água pela presença de compostos húmicos deve-se à sua forte ação absorvedora de REM nos menores comprimentos de onda da faixa espectral visível. Com várias bandas de absorção sobrepondo-se, estes compostos apresentam uma curva de absorção com altos valores no ultravioleta, decrescendo quase exponencialmente até o verde, e valores muito baixos no vermelho.

Witte et al. (1982) observaram curvas de absorção muito semelhantes entre soluções de ácido húmico preparadas em laboratório e amostras filtradas de água de diferentes ecossistemas aquáticos (Figura 2.15).

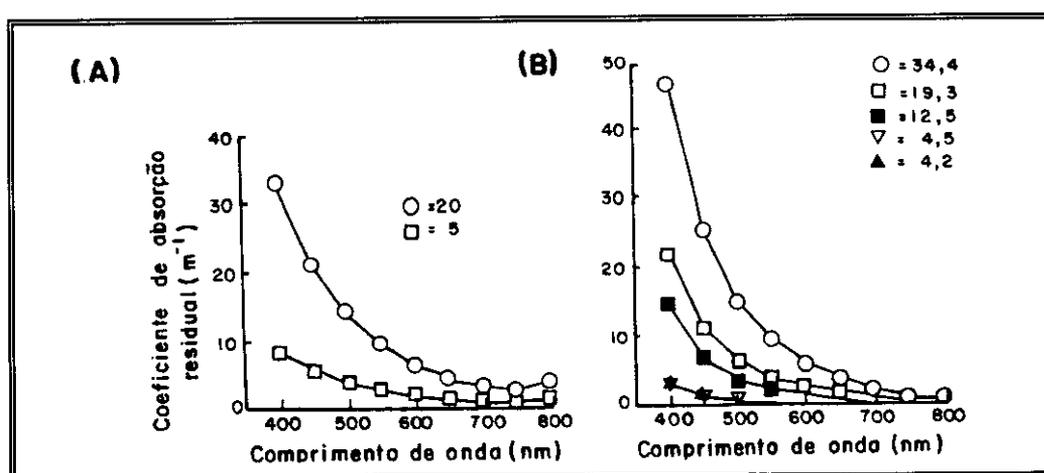


Fig. 2.15 - Comparação entre curvas de absorção de ácidos húmicos (A) e amostras com MOD (B).

Concentração em mg COD l⁻¹.

FONTE: Witte et al. (1982), p. 443.

Kirk (1986) sugeriu que a absorvância destes compostos fosse medida no comprimento de onda de 440 nm (g440) para se avaliar a sua concentração e também a interferência sobre a REM utilizada pela clorofila. Os dados de literatura mostram uma grande variação do coeficiente de absorção neste comprimento de onda, indo desde 0,005 até 19 m⁻¹ (Kirk, 1986; Weidemann e Bannister, 1986; Davies-Colley e Vant, 1987; Carder et al., 1989).

Com relação ao comportamento espectral da MOD, muito pouco é encontrado na literatura, e talvez um dos melhores trabalhos seja o de Bukata et al. (1983), utilizando modelos matemáticos.

Estes autores obtiveram curvas de razão de irradiância, em função da concentração de COD, mantendo fixas baixas concentrações de clorofila *a* (1 µg l⁻¹) e material em suspensão (0,05 mg l⁻¹) (Figura 2.16).

Nota-se que com o aumento da concentração de COD ocorre uma diminuição da reflectância em toda a faixa do visível, sendo porém mínima na faixa do vermelho e acentuada na faixa do azul. Na faixa do verde o impacto do COD sobre a reflectância pode ter sido atenuado pela clorofila *a*.

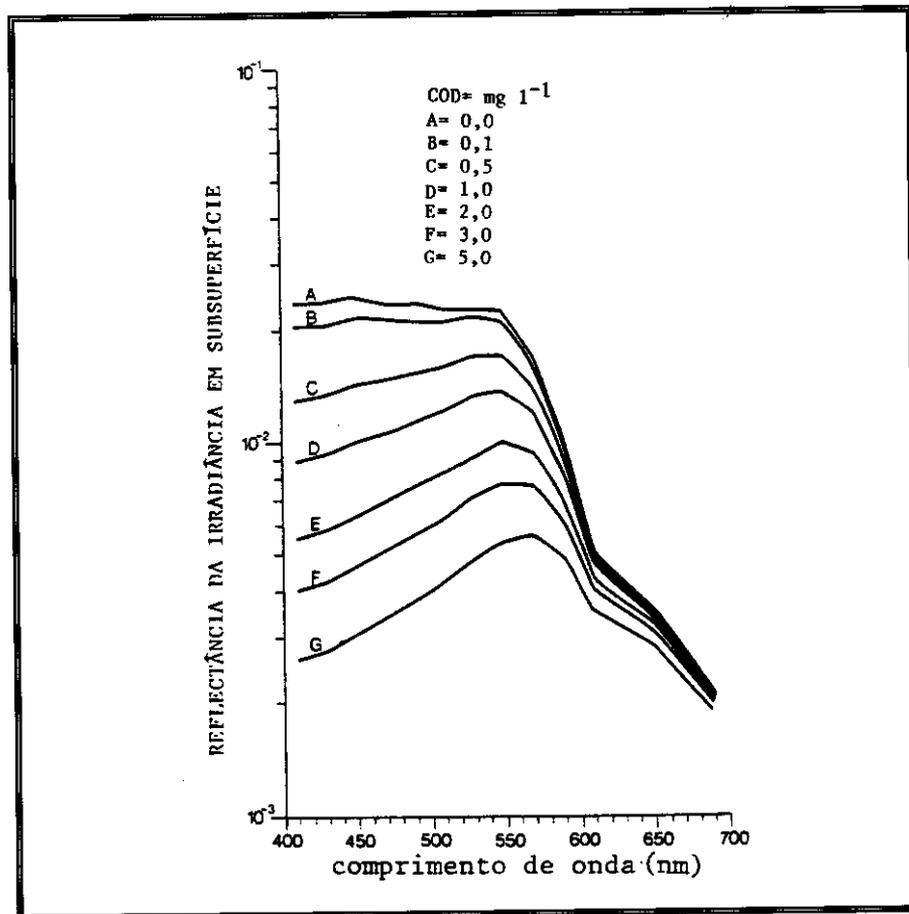


Fig. 2.16 - Curvas de razão de irradiação em subsuperfície em função da variação da concentração de COD.
COD: mg l⁻¹. Cla: 1 µg l⁻¹; MIP: 0,05 mg l⁻¹.
FONTE: Bukata et al. (1983), p.167.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - DESCRIÇÃO GERAL

Para se alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa foram realizados experimentos de radiometria ao nível laboratorial, no Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da Universidade de São Paulo (USP).

Os experimentos radiométricos constaram basicamente da obtenção do FRB de diferentes tratamentos, isto é, diferentes concentrações dos componentes C. vulgaris, SHT e caulim em tanques de radiometria, separadamente ou combinados de modo deliberado, com o objetivo de simular o efeito dos componentes fitoplâncton, MOD e MIP sobre a reflectância de águas doces naturais.

Idealmente a coleta de dados radiométricos deveria ser realizada em apenas uma sequência de medidas radiométricas.

Foi necessária a preparação de uma infraestrutura e o desenvolvimento de metodologia adequada à realização dos experimentos radiométricos, devido a fatores como falta de sala escura; influência do fundo do tanque e baixa reflectância da água; necessidade de repetições para a aplicação de testes estatísticos; dificuldade de obtenção de quantidade suficiente de alga e de MOD em laboratório, e tempo limitado de disponibilidade do espectrorradiômetro.

Para contornar estas dificuldades operacionais foram preparados e testados tanques de radiometria, placas de referência, formas de produção de MOD, tanques de cultivo de alga, formas de iluminação e geometrias de iluminação entre outros.

A partir da montagem da infraestrutura básica foi possível então a realização dos experimentos radiométricos, divididos em três períodos e cada um destes em várias sessões de trabalho. O fluxograma das atividades está na Figura 3.1.

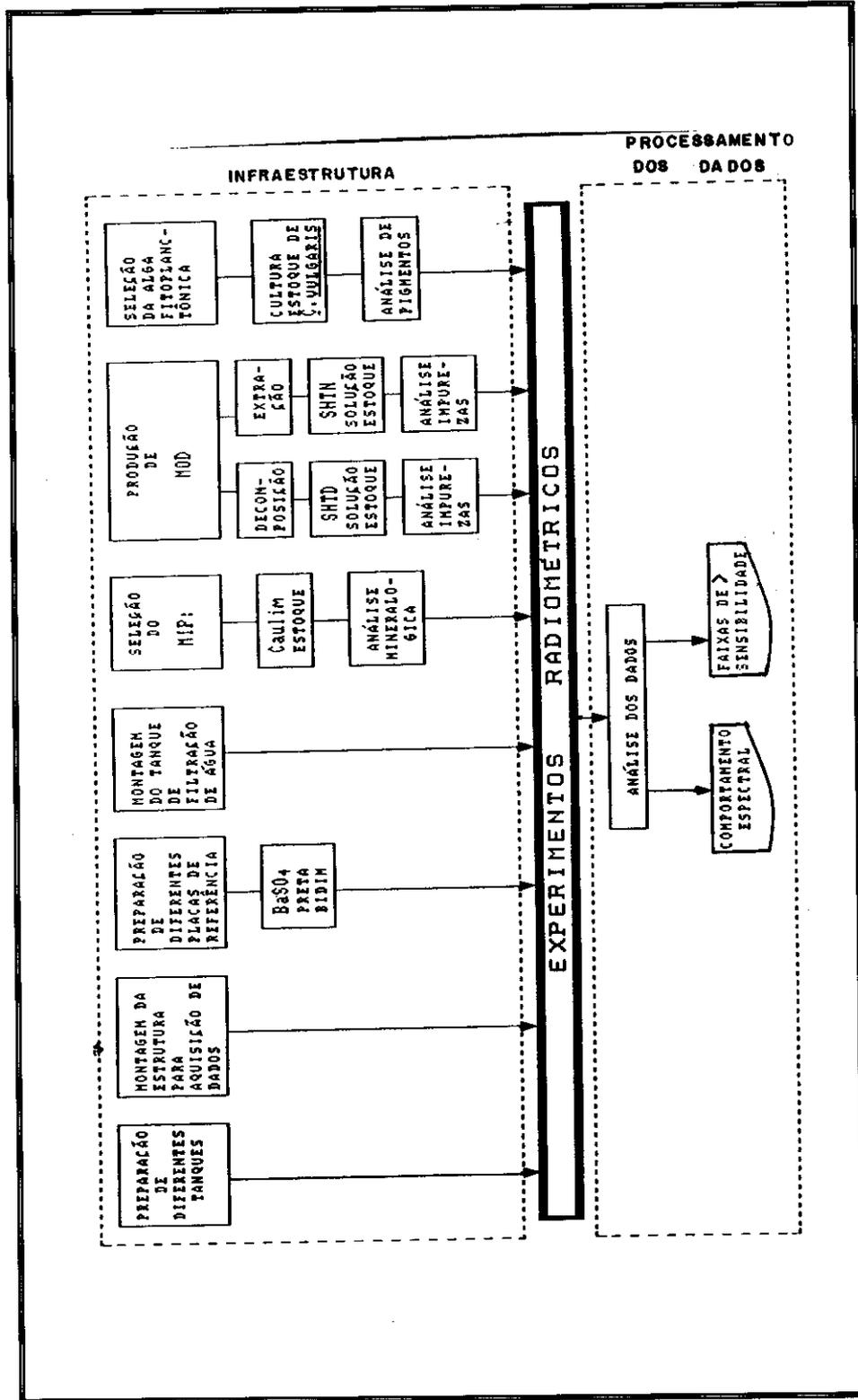


Fig. 3.1 - Fluxograma das atividades ligadas à realização dos experimentos radiométricos.

Nos tópicos seguintes são descritas as atividades de preparação da infraestrutura necessária à realização dos experimentos radiométricos, os experimentos radiométricos propriamente ditos e o processamento dos dados coletados.

3.2 - INFRAESTRUTURA

3.2.1 - OS TANQUES DE RADIOMETRIA

Para diminuir a influência que as paredes internas de tanques de radiometria podem desempenhar na reflectância de suspensões (Mc Cluney, 1976; Witte et al., 1981; Witte et al., 1982; Novo et al., 1989a; Mantovani e Cabral, 1992), sem utilizar grandes tanques e grandes quantidades dos componentes para as diluições, foi escolhido um conjunto de tanques iguais de tamanho médio. Estes tanques, fabricados em fibra de vidro, possuem capacidade volumétrica total de 88 l e volume de trabalho de aproximadamente 82 l.

Foram empregados com diferentes revestimentos internos para se avaliar o efeito do revestimento sobre a reflectância do volume d'água.

Os revestimentos utilizados foram os seguintes: pintura de cor preta (P), pintura de cor cinza metálica na lateral e de cor preta no fundo (AlP), a própria fibra de vidro (FV). Externamente, os tanques foram cobertos por um tecido preto de algodão para evitar possíveis reflexões da radiação.

3.2.2 - EQUIPAMENTOS, SUPORTE E GEOMETRIA DE AQUISIÇÃO

Como não foi possível o emprego de uma sala escura para evitar a incidência de radiação não controlada, optou-se pela realização dos experimentos radiométricos ao ar livre e durante a noite.

Para tanto, foi construído um suporte metálico para fixação do espectrorradiômetro e da fonte de iluminação, de modo a permitir o deslocamento destes dois equipamentos por sobre os tanques de radiometria, sem alterar a geometria de aquisição. (Figuras 3.2 e 3.3)

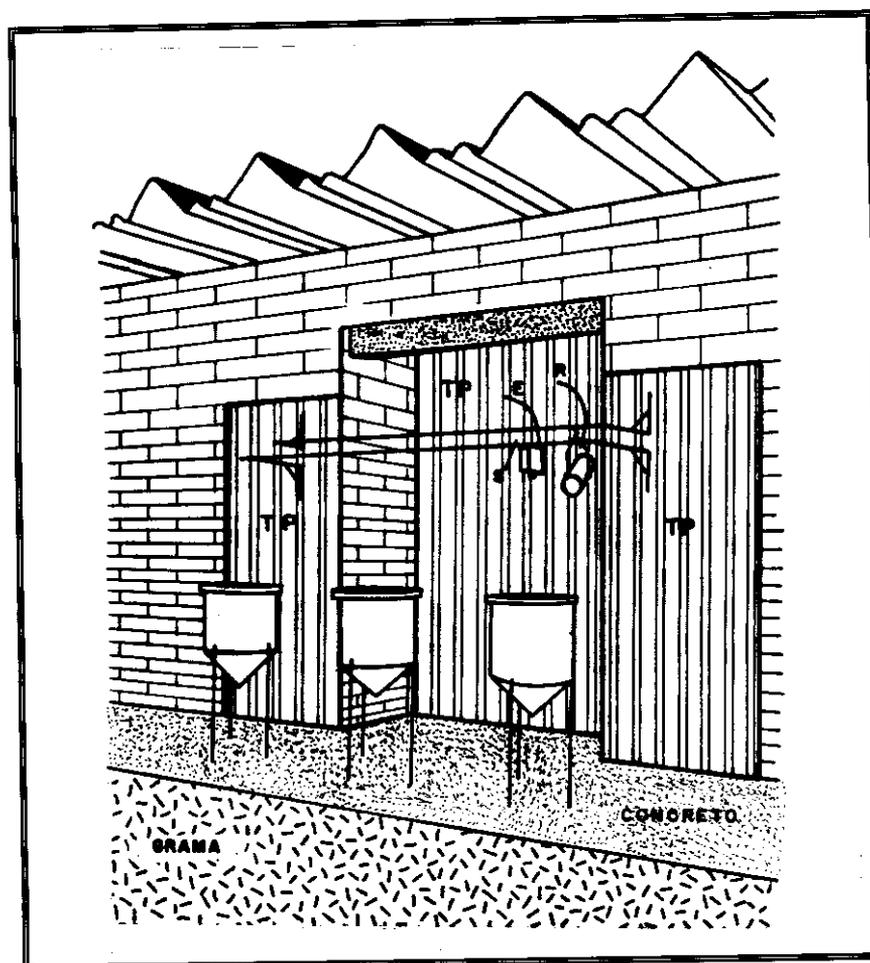


Fig. 3.2 - Estrutura básica de um experimento radiométrico com 3 tanques.

TP: tecido preto; E: espectrorradiômetro; F: fonte de iluminação; S: suporte metálico dos equipamentos.

Empregou-se uma lâmpada halógena com filamento de tungstênio e 1.000 W de potência como fonte de iluminação, distante 0,8 m do tanque, formando um ângulo zenital de 35° para iluminar o maior volume de água possível no tanque sem, no entanto, produzir reflexão especular na direção do espectrorradiômetro ("glitter").

Esta lâmpada foi escolhida por ter alta luminosidade, por já ter sido utilizada anteriormente em outros experimentos, e por apresentar uma luz quase branca. A curva de irradiância solar ao nível do mar apresenta o pico de máxima em torno de 500 nm, e esta lâmpada em torno de 730 nm, ou seja, uma distribuição relativa de REM algo

próxima daquela do Sol e daquela utilizada na iluminação dos tanques de cultura com lâmpadas fluorescentes (modelo luz do dia). (Figura 3.4)

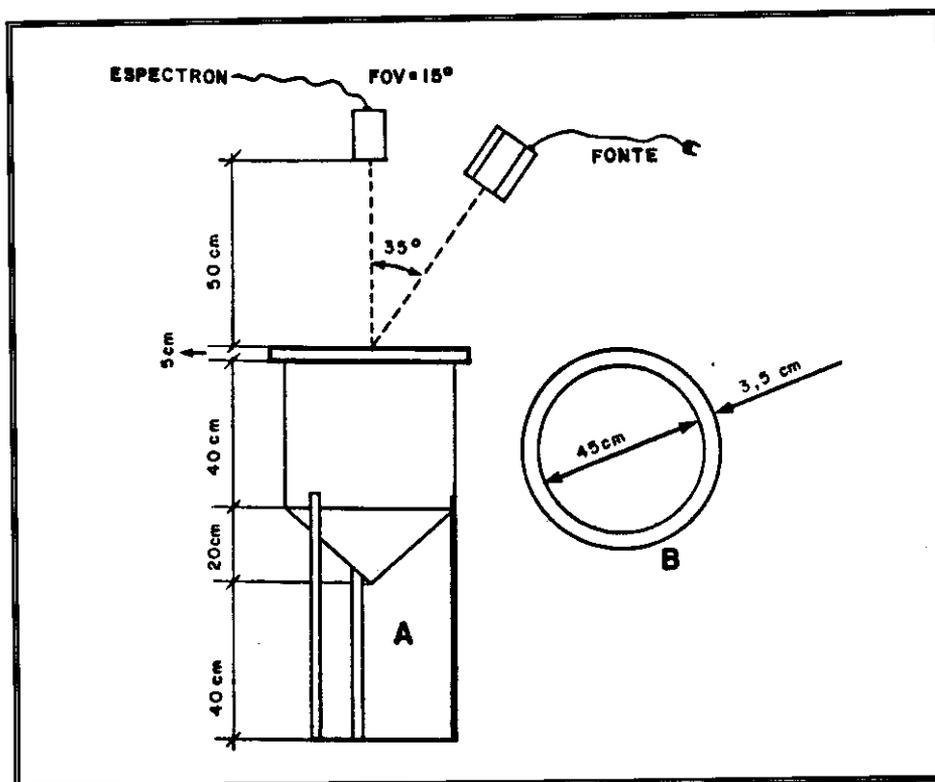


Fig. 3.3 - Geometria de aquisição (A) e diâmetro do tanque de coleta de dados (B).

Para a obtenção dos espectros de radiância foi utilizado o espectrorradiômetro Spectron SE-590 (marca Spectron Engineering), com as seguintes características técnicas:

- resolução espectral nominal: aproximadamente 3 nm;
- campos de visada (FOV): 1°, 6° e 15°;
- tempos de integração: 1/16, 1/32 e 1/64 s.
- modo de medida: simples ou média de 2; 4 ou 6
- faixa de operação: 398 a 1113 nm;

O espectrorradiômetro foi posicionado verticalmente sobre o centro do tanque a 0,5 m da interface

ar-água, com FOV de 15°, definindo um GIFOV circular com diâmetro de 15 cm na interface.

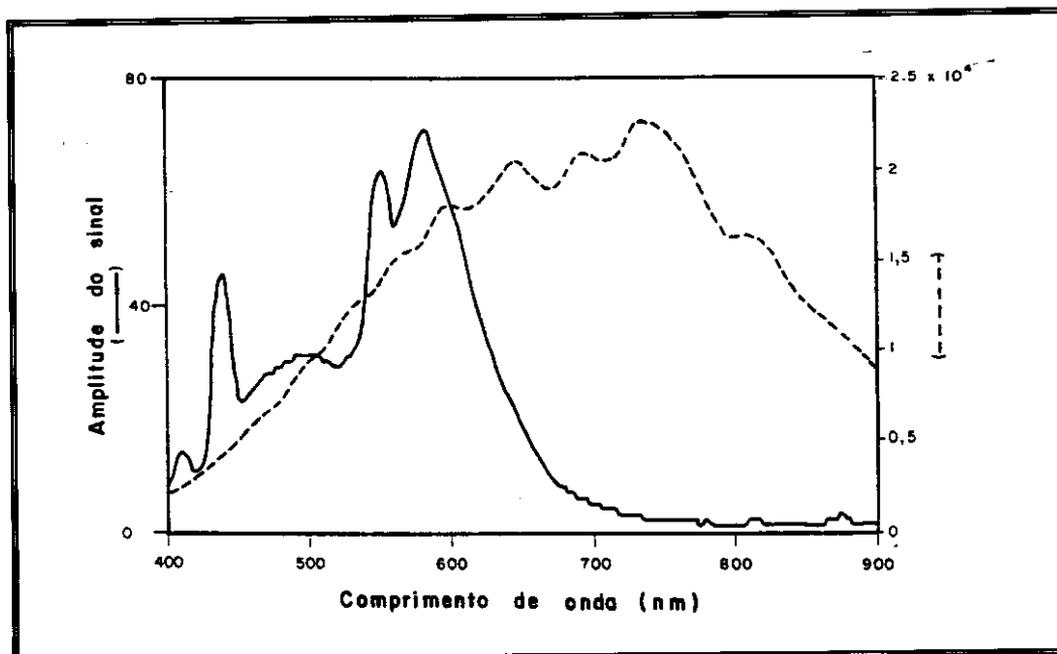


Fig. 3.4 - Curvas de distribuição relativa da radiação das fontes de REM utilizadas.

(—) fonte utilizada nas culturas; (--) fonte utilizada nos experimentos radiométricos.

Foi usado o modo média 4, no sentido de se diminuir os efeitos de variações rápidas na reflectância que podem ocorrer devido à rugosidade superficial da água, por exemplo.

3.2.3 - AS PLACAS DE REFERÊNCIA

Devido a dificuldades em se determinar a reflectância (Nicodemus et al., 1977), foi empregado o fator de reflectância bidirecional (FRB).

Como alguns autores recomendam o uso de placas com magnitude de reflectância próxima daquela do alvo para diminuir o impacto de ruídos no fraco sinal do alvo aquático (Shu e Chen, 1987; Deering, 1989), e diante da não existência destas à disposição, optou-se por testar placas alternativas à placa de BaSO_4 .

Foram testados os seguintes materiais: cartolina de cor cinza clara, cartolina de cor cinza escura, chapa de alumínio jateada com areia, chapa de madeira pintada de preto e um material sintético, a base de polyester, de nome comercial Bidim. As curvas dos FRB das placas testadas estão na figura 3.5.

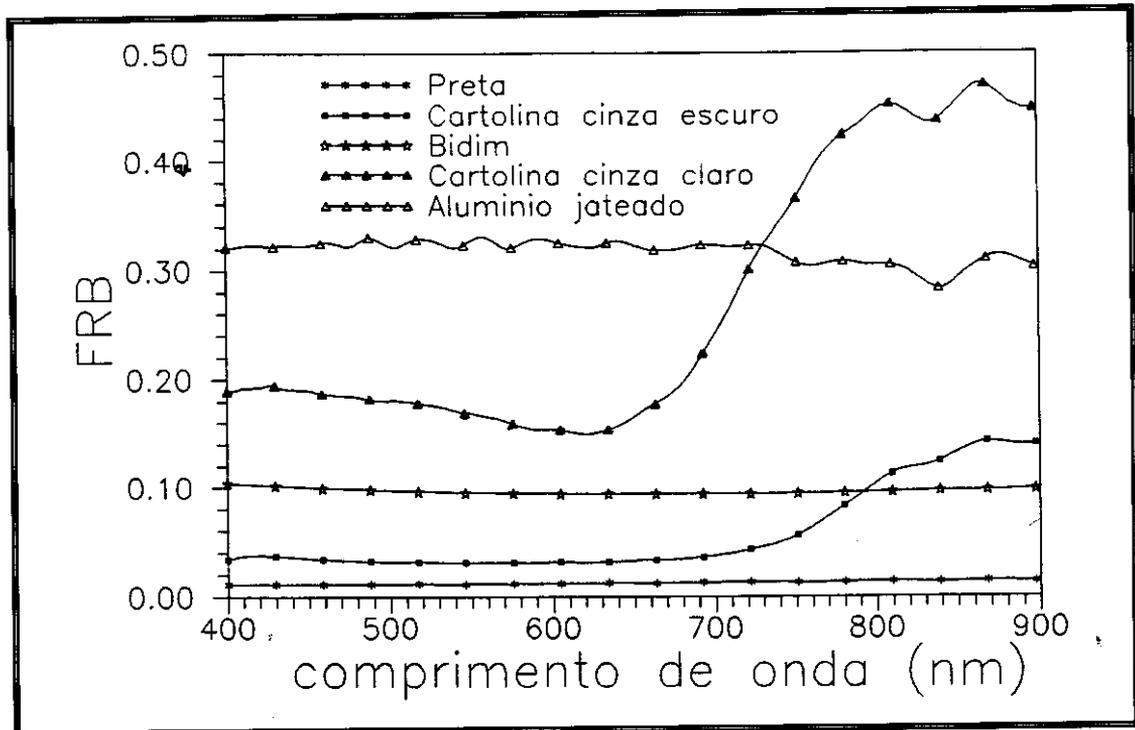


Fig. 3.5 - FRB (valores médios) das placas de referência alternativas testadas.

Em todos os experimentos foram utilizadas a placa de referência padrão de BaSO_4 e uma placa alternativa. No período 1 foi utilizada a placa preta como placa alternativa, enquanto nos outros dois períodos foi utilizada a placa de Bidim.

Para transformar os espectros obtidos no período 1 em FRB relativos à placa de Bidim utilizou-se os espectros médios obtidos com a placa de BaSO_4 nos períodos 1 e 2 e o espectro médio da placa de Bidim do período 2, da seguinte forma:

$$\text{FRB} = ((\text{tratamento}_1 \cdot \text{BaSO}_4 \text{ }_2) / \text{BaSO}_4 \text{ }_1) / \text{Bidim}$$

Esta placa foi escolhida por apresentar uma reflectância espectral baixa (cerca de 10 % da placa de BaSO_4 ao longo do espectro), e por apresentar maior estabilidade no tempo do que as demais placas testadas.

Como pode ser verificado na Figura 3.2, é possível obter-se o FRB com relação à placa de BaSO_4 multiplicando-se o FRB obtido com a placa de Bidim por um fator de 0,1.

3.2.4 - TANQUE DE FILTRAÇÃO DE ÁGUA

No período de coleta 1 verificou-se que durante a noite e principalmente após períodos de ventos fortes ou chuvas, o sistema de filtração de água do CHREA não era suficiente para a purificação da água, de modo que surgiu a necessidade de filtração adicional da água para o abastecimento dos tanques de radiometria.

Antes do início das coletas do período 2 foi montado um tanque de filtração com leito de areia, pedra britada e manta de polyester (Bidim), acoplado a um reservatório para armazenar a água filtrada. (Figura 3.6)

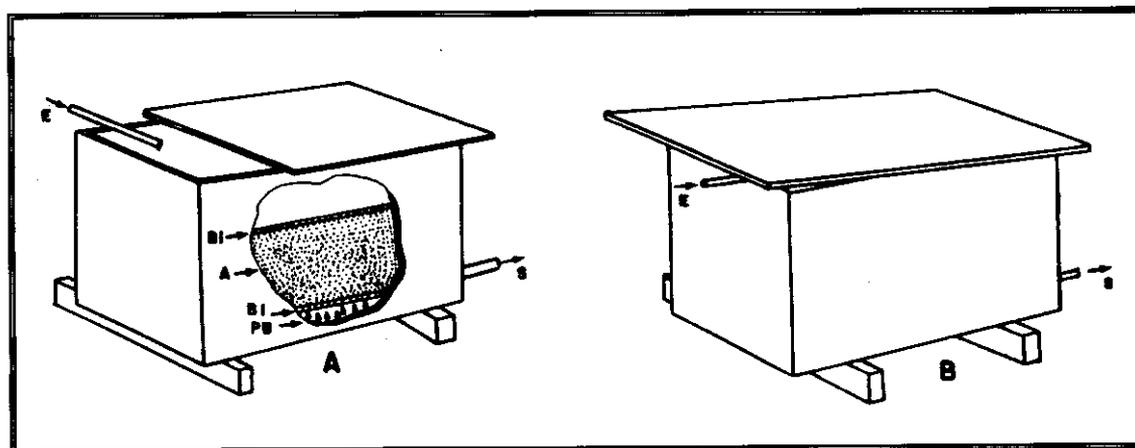


Fig. 3.6 - Tanques de filtragem (A) e de armazenamento de água (B).

E = entrada de água; S = saída; Bi = manta de Bidim; A = areia fina; PB = pedra britada.

Com este tanque foi possível utilizar água mais limpa (a_{440} por volta de 0,4 a 0,6 m^{-1}), e principalmente, sem alterações entre um dia e outro.

3.2.5 - MATERIAL INORGÂNICO PARTICULADO

Optou-se por utilizar um MIP de coloração clara e de granulometria fina para contrabalançar o efeito absorvedor da radiação pela MOD e aumentar a reflectância das suspensões; por representar melhor as frações mais facilmente carregadas para os corpos d'água durante os processos de lixiviação dos solos; e para evitar a rápida decantação desse componente durante a coleta radiométrica (Cabral et al., 1990).

Foi empregada uma amostra de origem industrial, comercializada com o nome de caulim, cujas características foram determinadas pelo Laboratório de Raios X, da Universidade Federal de Ouro Preto.

Este material compreende partículas de até 0,070 mm de diâmetro, correspondente na escala de Atterberg às frações argila e silte, com a seguinte composição qualitativa (em ordem decrescente de concentração): quartzo moído, caulinita e goethita, e os elementos alumínio, silício, potássio, ferro e zircônio.

Antes da utilização em cada um dos períodos do experimento este material foi secado em estufa à temperatura de 100 °C até peso constante, e então guardado em saco plástico para evitar o umedecimento.

3.2.6 - PRODUÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA DISSOLVIDA

Foram testadas duas alternativas para a obtenção deste componente, sendo uma a produção via decomposição semicontrolada de material vegetal, e a outra a extração a partir de um produto comercial rico em substâncias húmicas.

Na decomposição semicontrolada foram adicionados aproximadamente 50 kg de *Eichornia crassipes* para decomposição em um tanque de 700 l de água, aerado continuamente para evitar a decomposição anaeróbica. (Figura 3.7)

A produção de MOD foi baixa, com o coeficiente de absorção em 440 nm chegando a 13,8 m⁻¹ no período do experimento do período 1. Com este coeficiente de absorção não era possível adicionar MOD sem diluir os

outros componentes.

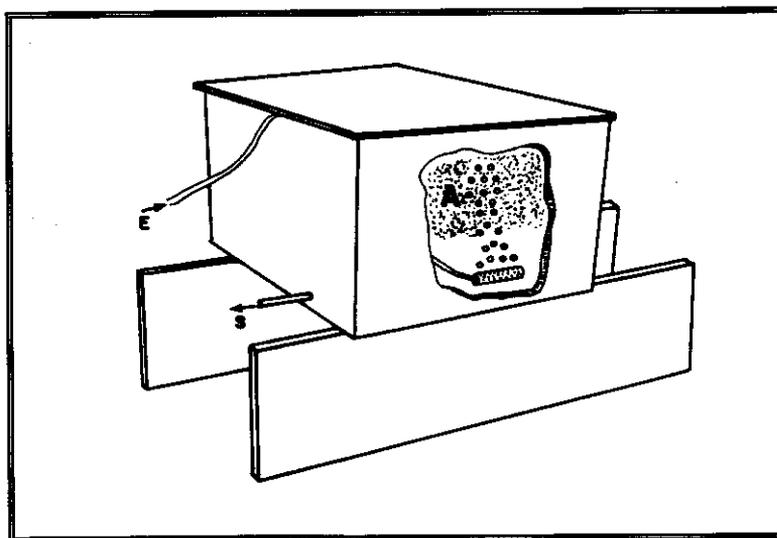


Fig. 3.7 - Tanque de decomposição de matéria orgânica.
A: Eichornia crassipes. E: entrada de ar.
S: saída de MOD.

Outro grande inconveniente encontrado na produção via decomposição foi o do armazenamento de grande volume de líquido sem permitir a continuação do processo de decomposição e modificação das características do material.

Por esta razão, no período 2 foi empregado um produto comercial de nome Neorgan-51, que é um composto obtido via enriquecimento de turfa com substâncias húmicas (Agro-humus, 1991).

Desse material foi extraída uma amostra de substâncias húmicas totais (SHTN) segundo a metodologia descrita em Bianchini Jr. (1985), simplificada, isto é, retirando-se o sobrenadante de uma mistura obtida pela adição de água destilada e NaOH (10%) ao produto, em pH de 9,5.

Foram extraídos 15 l de solução concentrada, que foi filtrada em manta de polyester e deixada em repouso por 15 dias para a decantação de partículas mais finas.

Foram determinadas as curvas do coeficiente de absorção para a comparação das duas amostras de SHT de origens diferentes, pois nos tratamentos feitos nos tanques

de radiometria foi este o parâmetro usado na quantificação da MOD, sendo verificada uma grande semelhança entre elas. (Figura 3.8)

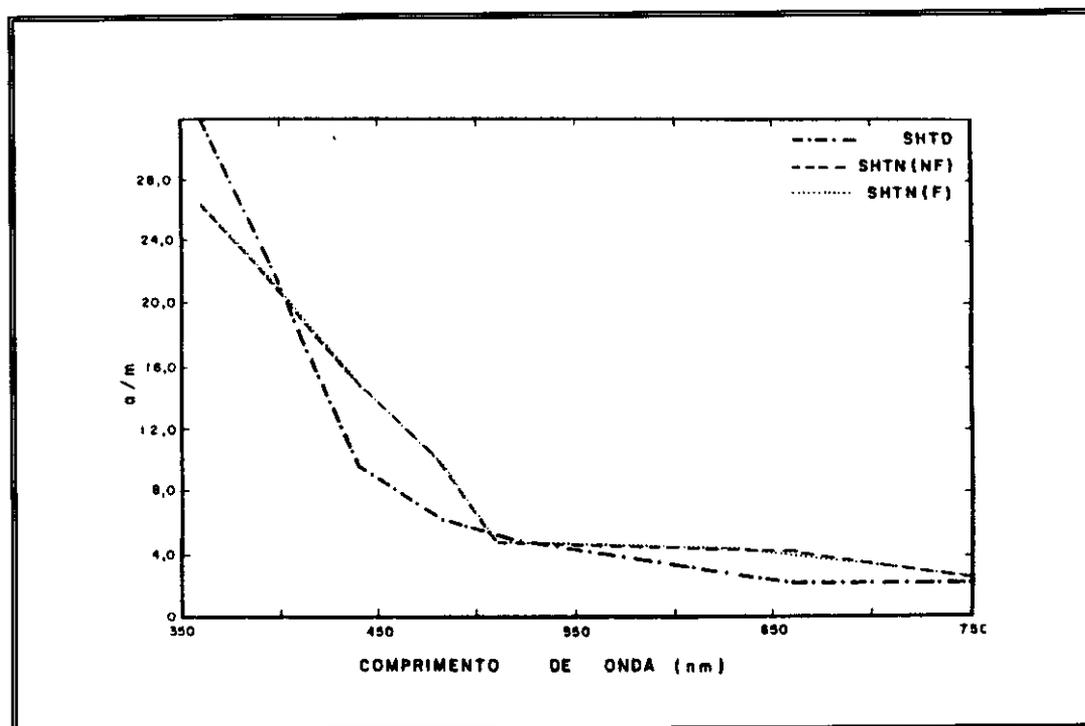


Fig. 3.8 - Curvas de coeficiente de absorção para as amostras de SHT.

SHTD: filtrada em filtro AP20, $a_{440} = 9,6/m$.

SHTN: $a_{440} = 15/m$. (F): Filtrada em filtro AP20; (NF): não filtrada.

Para a determinação do conteúdo de impurezas destas amostras uma alíquota de 50 ml foi secada (24 h a 100 °C) e calcinada (1 h a 600 °C). Foram obtidos valores que indicam alto conteúdo de impurezas, sem entretanto, descaracteriza-las como amostras representativas de substâncias húmicas totais. (Toledo, s.d.) (Tabela 3.1)

Antes dos experimentos radiométricos foram determinadas as alíquotas de SHTD e de SHTN, para a montagem das combinações, determinando-se o coeficiente de absorção de diluições padrão e aplicando-se regressão linear pelo método dos mínimos quadrados.

TABELA 3.1 - CONTEÚDO DE IMPUREZAS NAS AMOSTRAS DE SHT UTILIZADAS. Valores em g L⁻¹

Amostra	Resíduo seco	matéria orgânica	cinzas
SHTD	1,05	0,8	0,25
SHTN período 2	18,25	10,22	8,02
SHTN período 3	17,26	9,96	7,30

3.2.7 - A ALGA FITOPLANCTÔNICA

Para representar o fitoplâncton determinou-se que deveria ser empregada uma espécie de cianofita ou de clorofita por serem de ocorrência comum em águas doces

Inicialmente testou-se uma espécie de cianofícia (*Microcystis aeruginosa*) que ocorre no Reservatório de Barra Bonita. Por ser colonial (Hino e Tundisi, 1988) esta espécie foi descartada, pois poderia sofrer desagregação das células durante a agitação da alga no tanque de radiometria com conseqüente modificação no espectro de reflectância.

A espécie escolhida foi a *Chlorella vulgaris*, uma alga unicelular pertencente à divisão Chlorophyta, já cultivada no CRHEA (Beltrão, 1990; Govone, 1990).

Esta espécie é formada por organismos pequenos (<20 µm), aproximadamente esféricos, com parede celular delgada e sem ornamentação. As clorofitas apresentam como principais pigmentos as clorofilas a e b, carotenoides e luteína (Round, 1983).

Foi utilizado o meio de cultura WC (Guillard e Lorenzen, 1972) adaptado, isto é, sem as vitaminas. O ajuste de pH para 7,0 foi feito usando-se HCl e NaOH, e em seguida esterilizado a 120 °C por 20 minutos. A inoculação foi feita em sala fechada e adaptada para cultivos algais, não garantindo entretanto uma assepsia total nos cultivos devido à não esterilização do ar utilizado na aeração.

A vidraria foi lavada com detergente neutro, solução de ácido clorídrico 10% (V/V) e água destilada.

No primeiro período o cultivo foi feito em um tanque de fibra de vidro de 82 litros e iluminado com lâmpadas fluorescentes modelo luz do dia (Figura 3.9).

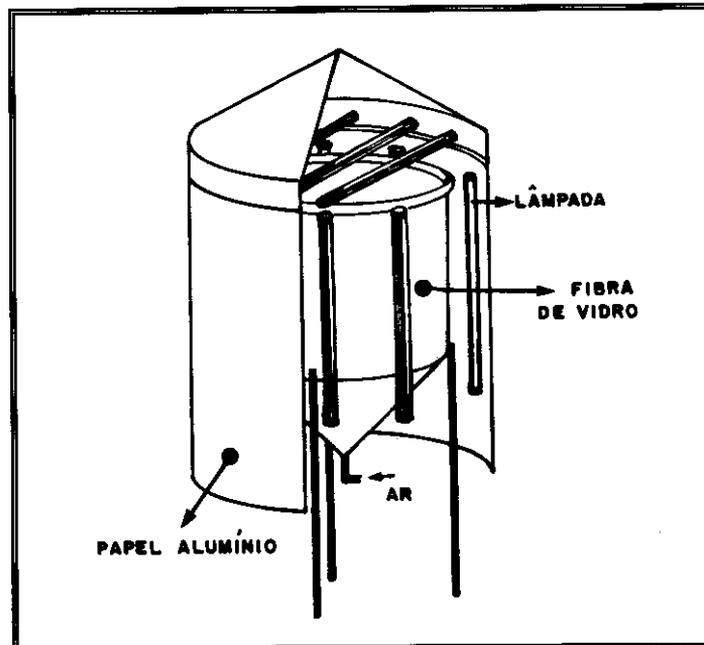


Fig. 3.9 - Tanque de cultura de alga.

Para reduzir a aderência das algas nas paredes do tanque e também a formação de grandes grumos de células, foi utilizada uma agitação contínua e intensa com borbulhamento de ar pelo fundo do tanque.

Usando-se um "quantameter" com célula bihemisférica (unidade detetora) determinou-se um fluxo irradiante de $12.480 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no interior do tanque cheio de água e com 7 lâmpadas acesas.

A temperatura dentro da cultura neste tanque variou entre 28 e 32 °C entre a noite e o dia, respectivamente.

No período 2 foi testado o cultivo da espécie *C. homosphaerica*, que não apresentou o problema de aderência e formação de grumos como a anterior, mas por outro lado apresentou um crescimento mais lento, e por este

motivo o cultivo voltou a ser feito com a espécie anterior.

No período 3 continuou-se com o cultivo de *C. vulgaris* mas em um tanque de vidro e de 15 l, com menor produção, porém enormemente facilitada. (Figura 3.10)

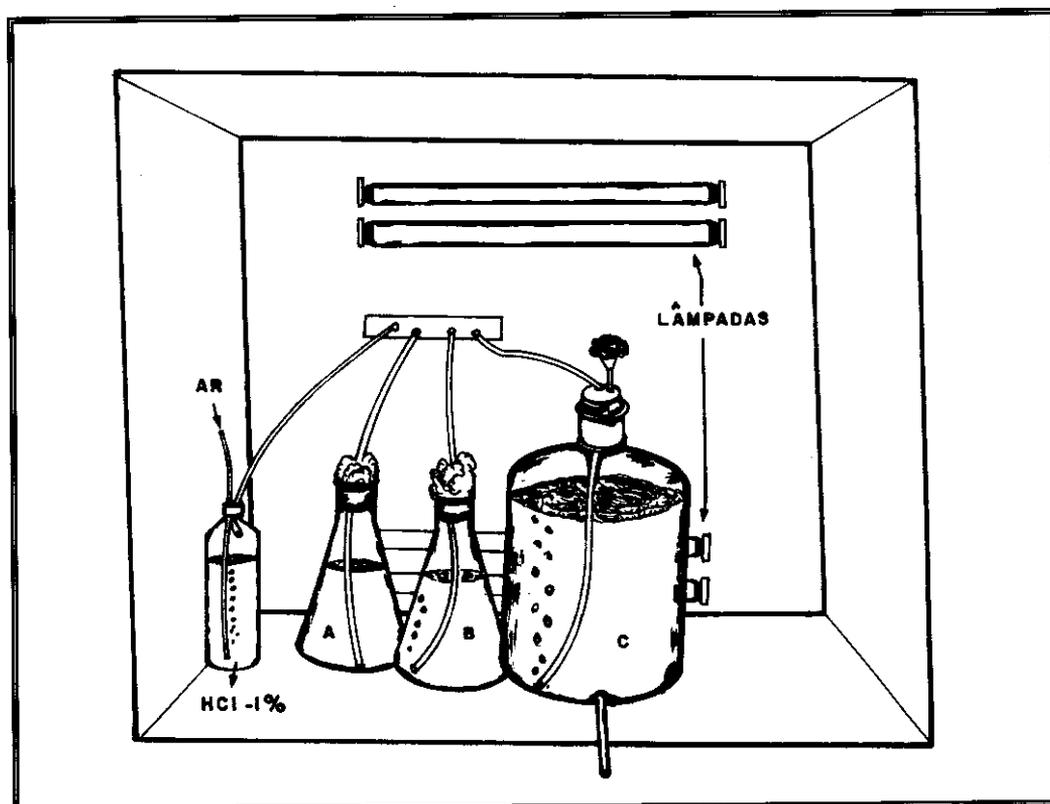


Fig. 3.10 - Cultura de *C. vulgaris*.

A e B são inóculos para o tanque C.

Neste tanque a temperatura da cultura oscilou em torno de 23 °C.

Junto ao tanque de vidro, na sala de cultura, verificou-se uma irradiância de $8.388 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com 2 lâmpadas fluorescentes acesas.

Neste tanque as algas não aderiram nas suas paredes, mas apresentaram formação de grumos devido à alta taxa de divisão das células e rápida elevação do pH do meio (Lee, 1982; Vieira, 1991). Correções do pH da cultura para valores entre 6 e 7 contiveram o crescimento dos grumos, mantendo-os pequenos.

Para a determinação das concentrações dos pigmentos de *C. vulgaris* nos tratamentos feitos nos experimentos, foram empregados os seguintes métodos: a) método descrito em Golterman et al., 1978, para clorofila a total (Cl_{at}), clorofila a ativa (Cl_a) e feofitina a (feo_a); método descrito em Jeffrey e Humphrey, 1975, para Cl_a e clorofila b (Cl_b) e, método descrito em Parsons et al., 1984, para carotenóides (car).

As concentrações encontradas, apesar de calculados por métodos diferentes, covariam grandemente, e os dados discrepantes, como concentrações de clorofila a maiores que a total e altos valores de feofitina, são originados de problemas relacionados com as limitações dos próprios métodos (Rai, 1978).

3.3 - O EXPERIMENTO RADIOMÉTRICO

Como foi dito anteriormente, foram realizados experimentos radiométricos para a determinação do FRB de diferentes tratamentos, sendo estes constituídos de diferentes concentrações dos componentes *C. vulgaris*, MOD e caulim, separados ou combinados, diluídos em tanques de radiometria.

Os experimentos foram realizados em 3 períodos determinados pela disponibilidade do espectrorradiômetro. Em cada período foram realizadas várias sessões, cada uma delas correspondendo à uma noite de coleta de dados.

3.3.1 - A SEQUÊNCIA DE UM EXPERIMENTO RADIOMÉTRICO

Um experimento era iniciado e finalizado pela medição das duas placas de referência no mesmo local e G.A. dos tanques de radiometria.

Entre as medidas das placas eram adicionadas as alíquotas dos componentes para obtenção de um determinado tratamento, seguida da agitação para homogeneizar a distribuição do(s) componente(s) e de um tempo de aproximadamente 30 s para a suavização da superfície líquida, após o qual era tomada a medida radiométrica do tratamento. (Figura 3.11)

Foram feitos experimentos radiométricos diferentes pelo emprego de diferentes tratamentos, tanques e regimes de iluminação. Estas especificidades, pertencentes ao núcleo de cada experimento, são descritas a seguir.

3.3.2 - OS NÚCLEOS DOS EXPERIMENTOS RADIOMÉTRICOS

Nos experimentos com mais de um tanque os tratamentos foram submetidos a um regime de iluminação intermitente, porque a fonte e o espectrorradiômetro eram deslocados sobre os tanques para as medidas, e também porque era gasto um tempo com a adição das alíquotas e anotação de dados. Consequentemente, os tratamentos foram iluminados por 1 minuto a cada 7 minutos.

Nos experimentos com 1 tanque foram empregados os regimes de iluminação intermitente e contínuo. A seguir são descritos os núcleos dos experimentos.

a) Experimento do tipo I:

Foram empregados 3 tanques com revestimentos diferentes com a finalidade de se determinar a variação do FRB da água contendo C. vulgaris, em função do revestimento.

Foram empregados os tanques AlP, P e FV, dispostos em linha, para a determinação dos FRB de 5 tratamentos contendo apenas C. vulgaris. As proporções entre as concentrações, tomando a concentração mais baixa como 1, foram as seguintes: 1:3:5:9:13.

Alíquotas iguais eram adicionadas nos 3 tanques, homogeneizadas e após 30 s o espectrorradiômetro e a fonte de iluminação eram deslocados sobre os tanques para as medidas, gerando dados sem repetição.

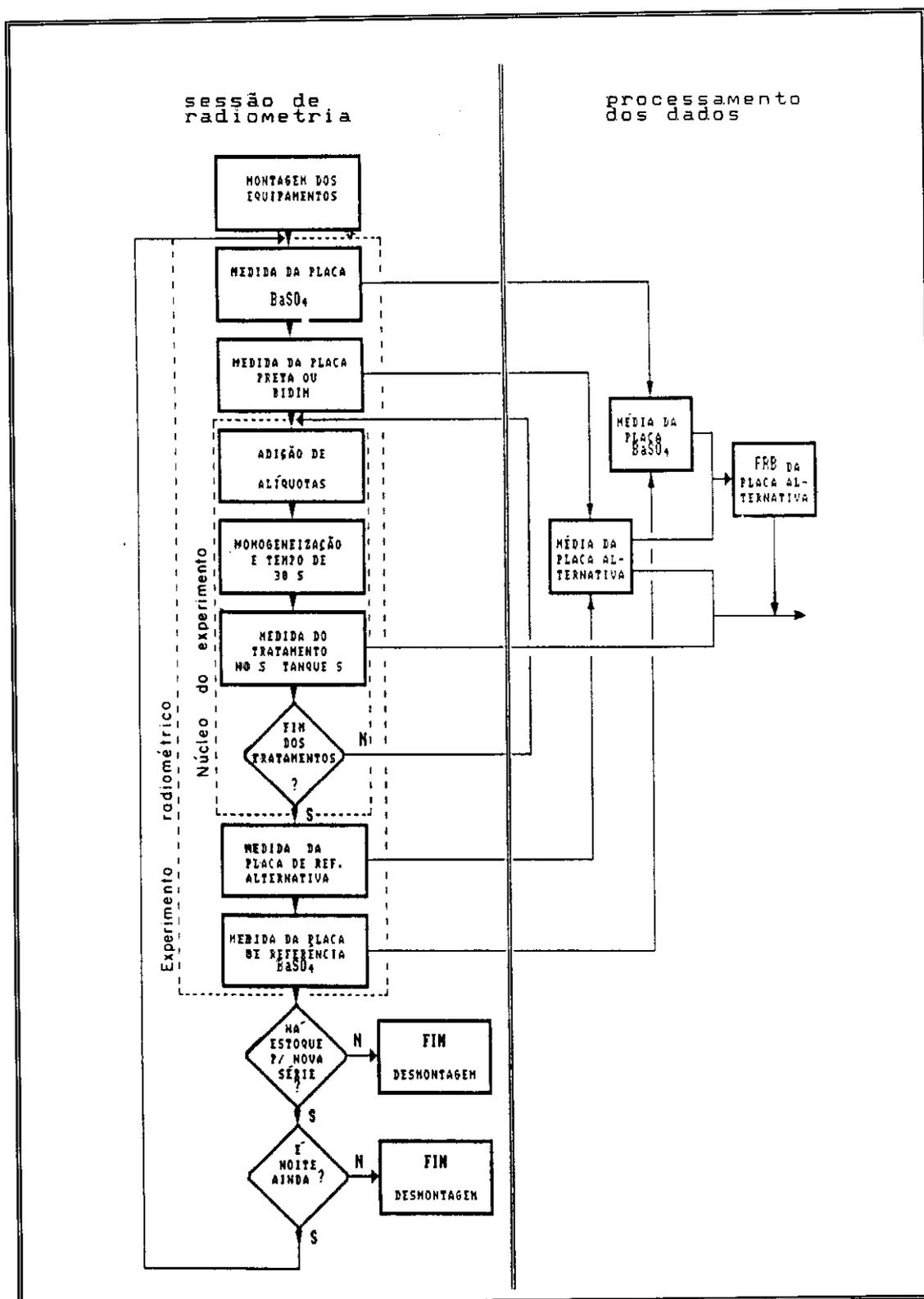


Fig. 3.11 - Fluxograma das atividades de uma sessão de radiometria e processamento posterior dos dados.
(continua)

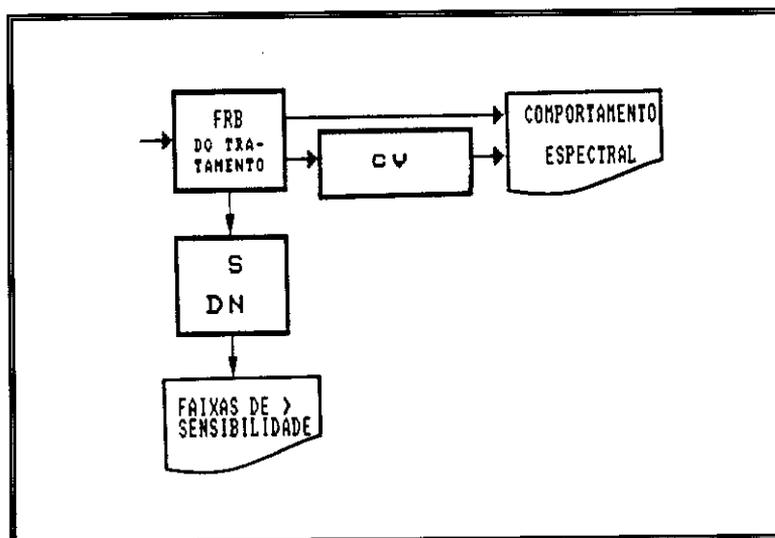


Fig. 3.11 -Conclusão.

b) Experimentos do tipo II:

Foram empregados 3 tanques iguais, de revestimento preto, para a determinação do FRB dos 3 componentes separados e em combinações, com a sequência de adição, agitação, espera e medição como no caso anterior.

Para os tratamentos com componentes separados foram utilizadas 8 concentrações de alga, 3 de MOD e 4 de caulim. Com algumas concentrações de MOD e caulim foram feitos 9 tratamentos de combinações dos dois componentes. (Tabela 3.2)

A concentração de $47,8 \mu\text{g l}^{-1}$ de Cl_a foi escolhida para a realização de tratamentos com as 9 combinações de MOD e caulim, porém em apenas um tanque, gerando dados sem repetição.

c) Experimentos do tipo III:

Foram empregados 4 tanques iguais, de revestimento preto, dispostos igualmente aos casos anteriores. Em 3 tanques foram feitas combinações dos componentes, enquanto no 4^o tanque era adicionado apenas C. vulgaris, nas mesmas quantidades que nos outros 3 tanques. (Tabela 3.3)

**TABELA 3.2 - CONCENTRAÇÕES UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS
RADIOMÉTRICOS COM 3 TANQUES IGUAIS**

Cla _t ¹	pigmentos algais (µg l ⁻¹)					MIP (mg l ⁻¹)	MOD (a ₄₄₀ m ⁻¹)	combinações MIP:MOD
	cla ¹	fpa ¹	cla ²	clb ²	car ³			
0,8	0,8	0,0	0,7	0,3	0,2	1	5	0 : 0
1,0	0,9	0,1	1,0	0,5	0,3	5	10	0 : 5
4,4	4,6	0,0	4,4	1,6	1,4	10	15	0 : 10
6,0	5,5	0,7	5,8	2,8	1,8	20	-	5 : 0
14,6	15,4	0,0	14,4	5,2	4,8	-	-	10 : 0
23,9	22,1	2,9	23,0	11,1	7,2	-	-	10 : 15
33,5	35,4	0,0	33,1	12,0	11,0	-	-	20 : 5
47,8	44,2	5,6	45,8	22,3	16,2	-	-	20 : 10
-	-	-	-	-	-	-	-	20 : 15

1: Golterman et al., 1978; 2: Jeffrey e Humprey, 1975; 3: Parsons et al., 1984.

**TABELA 3.3 - CONCENTRAÇÕES UTILIZADAS NOS EXPERIMENTOS
RADIOMÉTRICOS COM 4 TANQUES IGUAIS**

Cla _t ¹	pigmentos algais (µg l ⁻¹)					MIP (mg l ⁻¹)	MOD (a ₄₄₀ m ⁻¹)
	cla ¹	fpa ¹	cla ²	clb ²	car. ³		
1,2	0,6	1,1	1,2	0,5	0,4	1	5
3,4	2,9	0,8	3,4	1,4	1,3	5	10
6,6	5,1	2,5	6,6	2,6	2,8	10	15
13,1	9,9	5,3	12,7	5,4	4,4	20	-
17,8	12,4	9,1	16,8	11,8	7,2	-	-
18,7	13,5	8,7	12,3	9,3	6,9	-	-

Foram 6 os tratamentos com apenas alga, e destes foram escolhidos 3, referentes as concentrações 1,2; 6,6, e 18,7 µg l⁻¹ de Cla_t, para os tratamentos com as 9 combinações de MOD e caulim descritas no item anterior.

d) Experimentos do tipo IV:

Empregando apenas 1 tanque, de revestimento preto, dois tratamentos com *C. vulgaris* (duas concentrações) foram iluminados continuamente por um fluxo irradiante de 55.920 µE m⁻² s⁻¹, medido com um

"quantameter" (marca Li-cor) com fotocélula bihemisférica 20 cm abaixo da superfície.

Do tratamento com $18,7 \mu\text{g l}^{-1}$ de Cla_t foram tomadas 8 medidas radiométricas, uma a cada 5 minutos; do outro tratamento com $47,8 \mu\text{g l}^{-1}$ de Cla_t , foram tomadas 4 medidas, separadas por intervalos de 10 min.

O tratamento com $47,8 \mu\text{g l}^{-1}$ de Cla_t foi submetido a um outro experimento, com iluminação intermitente, em que foram tomadas 9 medidas radiométricas, com tempo de iluminação de 1 min e intervalo de 7 min.

3.4 - PROCESSAMENTO DOS DADOS

3.4.1 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO FITOPLÂNCTON ISOLADAMENTE

O comportamento espectral de *C. vulgaris* foi estudado de duas formas, descritas a seguir.

- 1) Através de análise descritiva das curvas de FRB obtidas nos experimentos I, II e III para se determinar as bandas de maior e de menor reflectância.

As curvas de FRB foram agrupadas em 4 grupos, de modo a diminuir o efeito da alta variabilidade encontrada na amplitude da reflectância dos espectros obtidos em sessões e tanques diferentes, da seguinte forma:

- curvas obtidas no experimento tipo I;
 - curvas de um experimento do tipo II;
 - curvas de experimentos do tipo II, de uma mesma sessão e,
 - curvas de experimentos do tipo III, obtidas na primeira medida do 4^o tanque em cada experimento.
- 2) Através de uma análise estatística empregando o coeficiente de variação para se verificar

variações na reflectância das algas durante quando submetidas à iluminação contínua e à iluminação intermitente.

Foram utilizados os dados dos 3 experimentos do tipo IV e os dados obtidos com o 4^o tanque durante 1 experimento do tipo III. Foi escolhido o experimento com 1,2 $\mu\text{g l}^{-1}$ de Cl_a (baixa concentração) do tipo III para comparar com os resultados do experimento de iluminação intermitente com 47,8 $\mu\text{g l}^{-1}$ Cl_a (alta concentração).

3.4.2 - DO FITOPLÂNCTON NA PRESENÇA DE MIP E MOD

Para este estudo foi necessário o estudo do comportamento dos outros dois componentes, separados e combinados.

3.4.2.1 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA MOD

Foi estudado através da análise descritiva das 3 curvas de FRB referentes as 3 concentrações empregadas nos experimentos do tipo II.

3.4.2.2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO MIP

Foi estudado através da análise descritiva das 3 curvas de FRB referentes as 4 concentrações empregadas nos experimentos do tipo II.

3.4.2.3 - DOS TRATAMENTOS COM MIP E MOD

Foi estudado através da análise descritiva das 9 curvas de FRB referentes aos 9 tratamentos empregados nos experimentos do tipo II.

3.4.2.4 - DOS TRATAMENTOS COM FITOPLÂNCTON, MIP E MOD

Foi estudado o comportamento espectral de 4 concentrações de *C. vulgaris*, 1,2; 6,6; 18,7 e 47,8 $\mu\text{g l}^{-1}$, na presença de 9 combinações de MIP e MOD, já descritas anteriormente, através da análise descritiva das curvas de FRB obtidas nos experimentos do tipo II e tipo III.

3.4.3 - SELEÇÃO DAS FAIXAS ESPECTRAIS

Definiu-se como faixa de maior sensibilidade aquela onde ocorre:

- a) a maior separação entre os FRB de tratamentos que têm diferentes concentrações de clorofila a;
- b) a menor separação entre os FRB de tratamentos diferentes que têm a mesma concentração de clorofila a.

3.4.3.1 - PARA O FITOPLÂNCTON ISOLADAMENTE

Neste caso interessa determinar as faixas de maior separação entre os FRB das diferentes concentrações empregadas. Para a determinação destas faixas espectrais foram empregados dois métodos estatísticos:

- a) para dados obtidos sem repetição:

Nesta análise foram utilizados os dados provenientes do experimento tipo I.

Foi aplicada uma análise de sensibilidade, definida pela equação:

$$S = ((FRB_2 - FRB_1)/FRB_1) / ((C_2 - C_1)/C_1)$$

onde C_i é a i -ésima concentração.

Esta equação foi aplicada para cada 2 curvas de FRB seqüenciais, e a sensibilidade para um grupo de curvas foi obtido pela soma dos valores absolutos das curvas de S , em cada banda do espectro, gerando uma única curva de sensibilidade.

- b) para os dados obtidos com repetição:

Nesta análise foram utilizados dados provenientes dos experimentos II e III, agrupados da mesma forma daquela empregada na análise descritiva, ou seja, um grupo constituído das curvas de 1 experimento do tipo II; outro constituído por curvas de experimentos do tipo II mas de uma única sessão e, o terceiro grupo pelas curvas

referentes a primeira medida no tanque 4 de cada experimento tipo III.

Optou-se por aplicar uma medida de separabilidade simples, a Distância Normalizada, que pode apresentar bons resultados quando se trabalha com espaços de dimensionalidade 1, as médias das classes (grupos de tratamentos de igual concentração de clorofila a) são diferentes, e não exige muito tempo computacional como outros métodos de seleção de atributos (Dutra et al., 1984; Swain et al., 1978; Richards, 1986).

É definida pela diferença entre as médias dividida pela soma dos desvios padrões, entre duas classes:

$$DN_1 = (\mu_2 - \mu_1) / (\sigma_2 + \sigma_1)$$

onde μ_i e σ_i são a média e o desvio obtidos entre cada i -ésima banda do espectro analisado.

Para o cálculo da DN para um grupo de curvas foi adotado o mesmo procedimento aplicado com a equação da sensibilidade.

3.4.3.2 - PARA OS TRATAMENTOS COM FITOPLÂNCTON, MIP E MOD

Neste outro caso interessa determinar as faixas espectrais de menor separação entre os FRB dos 9 tratamentos com uma mesma concentração de alga e, as faixas de maior separação entre os 3 grupos de tratamentos, cada um constituído de 9 tratamentos com uma mesma concentração de alga.

Os 3 grupos de tratamentos referem-se as 3 concentrações de *C. vulgaris* empregadas nas combinações dos experimentos do tipo III. O grupo dos 9 tratamentos obtidos com a concentração de 47,8 $\mu\text{g Cl}_a$ não foi empregado nesta análise por constar da variação de 2 componentes inviabilizado o uso da equação de S, e por ter sido executado sem repetições, inviabilizando o uso da equação da DN.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO FITOPLÂNCTON ISOLADAMENTE

Como descrito no capítulo anterior, o comportamento espectral do fitoplâncton será analisado em separado e na presença dos outros dois componentes.

4.1.1 ANÁLISE DESCRITIVA

As curvas de FRB dos tratamentos com apenas *C. vulgaris* estão nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e, 4.4.

Uma característica presente na Figura 4.1, e ausente nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, é a tendência clara de variação da reflectância com o aumento da concentração algal.

Nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 verifica-se uma grande variação em amplitude dos dados, não relacionada à concentração algal.

Esta variação deve ser explicada por diferenças entre as camadas de tinta depositadas nas paredes internas dos tanques de radiometria, e, principalmente, pela rugosidade do refletor metálico da fonte de luz utilizada na iluminação desses tanques.

A rugosidade do refletor produz focos de maior e de menor intensidade dentro do cone de luz projetado pela fonte (Steffen, 1993). Isto pode ter causado diferentes amplitudes de radiância dos tratamentos pois cada vez que a fonte era posicionada sobre um dos tanques a área vista pelo radiômetro estava sujeita a diferenças na iluminação.

Apesar dessas diferenças, e da ausência de tendências bem definidas nas curvas, aparece uma feição bastante clara, que é um pico de reflectância em torno de 690 nm, mais evidente nas maiores concentrações.

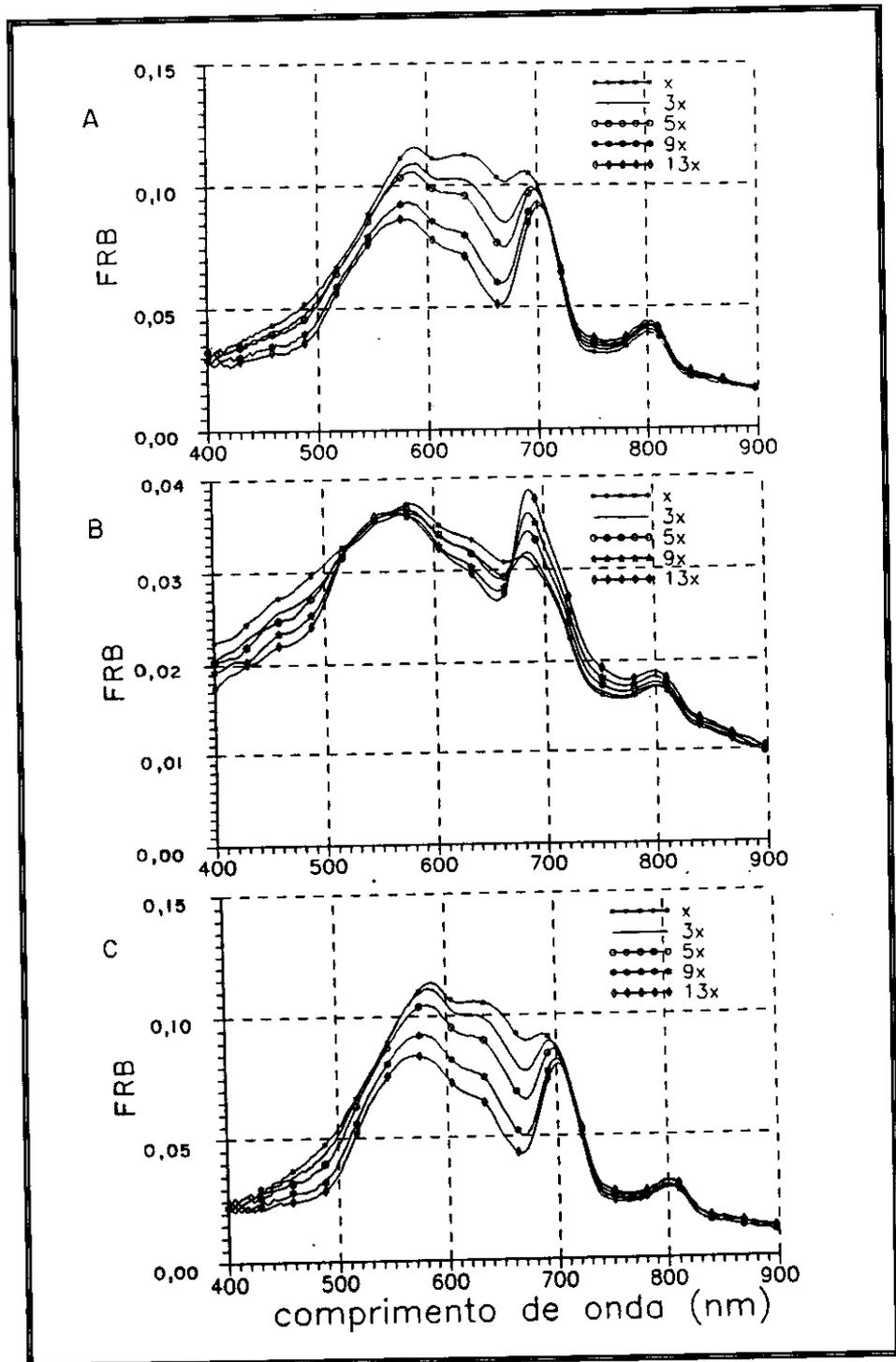


Fig. 4.1 - FRB de 5 concentrações de alga em três tanques de revestimentos diferentes.
A: tanque FV; B: tanque P; C: tanque ALP.

Devido a ocorrência destas grandes diferenças de amplitude na reflectância, referentes aos dados presentes nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, o comportamento espectral do fitoplâncton será estudado com base nos resultados do experimento tipo I.

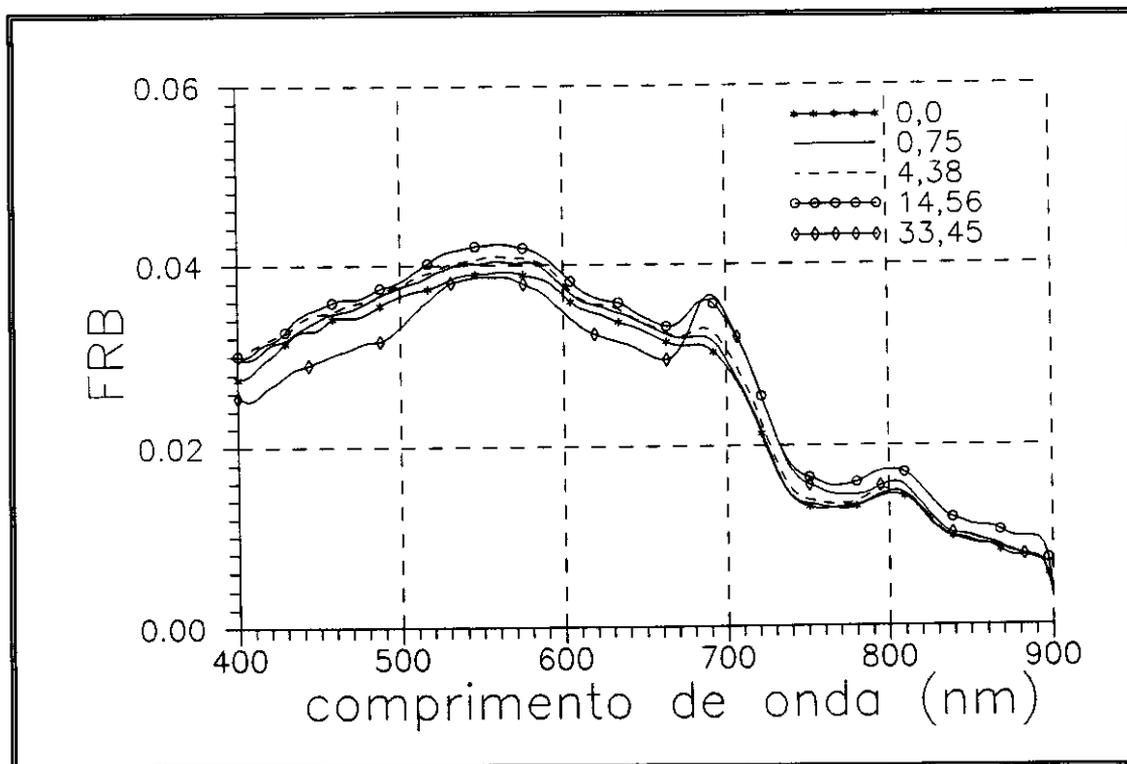


Fig. 4.2 - FRB para cinco concentrações de Cl_a_t no tanque preto, obtidos em experimento tipo II. Concentração em $\mu\text{g l}^{-1}$.

Os resultados do experimento tipo I mostram que os revestimentos mais refletivos dos tanques AlP e FV forçaram a elevação da reflectância, em relação ao revestimento preto, da ordem de 2 a 3 vezes dependendo do comprimento de onda.

A reflectância foi mais baixa na faixa do infravermelho para os três revestimentos, enquanto a faixa de reflectância mais alta mostrou-se dependente do revestimento e da concentração. Para os revestimentos mais refletivos este máximo ocorreu em torno de 590 nm nas 5 concentrações. Para o revestimento preto ocorreu em torno de 590 nm para as 4 concentrações mais baixas e em torno de 690 nm para a concentração maior.

Com os dois tanques mais refletivos o aumento da concentração algal produz redução da reflectância em todo o intervalo do visível e um sutil aumento no infravermelho.

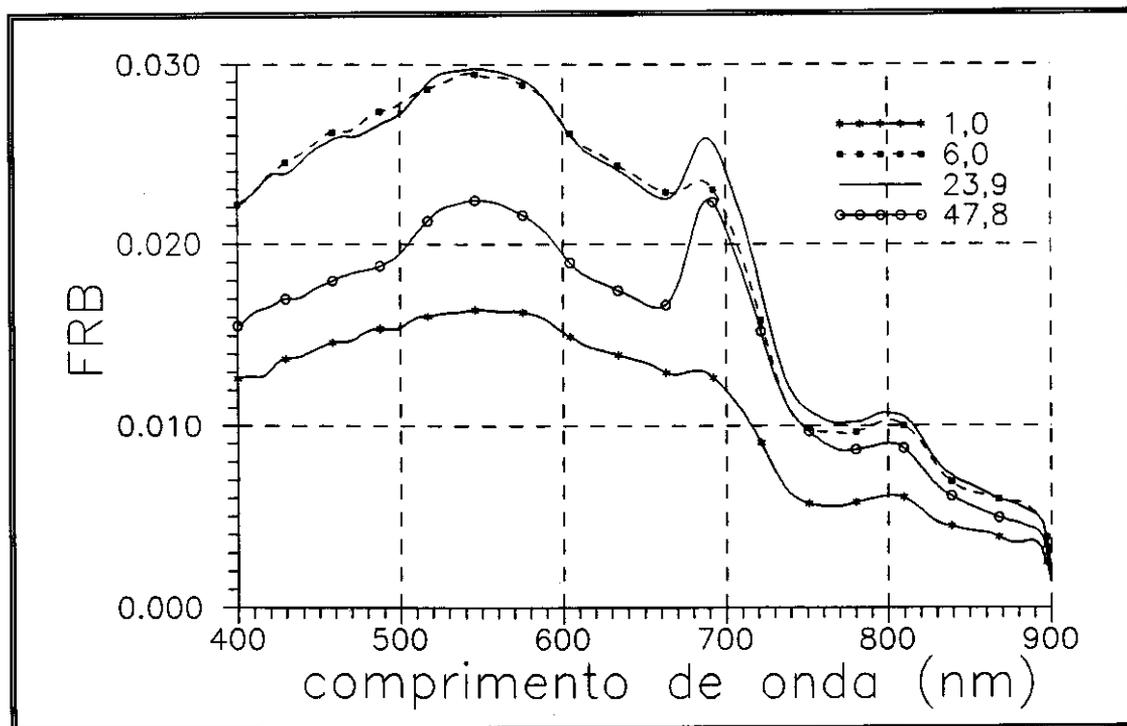


Fig. 4.3 - FRB para quatro concentrações de Cl_{a_2} no tanque preto, obtidos em experimentos do tipo II. Concentração em $\mu\text{g l}^{-1}$

Com o tanque preto a reflectância diminui nas faixas do azul e do vermelho, de 400 a 520 nm e de 560 a 670 nm respectivamente, praticamente não se altera na faixa do verde, de 520 a 560 nm, e aumenta claramente do final do vermelho até parte do infravermelho, cerca de 570 a 820 nm. Após 820 nm a variação da reflectância em função da concentração não é muito nítida.

Para os tanques ALP e FV as curvas aparecem mais discriminadas na faixa entre 540 e 680 nm, enquanto no tanque P a discriminação aparece maior nas faixas de 400 a 500 nm e de 680 a 700 nm.

Outros autores, trabalhando dados de reflectância e de razão de irradiância obtiveram resultados

com o aumento da concentração de Cl_a_t , para massas de água de lagos oligotróficos e eutróficos.

Nos tanques ALP e FV as faixas mais fortes de absorção ocorrem nas faixas do azul e do vermelho.

A banda de absorção mais sutil, porém presente em todas as curvas e mais visível naquelas dos tanques ALP e FV, ocorre em torno de 605 nm.

Neste comprimento de onda o pigmento de maior absorção, a ficocianina (Gitelson, 1992), não consta da literatura como presente em algas da divisão Clorofita e, na curva da água pura aparece esta feição de absorção, porém mais larga, com o centro em torno de 620 nm (Figura 4.5), onde o coeficiente de absorção da própria água aumenta rapidamente.

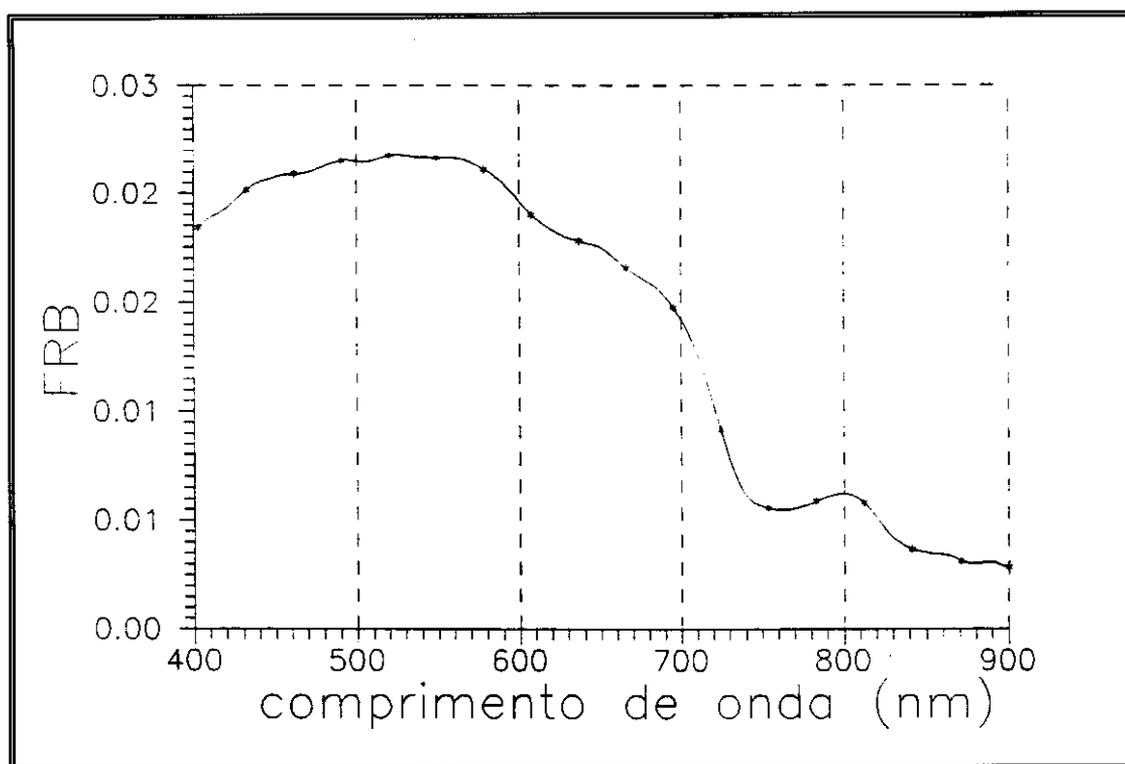


Fig. 4.5 - FRB da água no tanque preto.

Na faixa do azul não se verifica uma banda de absorção característica, mas mesmo assim há uma maior diminuição da reflectância em torno de 480 nm nos tanques

FV e ALP (Figuras 4.1a e c), e em torno de 470 nm no tanque preto (Figura 4.1b).

Esta faixa de absorção no azul coincide com as bandas de absorção da clorofila e dos carotenóides. (Figura 2.7)

Embora na literatura a absorção de luz por *Chlorella* seja atribuída quase que exclusivamente as clorofilas a e b, (Steemann-Nielsen, 1961; Ochiai e Hase, 1970; Anderson e Barrett, 1986), foi verificado que a absorção na faixa correspondente a clorofila a e aos carotenóides, a maior diminuição da reflectância dá-se no final do azul, para os 3 tanques, o que corresponde à faixa de maior absorção pelos carotenóides. (Figuras 4.1a, b e c)

Para os tanques FV e ALP verifica-se uma forte redução da reflectância com a concentração algal em torno de 570 nm, faixa onde os pigmentos mais atuantes, ficoeritrina e ficocianina, não são do grupo de pigmentos encontrados em clorofitas.

Na faixa do vermelho nota-se um pico de absorção que ocorre em comprimentos de onda distintos em função do tanque utilizado e da concentração.

Para a menor concentração estudada, com o tanque preto esse pico situa-se em torno de 663 nm e com os tanques ALP e FV em torno de 673 nm. Esses picos sofrem um deslocamento de 10 nm em direção dos menores comprimentos de onda quando se atinge a maior concentração.

Na literatura são reportados diferentes picos de absorção da clorofila a nesta faixa do vermelho, explicados como resultado de diferentes regimes de radiação subaquática (Bidigare, 1989; Dekker et al., 1992). Tal deslocamento pode ser o resultado de uma interação com a faixa seguinte, de aproximadamente 670 a 710 nm, onde ocorre, em função do tipo de revestimento interno, pouca diminuição ou até aumento da reflectância.

Verificam-se dois comportamentos distintos em função do revestimento dos tanques na faixa entre 670 e 710 nm: com pico em 685 nm para o tanque preto e pico em torno de 700 nm para os tanques ALP e FV.

Nos tanques Alp e FV as algas comportaram-se como levemente absorvedoras, pois a reflectância diminuiu pouco com o aumento da concentração, comparando com a diminuição observada em torno de 670 nm.

No tanque preto ocorre justamente o contrário, pois a reflectância varia positivamente com a concentração do fitoplâncton e em amplitude mais pronunciada que na faixa de absorção em torno de 660 nm.

Outro interessante fato observado foi o deslocamento do pico de reflectância de 680 nm para 690 nm com o aumento da concentração nos tanques Alp e FV, ao passo que no tanque preto este deslocamento foi praticamente nulo.

Tais resultados podem ser explicados pelo comportamento de partículas espalhadoras e pelo mecanismo de fluorescência das algas, e ambos em função do tipo de revestimento interno dos tanques.

Estas diferenças provocadas pelos revestimentos devem ser explicadas pelo resultado da interação de cada um deles com a REM, isto é, a importância relativa da reflectância dos revestimentos na reflectância do sistema como um todo (tanque, água, células algais).

A pequena diminuição da reflectância nos tanques de revestimentos mais refletivos (Alp e FV) no final da faixa do vermelho, seria o resultado do espalhamento originado nos revestimentos dos tanques. A maior disponibilidade de radiação em relação ao tanque preto e ao tanque de cultura pode conduzir ao processo de fotoinibição com a interrupção da fluorescência.

Esta hipótese encontra respaldo nos resultados obtidos por Gitelson (1992), que verificou uma posição fixa do pico de fluorescência no comprimento de onda de 680 nm enquanto um pico de reflectância se desloca de 680 nm, na concentração de $3 \mu\text{g l}^{-1}$, para até 715 nm, com concentração de $100 \mu\text{g l}^{-1}$.

Todavia, esta comparação deve ser cautelosa pois os dados do sensor foram obtidos ao nível de campo, onde atuam diversos outros fatores, como presença de outras

espécies algais, de outros componentes absorvedores, espalhadores e fluorescentes.

Na segunda alternativa, considerando a fluorescência das algas, o aumento da reflectância a partir de 670 nm no tanque preto poderia ser o resultado de dois processos, o da fluorescência e o do espalhamento pelas células como partículas que são. No tanque preto, a reflectância de suas paredes seria suficientemente pequena para permitir a detecção do espalhamento pelas células nas faixas do verde e do infravermelho, e ainda permitir a fluorescência e sua detecção.

O pico desta faixa de espalhamento no tanque preto coincide com o pico de fluorescência das algas (Yentsch e Yentsch, 1979), o que reforça esta hipótese e a torna mais plausível que a primeira.

Verifica-se, entretanto, que no tanque preto o pico de absorção no vermelho desloca-se mais que o mesmo pico nos tanques ALP e FV, demonstrando que os revestimentos mais refletivos realçaram a influência da absorção pelas células, enquanto o revestimento preto realçou a influência do espalhamento, sobre a reflectância.

Comparando os resultados dos 3 tanques com aqueles citados acima, verifica-se que o revestimento preto apresentou o comportamento mais próximo daqueles obtidos ao nível de campo e aeronave, pois foi o que mostrou relação positiva da reflectância com a concentração algal na faixa do verde e parte do vermelho.

4.1.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados da aplicação do coeficiente de variação aos dados dos experimentos com iluminação intermitente e com iluminação contínua estão nas Figuras 4.6a e 4.6b, e nas Figuras 4.7a e 4.7b, respectivamente.

Observa-se que a curva do CV da reflectância dos tratamentos sob iluminação intermitente não tem a mesma forma para as duas concentrações. Para a concentração baixa o CV aumenta na direção dos maiores comprimentos de onda, enquanto para a maior concentração aumenta do centro para

as extremidades, com um pico destacado no comprimento de onda de 685 nm.

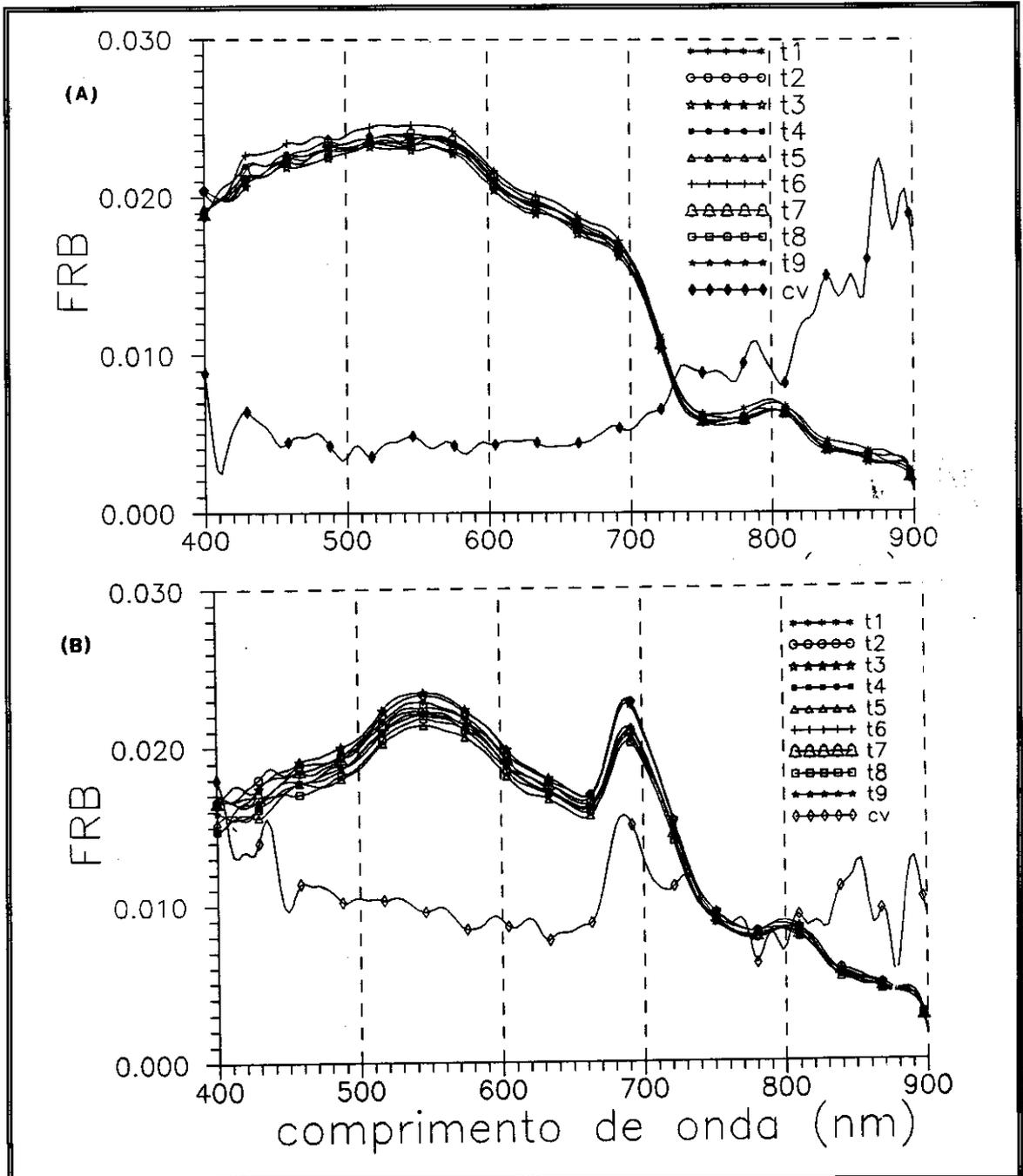


Fig. 4.6 - FRB para duas concentrações de Cl_a_t no tanque preto, sob iluminação intermitente.
 t1...tn: tempos das medidas; CV: coeficiente de variação; A: $1,2 \mu\text{g l}^{-1}$; B: $47,8 \mu\text{g l}^{-1}$.

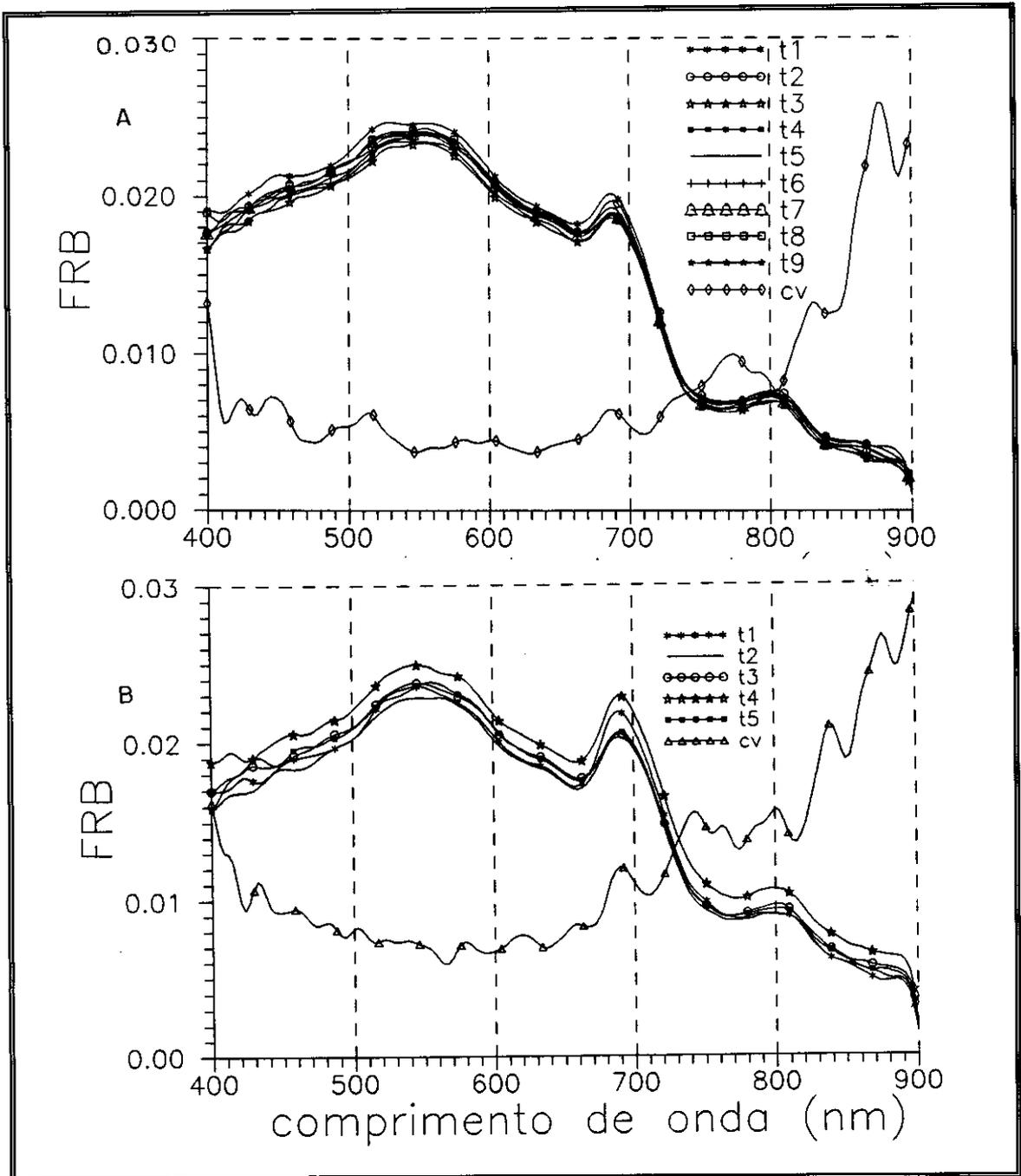


Fig. 4.7 - FRB para duas concentrações de Cl_a_t no tanque preto, sob iluminação contínua.
 t1...tn: tempos das medidas; CV: coeficiente de variação; A: $18,7 \mu\text{g l}^{-1}$; B: $47,8 \mu\text{g l}^{-1}$.

Para os dois tratamentos sob iluminação contínua verifica-se que o CV foi muito parecido, com os

menores valores próximos das faixas do verde e do vermelho, e os maiores valores no final do infravermelho.

Os maiores valores no infravermelho poderiam estar ligados a variações da resposta dos detetores do espectrorradiômetro com variações da temperatura da água ou mesmo dos próprios detetores.

Nota-se também que no comprimento de onda de 690 nm aparece um pico de maior variação em relação aos comprimentos de onda vizinhos, e que este pico é maior para a maior a concentração de clorofila.

Analisando mais detalhadamente a Figura 4.7b, nota-se uma curva que se destaca pela sua amplitude maior em todos os comprimentos de onda. Se esta curva for desconsiderada, a curva de maior reflectância na região de fluorescência corresponde à do tempo 1, e que as demais estão agrupadas mais abaixo. Isto também pode ser notado, embora com menor clareza, na Figura 4.7a.

Estes picos de CV em comprimentos de onda correspondentes as bandas de fluorescência, parecem indicar que sob iluminação intermitente ocorreu efetivamente fluorescência e com grande variação em intensidade, e ainda, uma possível fotoinibição da fluorescência nos experimentos de iluminação contínua, quando as algas ficaram expostas a uma intensidade 5 vezes maior que a do tanque de cultura.

Neste caso, a inibição da fluorescência seria o primeiro mecanismo fotoadaptativo das algas em condições de excesso de iluminação (Stemann-Nielsen, 1962; Yentsch e Yentsch, 1979; Lewis et al., 1984).

4.2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO FITOPLÂNCTON NA PRESENÇA DE MIP E MOD

Para se analisar o resultado dos tratamentos com MIP e MOD sobre o comportamento espectral de *C. vulgaris* será necessário fazer primeiramente uma análise do comportamento dos outros dois componentes utilizados, o que vem a seguir.

4.2.1 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA MATÉRIA ORGÂNICA DISSOLVIDA

Antes de começar a análise dos dados, deve ser esclarecido que para facilitar a discussão e a leitura do texto, foi adotada a SHTN seguida de um número para indicar o valor esperado do coeficiente de absorção devido a adição de SHTN. SHTN 10, por exemplo, significa uma concentração de SHTN suficiente para produzir um coeficiente de absorção de 10 m^{-1} .

As duas amostras utilizadas neste trabalho apresentaram um comportamento espectral bastante semelhante e dentro do esperado, isto é, produzindo uma diminuição da reflectância na região do visível do espectro (Figura 4.8a e b).

A diferença no comportamento espectral entre as duas amostras ocorreu na faixa do verde, onde a amostra obtida pela decomposição não foi tão efetiva na redução da reflectância como a outra amostra. Esta diferença deve ser provocada pela composição química diferente apresentada pelas duas amostras de origens tão distintas.

A diminuição na reflectância com o aumento da concentração de SHT seguiu a curva de absorção pelas substâncias húmicas, ou seja, diminuindo a reflectância com maior eficiência do azul para o vermelho. (Figura 4.8b)

Na faixa espectral situada entre 400 e 570 nm as concentrações de substâncias húmicas utilizadas promoveram uma diminuição de aproximadamente 40 a 50 % da reflectância da água, enquanto acima de 570 nm a influência destas substâncias cai drasticamente e chega a ser quase nula em torno de 670 nm.

É interessante notar que aumentando o coeficiente de absorção essa tendência continua mas em amplitude menor.

Isto fica bem evidente com o comportamento da MOD obtida da decomposição, em que a reflectância no visível não se modifica com um aumento do coeficiente de absorção de 5 m^{-1} para 10 m^{-1} . No caso da MOD extraída do

Neorgan, ainda se verifica uma redução da reflectância no visível com coeficiente de absorção de 10 m^{-1} e 15 m^{-1} .

Entretanto, na faixa entre 670 nm e 900 nm, um aumento da concentração de SHT promove um aumento proporcional de amplitude da reflectância em toda esta faixa. Este comportamento pode estar ligado a colóides presentes na MOD, uma vez que estes comportam-se como partículas no espalhamento da REM (Mobley, 1993).

Na faixa do visível o efeito absorvedor estaria encobrindo o espalhamento, e no infravermelho com a absorção muito baixa o espalhamento se sobressai.

Estas duas regiões do espectro (visível e infravermelho) são delimitadas muito bem com a variação da concentração de substâncias húmicas, que mostra uma banda em torno de 670 nm onde variações grandes na concentração promovem pequenas variações na reflectância.

Com o aumento da concentração de SHT, observa-se na faixa espectral entre 670 e 900 nm, assim como na região do visível, uma tendência de redução da influência das substâncias húmicas, sobre a reflectância, o que fica bem claro na Figura 4.8b.

Estes resultados demonstram que um coeficiente de absorção de 5 m^{-1} já é bastante alto para as condições deste experimento, e que 15 m^{-1} já deve estar chegando próximo do limite de sensibilidade deste sistema (tanque de radiometria, água e iluminação).

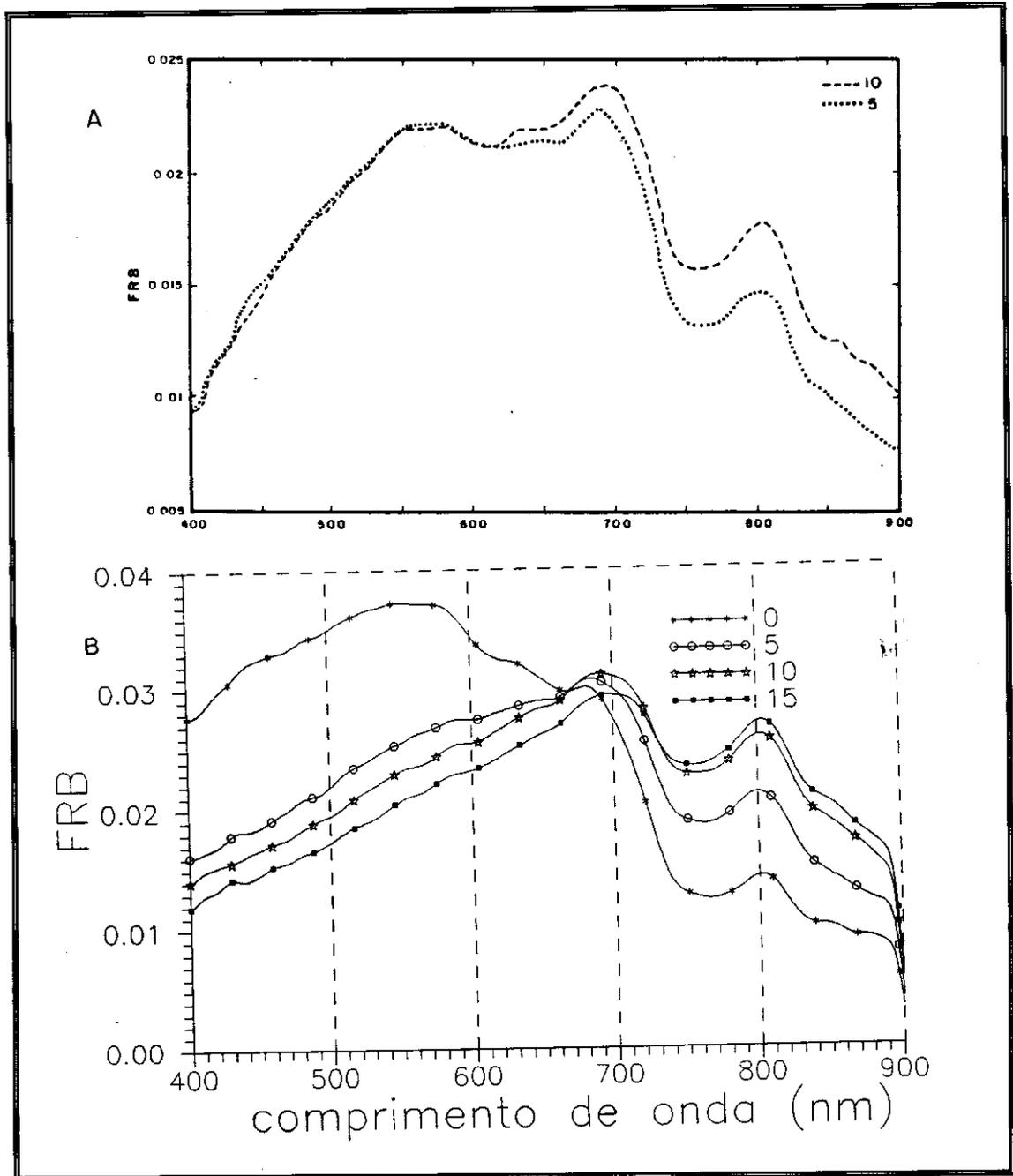


Fig. 4.8 - FRB para duas amostras de SHT no tanque preto, com diferentes valores de a (m^{-1}).

A: SHTD; B: SHTN.

4.2.2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO MATERIAL INORGÂNICO PARTICULADO

Este componente apresentou, de maneira geral, um comportamento espectral dentro do esperado e já

bastante demonstrado na literatura concernente a trabalhos realizados ao nível laboratorial, ou seja, aumentando a reflectância do sistema em todos os comprimentos de onda do visível e do infravermelho próximo.

Para todos os comprimentos de onda acima de 500 nm, a variação da concentração de 0 a 20 mg l⁻¹ promoveu uma variação quase linear na reflectância, alterando muito pouco a forma da curva da água (Figura 4.9).

Nas faixas do verde e do vermelho o aumento foi ligeiramente mais pronunciado, com a reflectância da suspensão sendo triplicada com uma variação de concentração entre 0 e 20 mg l⁻¹.

A ausência de bandas de absorção nítidas confirma o resultado das análises mineralógicas, ou seja, de que trata-se de um material pobre em óxidos de ferro.

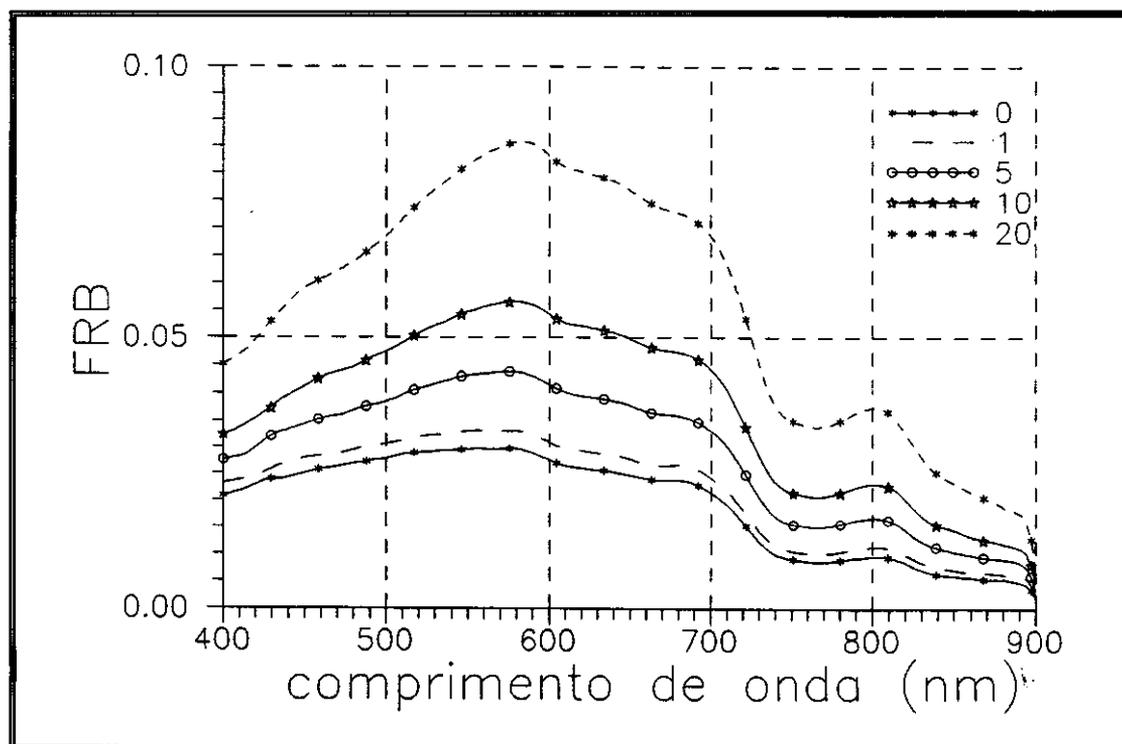


Fig. 4.9 - FRB de cinco concentrações de MIP (mg l⁻¹) no tanque preto.

Não foi constatada a presença da região de inversão (Mantovani e Cabral, 1992), indicando que não ocorreu excessiva interferência do próprio revestimento do tanque no comportamento espectral das suspensões em estudo. Entretanto, tal análise não pode ser estendida para a situação em que predominam as substâncias tipicamente absorvedoras.

4.2.3 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS TRATAMENTOS COM MIP E MOD

Foram escolhidas 9 combinações desses dois componentes levando-se em consideração a disponibilidade de dados (FRB) de combinações iguais com a presença de *C. vulgaris*, em pelo menos 4 concentrações de clorofila a.

Desse modo, embora fossem possíveis 20 combinações diferentes de SHTN e caulin, foram escolhidas 9 combinações representativas da reflectância do fitoplâncton na presença desses dois componentes. (Figura 4.10)

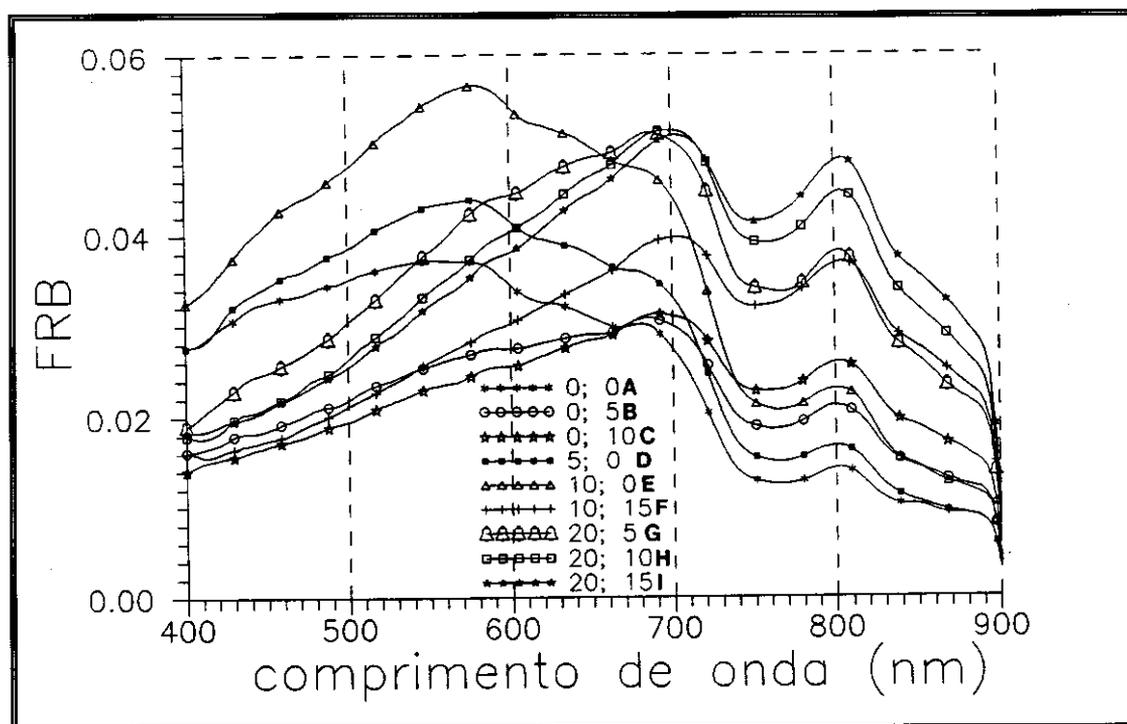


Fig. 4.10 - FRB para as nove combinações de MIP e MOD escolhidas.

Os valores da esquerda são do MIP (mg l^{-1}), e os valores da direita da MOD a_{440} (m^{-1}).

Verifica-se claramente que na faixa do infravermelho e parte do vermelho (de 670 a 900 nm) qualquer adição de caulin ou de SHTN promove aumento da reflectância do sistema, sem alterar a forma da curva da água.

Também pode ser constatado, nessa região, o efeito simultâneo e pronunciado de aumento da reflectância quando são combinados na máxima concentração esses dois componentes.

Na região do visível, entretanto, o efeito de um componente sobre a reflectância do outro é subtrativo.

Na região do visível entre 550 e 670 nm a reflectância assume muitos valores diferentes, sendo que o maior foi obtido com caulin na concentração de 10 mg l^{-1} . Uma concentração de 20 mg l^{-1} de caulin parece ser suficiente para atenuar bastante o efeito absorvedor de SHTN, mesmo na maior concentração. Nessa região, como era de se esperar, os valores mais baixos foram obtidos com SHTN isolado e também para a combinação de 10 mg l^{-1} de caulin e SHTN 15.

Ainda nessa faixa espectral, nota-se um ponto situado em 670 nm que é o ponto de intersecção das curvas de caulin e de SHTN, que tem seus picos de reflectância em torno de 580 e de 700 nm, respectivamente.

Abaixo de 550 nm qualquer adição de SHTN resulta em valores de reflectância inferiores aos da água, independentemente da concentração de caulin, isto, é claro, para as condições e concentrações dos experimentos deste trabalho.

De modo geral, o que se depreende da combinação destes dois componentes nas condições deste sistema experimental, é que os resultados podem ser divididos em duas regiões espectrais bem distintas. Uma primeira região compreendendo o visível até cerca de 670 nm, onde os dois componentes interagem subtraindo seus efeitos de quando isolados, e outra região, acima de 670 nm, onde ambos interagem de forma aditiva, aumentando a reflectância do sistema.

4.2.4 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS TRATAMENTOS COM FITOPLÂNCTON, MIP E MOD

Como foram escolhidas 4 concentrações de *C. vulgaris* para a análise dos resultados, a sequência da discussão a seguir será da menor concentração para a maior, de modo que as feições espectrais características do fitoplâncton serão mais visíveis de uma concentração para outra. Deve ser lembrado que as combinações de caulin e SHTN são as mesmas discutidas na seção anterior.

Analisando-se as curvas obtidas para a concentração de $1,2 \mu\text{g l}^{-1}$ de clorofila *a* (Figura 4.11a), a primeira constatação que se faz, é a de que as amplitudes das curvas de FRB são menores que as suas equivalentes com concentração igual a zero (Figura 4.10).

A segunda é de que na região do infravermelho essa diferença de amplitude é ainda maior. Além dos fatores já mencionados no início do capítulo para explicar estas discrepâncias, ainda deve ser constatada a troca da lâmpada e a repintura dos tanques de coleta, que foram feitas entre as coletas dos dados dos períodos 2 e 3, que também devem ter contribuído para estas diferenças.

Apesar dessas diferenças de amplitude, a forma geral das curvas foi mantida, e pode-se constatar as mesmas feições nas duas Figuras.

Comparando-se, por exemplo, as curvas *a*, *b*, e *d*, por serem as de menor concentração de SHTN e caulin, nota-se que não aparecem as feições características das algas.

Com a concentração de $6,6 \mu\text{g l}^{-1}$ de Cl_a (Figura 4.11b), já começam a aparecer as primeiras feições de influência dos pigmentos algais. Isto pode ser verificado nas curvas *a*, *d*, e *e*, nas quais aparecem pequenos ombros em torno de 685 nm.

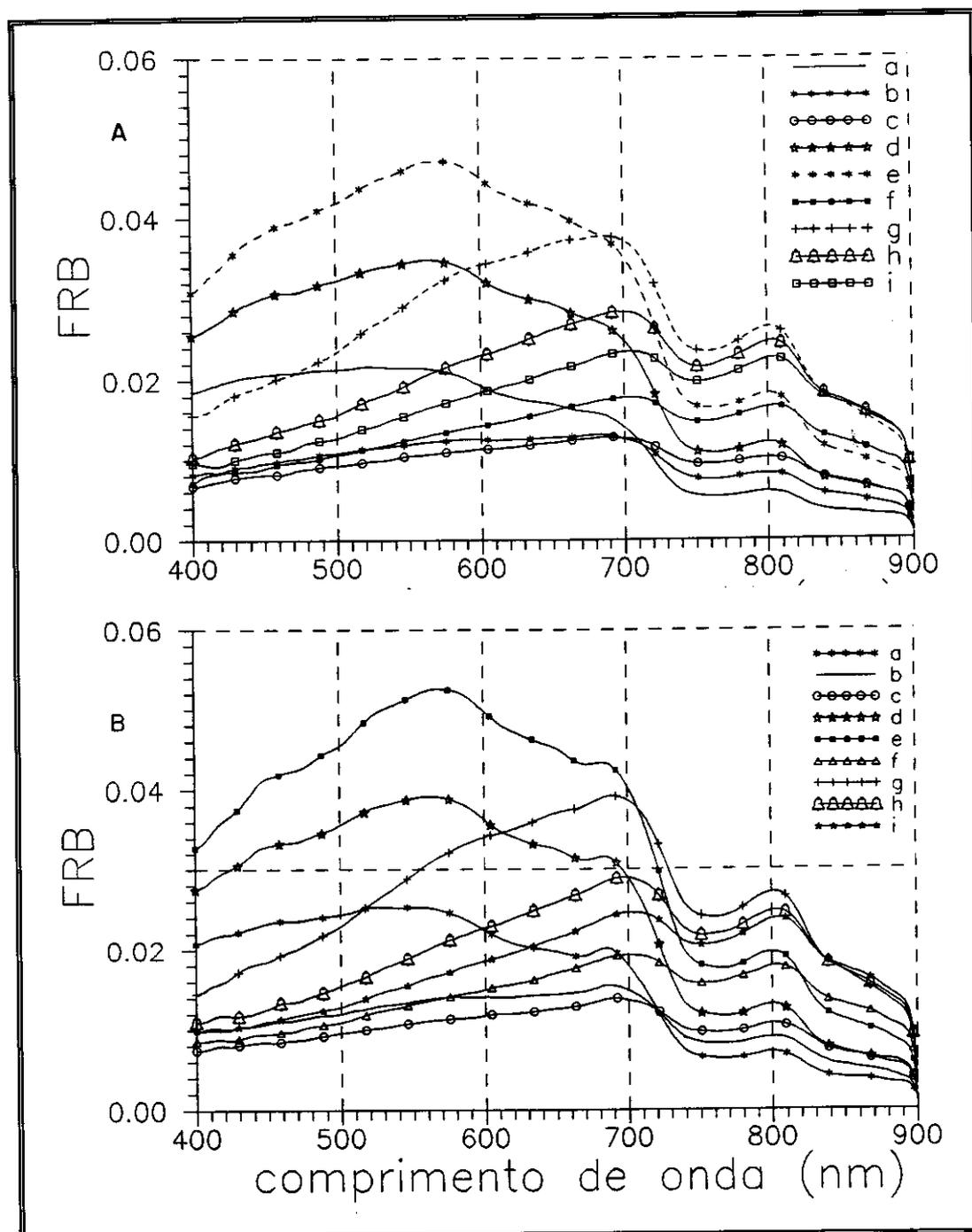


Fig. 4.11 - FRB para duas concentração de Cl_{at} e as nove combinações de MIP e MOD escolhidas. Concentração em $\mu g l^{-1}$. A: 1,2; B: 6,6.

Para a concentração de $18,2 \mu g l^{-1}$ de Cl_{at} (Figura 4.12a), são muito evidentes as feições provocadas pelos pigmentos, ou seja, um aumento da reflectância

próximo de 685 nm, e as faixas de absorção no vermelho e no azul, praticamente sem deslocamento dos picos, mesmo para as combinações de maior concentração de SHTN.

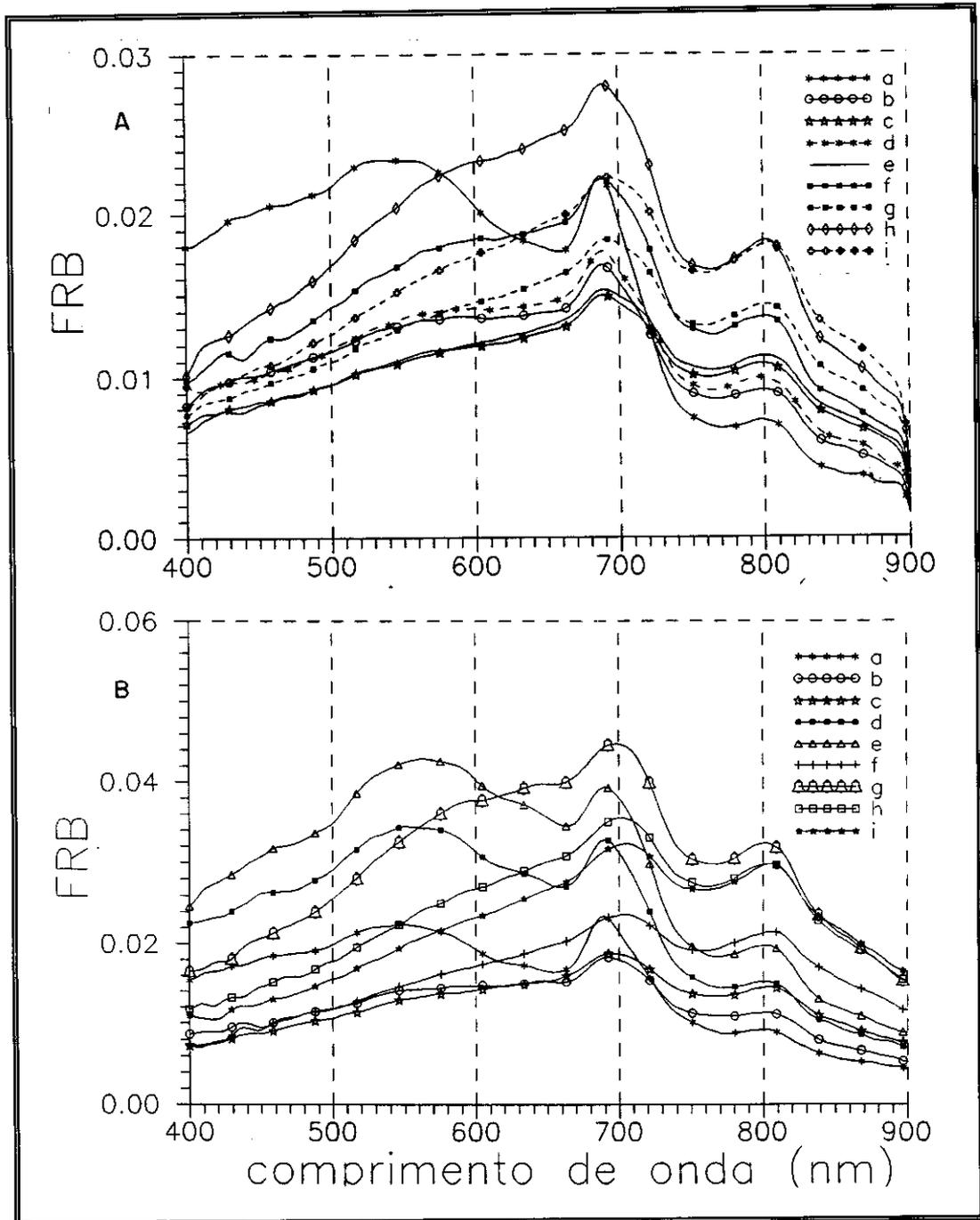


Fig. 4.12 - FRB para duas concentrações de Cl_{at} e as nove combinações de MIP e MOD escolhidas. Concentração em $\mu\text{g l}^{-1}$. A: 18,2; B: 47,8.

Para as curvas **c**, **f**, **h** e **i**, que representam as combinações de concentração de SHTN (0:10; 10:15; 20:10 e, 20:15 de caulim e SHTN, respectivamente) não se observam as feições ligadas a presença de C. vulgaris.

Finalmente, para a maior concentração empregada, 47,8 $\mu\text{g l}^{-1}$ Cla (Figura 4.12b) são nítidas as bandas de absorção e de fluorescência de C. vulgaris.

Com uma concentração de SHTN 15 e 20 mg l^{-1} de caulim é visível o pico de fluorescência, e com SHTN 10 ainda pode-se perceber um pequeno ombro em 685 nm. Para as combinações somente com caulim são também nítidas as feições que ocorrem na faixa do vermelho.

4.3 FAIXAS ESPECTRAIS DE MAIOR SENSIBILIDADE AO FITOPLÂNCTON

Os resultados obtidos com a medida de separabilidade empregada convergem para aquelas faixas espectrais onde as feições características, da alga utilizada, foram mais acentuadas e conspícuas nas diferentes condições e experimentos montados.

4.3.1 PARA O FITOPLÂNCTON ISOLADAMENTE

Primeiramente, será verificada a condição da alga na ausência dos outros componentes.

Com a análise de sensibilidade, comparando os resultados do experimento com tanques de revestimentos diferentes (Figura 4.13), constata-se primeiramente que os revestimentos mais refletivos apresentaram maior sensibilidade, do que o tanque preto, no intervalo do visível e no final do infravermelho, correspondentes as faixas de menor reflectância dos tratamentos empregados.

Entre 690 nm e 820 nm, faixa onde a absorção por clorofila e carotenóides é desprezível, o tanque preto apresentou maior sensibilidade do que os outros dois.

As posições das faixas, para cada um dos tanques são descritas a seguir.

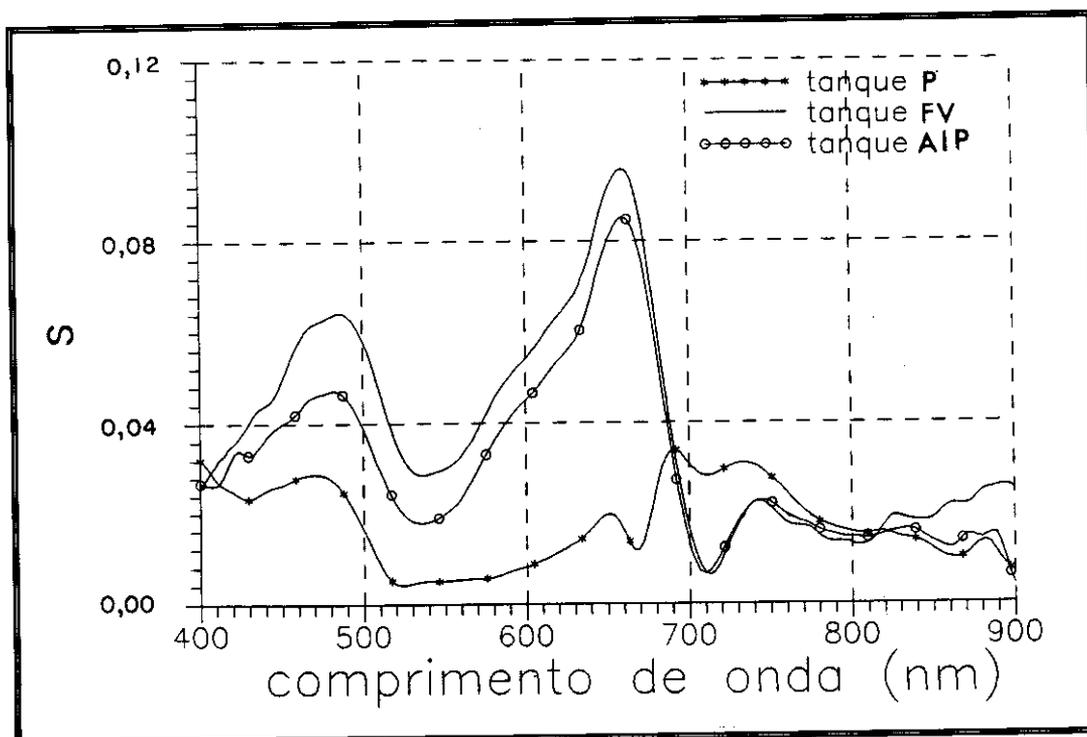


Fig. 4.13 - Curvas de sensibilidade(S) para os três tanques com as cinco concentrações utilizadas (1:3:5:9:13), correspondentes à Figura 4.1.

Para o tanque preto as melhores faixas, desconsiderando-se cerca de 20 nm em cada extremidade do espectro devido a presença de ruídos no sinal, foram:

- uma faixa de aproximadamente 15 nm, centrada em 690 nm, que engloba a banda de fluorescência da clorofila a;
- uma faixa de cerca de 20 nm, centrada em 730 nm, que deve ser influenciada pela banda de fluorescência e pelo espalhamento;
- uma faixa de aproximadamente 20 nm centrada em 470 nm, que coincide com a faixa de absorção pelas clorofilas a e c, e pelos carotenóides;
- uma faixa de cerca de 15 nm, centrada em 660 nm, que engloba o pico de absorção da clorofila a.

Para os tanques AIP e FV as melhores faixas foram:

- a) uma faixa de cerca de 15 nm, centrada em 668 nm, que engloba o pico de absorção da Cl_a ;
- b) uma faixa de cerca de 20 nm, centrada em 490 nm, que coincide com as faixas de absorção pelas Cl_a , c e carotenóides;

Os resultados da análise da Distância Normalizada, aplicada aos experimentos com repetições estão na Figura 4.14.

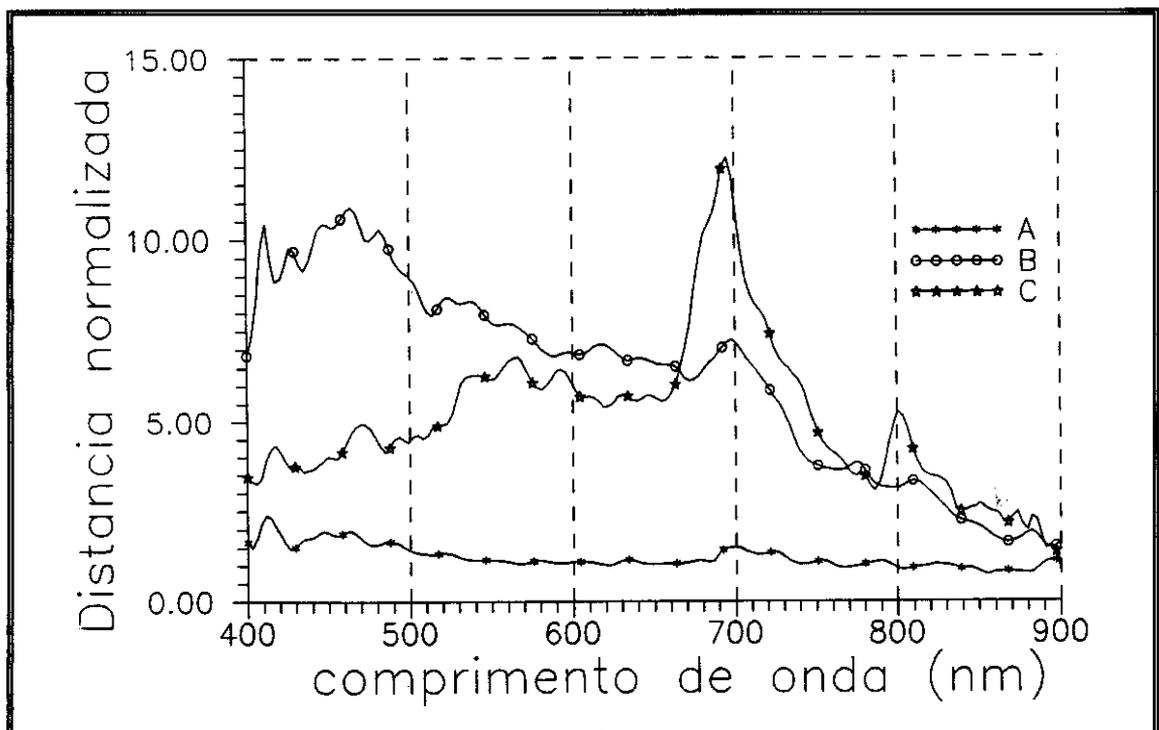


Fig. 4.14 - Curvas de distância normalizada para três grupos de concentrações de Cl_a , correspondentes as Figuras 4.2 (A), 4.3 (B) e 4.4 (C).

Para o grupo de curvas presentes na Figura 4.2, as melhores faixas foram:

- a) uma faixa em torno de 450 nm, com cerca de 20 nm, correspondente a faixa de absorção pela Cl_a ;
- b) uma faixa com cerca de 10 nm, centrada em 695 nm, que engloba a banda de fluorescência da Cl_a ;

Para o grupo de curvas presentes na Figura 4.3, foram as seguintes:

- a) uma faixa com cerca de 10 nm, centrada em 460 nm e ladeada por duas outras menores, que correspondem também a faixa de absorção da Cla e de carotenóides.

Para o grupo de curvas presentes na Figura 4.4, foram as seguintes:

- a) uma faixa com cerca de 10 nm, centrada em 695 nm, correspondente a banda de fluorescência da Cla;
- b) três faixas próximas, com cerca de 60 nm se somadas, centradas em 560 nm, que corresponde a uma faixa onde não foi verificada nenhuma banda de absorção ou de reflexão nítida;).

4.3.2 PARA OS TRATAMENTOS COM FITOPLÂNCTON, MIP E MOD

Para essa condição, como foi dito no capítulo de material e métodos, interessa encontrar as faixas onde ocorrem os menores valores de DN dentro de cada grupo de tratamentos, e onde ocorrem os maiores valores de DN entre os grupos.

A Figura 4.15 mostra o resultado da aplicação da DN para cada um dos 3 grupos de tratamentos correspondentes as concentrações ($\mu\text{g l}^{-1}$): 1,2; 6,6 e 18,7.

Verifica-se que os menores valores de DN, ocorrem no final do infravermelho para as duas concentrações mais altas e próximo de 700 nm para a concentração menor. Como não foram detectadas feições típicas das algas no final do infravermelho, este intervalo não será considerado na análise seguinte.

No intervalo do visível os menores valores ocorreram no final do vermelho e no azul, onde foram detectadas as feições de absorção e fluorescência.

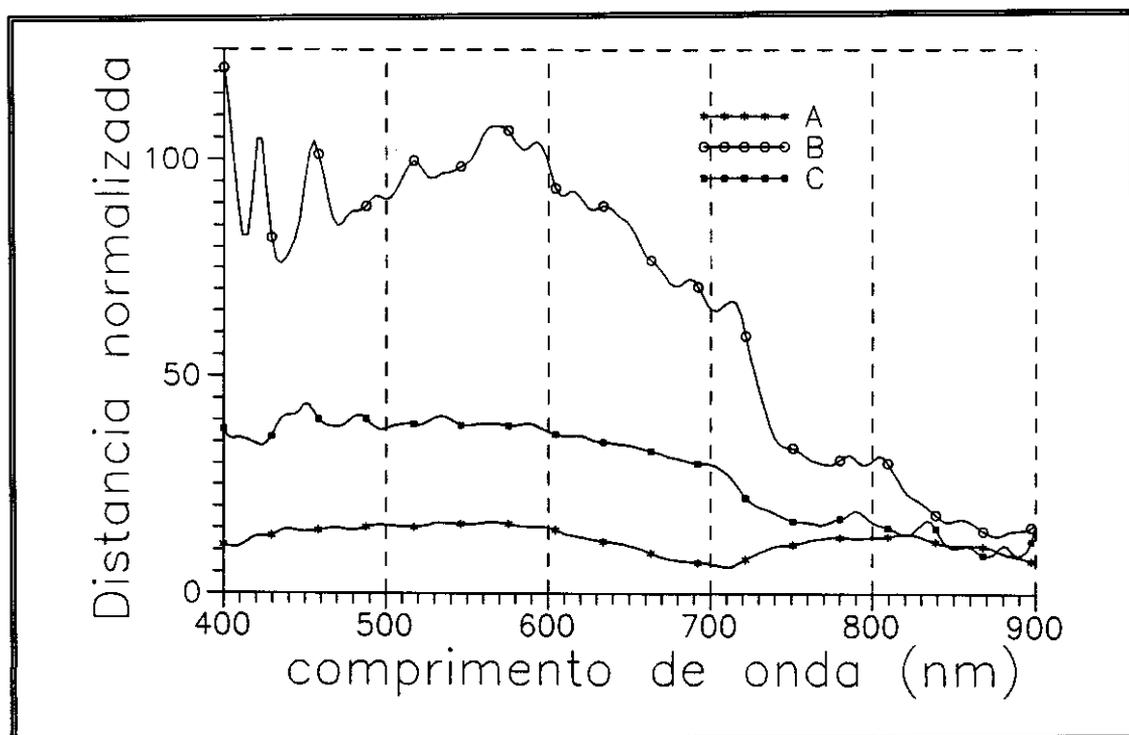


Fig. 4.15 - Curvas de distância normalizada resultante dos grupos de combinações correspondentes às Figuras 4.11a (A), 4.11b (B), e 4.12a (C).

Analisando a curva A dessa Figura, correspondente a $1,2 \mu\text{g l}^{-1} \text{Cl}_a$, verificam-se as seguintes feições:

- a) uma faixa com cerca de 10 nm, centrada em 710 nm, próxima do pico de fluorescência;
- b) uma leve inflexão centrada em 680 nm, que também deve estar ligada a fluorescência.

Analisando a curva B, correspondente à concentração de $6,6 \mu\text{g l}^{-1} \text{Cl}_a$, as faixas de maior sensibilidade são as seguintes:

- a) uma faixa de 20 nm centrada em 765 nm, no infravermelho;
- b) uma faixa de cerca de 10 nm, centrada em 700 nm, muito próxima do pico de fluorescência da Cl_a ;

- c) uma faixa de cerca de 10 nm, centrada em 680 nm, também próxima da banda de fluorescência.

Analisando-se a curva C, correspondente a 18,7 $\mu\text{g l}^{-1}$ Cla, observa-se :

- a) uma faixa de 20 nm centrada em 765 nm, no infravermelho, região espectral onde as células promovem apenas espalhamento;
- b) uma pequena inflexão em 690 nm, que corresponde a banda de fluorescência;
- c) uma faixa com cerca de 10 nm, centrada em 425 nm, dentro da banda de absorção da Cla.

A Figura 4.16 traz o resultado da aplicação da DN para os três grupos de tratamentos.

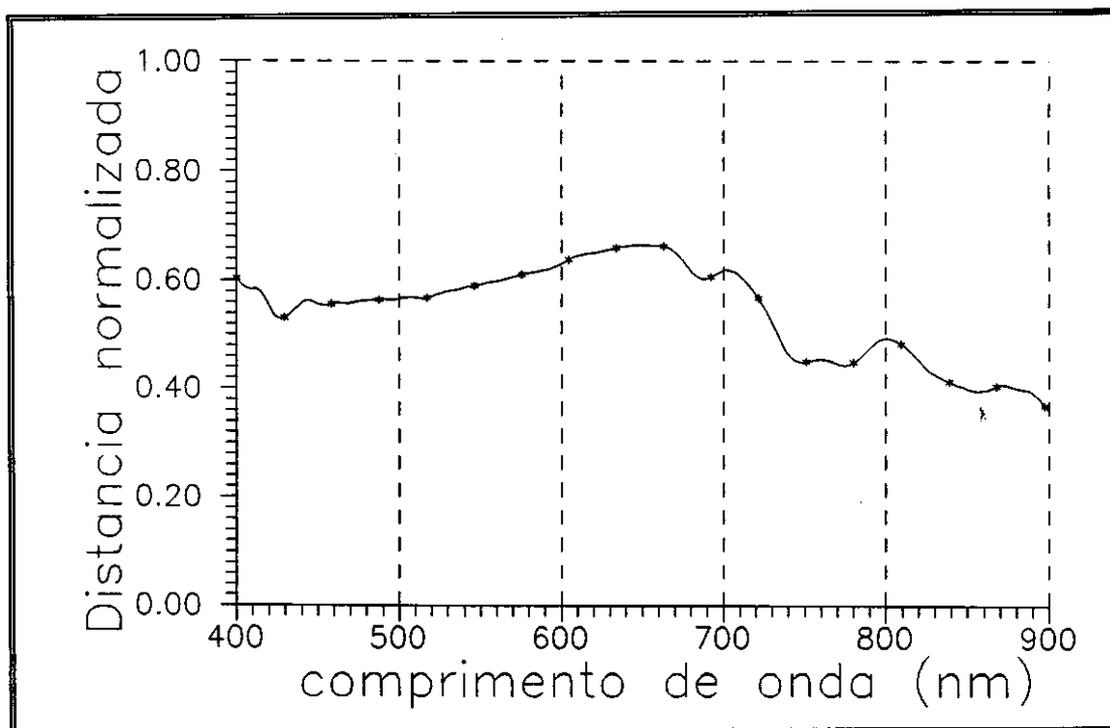


Fig. 4.16 - Curva de distância normalizada resultante da aplicação aos dados das Figuras 4.11a, 4.11b e 4.12a.

Analisando-se a curva da Figura 4.16, tem-se que as duas faixas em que estão mais distanciados os grupos de tratamentos ocorrem no vermelho, em 665 nm e em

700 nm, próximas dos picos de absorção e fluorescência respectivamente.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As conclusões e recomendações serão apresentadas em dois tópicos, um referente ao método empregado na coleta de dados e outro referente aos resultados obtidos.

a) Quanto ao método:

A realização da coleta de dados ao nível de laboratório, com o uso de tanques de radiometria e a produção controlada dos componentes, foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho e a consecução dos objetivos.

O emprego de componentes opticamente ativos na forma concentrada (culturas de algas, substâncias húmicas) e na forma seca (material particulado inorgânico) permitiu a escolha das concentrações de cada um deles independentemente.

As maiores dificuldades foram encontradas no cultivo de algas e na determinação da concentração dos pigmentos fotossintetizantes, de modo que novas pesquisas deveriam focalizar as condições sob as quais as células algais são submetidas durante o cultivo, e também a determinação precisa e rápida dos pigmentos presentes nas células.

A iluminação da cultura e dos experimentos radiométricos deve ser o mais próximo possível da iluminação solar, em intensidade e distribuição espectral, para garantir a representatividade dos resultados em relação ao que ocorre nos ecossistemas aquáticos naturais.

Experimentos com estes mesmos tipos de revestimento internos utilizados, porém em tanques maiores deveriam ser realizados para se determinar a influencia das paredes sobre a reflectância das algas.

a) Quanto aos resultados:

Os resultados mostram que as suspensões de C. vulgaris apresentaram faixas de absorção e de

espalhamento cujos limites e intensidade foram dependentes do revestimento interno do tanque de radiometria.

Para os revestimentos mais refletivos as algas promoveram forte diminuição da reflectância no visível e ligeiro aumento no infravermelho. As faixas de maior sensibilidade ficaram em torno de 660 nm e de 480 nm, onde predominam as bandas de absorção da clorofila e dos carotenóides, respectivamente.

Para o revestimento preto as algas promoveram diminuição da reflectância no azul e parte do vermelho, e aumento a partir de 680 nm até 900 nm. No comprimento de onda de 690 nm ocorreu o pico de reflectância, que pode estar ligado ao fenômeno da fluorescência. As faixas de maior sensibilidade ficaram em torno de 690 nm e em torno de 470 nm, onde predominam a absorção por carotenóides e a fluorescência, respectivamente.

De maneira geral, o sistema com tanque preto apresentou maior sensibilidade ao retroespalhamento pelas células algais em suspensão, enquanto os sistemas com tanques mais refletivos responderam melhor à absorção.

Quanto aos outros dois componentes, pode-se afirmar que para as concentrações de SHTN e caulin empregadas, a MOD foi o componente que mais atenuou as feições espectrais de *C. vulgaris*.

Apesar de as concentrações de MOD escolhidas terem sido bastante altas, as bandas de absorção mais fortes, e também a de fluorescência, de *C. vulgaris*, foram observadas em muitas das combinações estudadas.

As faixas de maior sensibilidade à variação da concentração algal na presença dos dois componentes ficaram no vermelho, com pico em torno de 665 nm, correspondente à banda de absorção, e em torno de 700 nm, correspondente à banda de fluorescência da clorofila a.

Cuidadosos experimentos deveriam ser montados com o objetivo principal de se acompanhar a reflectância durante o ajuste fisiológico das algas sob as condições de um experimento radiométrico.

Embora as condições do experimento não representem fielmente as condições encontradas nos ecossistemas aquáticos de modo geral, pode-se dizer, com relativa segurança, que um pequeno número de bandas espectrais finas, com cerca de 10 nm, em sistemas sensores de alta relação sinal/ruído, poderiam ser muito eficientes na detecção e quantificação de pigmentos algais.

Como os resultados mostraram bandas finas sensíveis aos pigmentos de *C. vulgaris*, certamente mostrariam sensibilidade a outros pigmentos algais acessórios mais importantes, de modo que é possível direccionar e planejar as novas pesquisas para se conseguir, num futuro próximo, detectar e distinguir algas de diferentes grupos algais.

GLOSSÁRIO

- Fator de reflectância bidirecional:** razão entre as radiâncias da amostra (alvo) e de uma superfície ideal e lambertiana, obtidas nas mesmas condições de iluminação e geometria de aquisição (Milton, 1987).
- Fitoplâncton:** grupo das plantas que flutuam livremente segundo a movimentação das massas de água, com tamanho variando tipicamente entre poucos μm até 100 μm (Harris, 1986).
- Função de espalhamento volumétrico:** intensidade radiante (que deixa um elemento de volume em uma dada direção) por unidade de irradiância incidente no volume e por unidade de volume (Jerlov, 1976).
- Geometria de aquisição:** condições geométricas (posicionamento) entre o alvo, e a direção dos fluxos incidente e refletido ou, de outra forma, entre o alvo, a fonte de radiação e o instrumento utilizado durante a aquisição de dados radiométricos.
- Glitter:** espalhamento especular da radiação nas múltiplas facetas da superfície rugosa da água em movimentação, na direção do sensor (baseado em Jerlov, 1976).
- Irradiância:** fluxo radiante incidente sobre um elemento infinitesimal de uma superfície, dividido pela área do elemento (Jerlov, 1976).
- Radiância:** fluxo radiante por unidade de ângulo sólido por unidade de área projetada de uma superfície (Jerlov, 1976).
- Razão de irradiância:** razão entre a irradiância ascendente e a irradiância descendente, em uma determinada profundidade na coluna d'água (Jerlov, 1976).
- Reflectância da irradiância:** equivalente a razão de irradiância.

Reflectância residual: termo utilizado quando se subtrai a reflectância da água pura da reflectância da amostra de água com outros componentes presentes, obtidas nas mesmas condições de iluminação e geometria de aquisição.

Sala escura: sala com paredes absorvedoras de radiação, com equipamentos adequados para experimentos de radiometria.

Substâncias opticamente ativas: substâncias encontradas nos ecossistemas aquáticos e que atenuam a propagação da radiação na coluna d'água, como por exemplo as substâncias húmicas, as algas e o material particulado.

Tanque de radiometria: tanque contendo água em que são adicionadas substâncias opticamente ativas para a determinação de grandezas como reflectância, transmitância e atenuação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agro-Humus - Indústria e Comércio de Adubos Orgânicos. **O que é neorgan - 51 ?** Atibaia , s.d., 6 p.
- Anderson, J.M.; Barrett, J. Light-harvesting pigment-protein complexes of algae. In: **Encyclopedia of Plant Physiology**. Berlim, Springer-Verlag, 1986. 270-285 pp.
- Agusti, S.; Phlips, E.J. Light absorption by cyanobacteria: implications of the colonial growth form. **Limnology and oceanography**, **37**(2):434-441, 1992.
- Beltrão, M.I. **O cultivo de *Chlorella* sp.** São Carlos, set. 1990. Comunicação pessoal.
- Bianchini Jr., I. **Estudo dos processos de humificação de *Nymphoides indica* (L.) O. Kuntze.** (Tese de Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1985. 285p.
- Bidigare, R.R.; Morrow, J.H.; Kiefer, D.A. Derivative analysis of espectral absorption by photosynthetic pigments in the western Sargasso Sea. **Journal of Marine Research**, **47**(2):323-341, 1989.
- Bowker, D.E.; Davis, R.E.; Myrick, D.L.; Stacy, K.; Jones, W.T. **Spectral reflectances of natural targets for use in remote sensing studies.** Washington, DC, NASA, 1985. (NASA RP-1139).
- Bowker, D.E.; Hardesty, C.A.; Jobson, D.J. **Remote sensing of sediment and chlorophyll with the Test Bed Aircraft Multispectral Scanner.** Washington, DC, Nasa, 1983. (NASA TM-84590).
- Bricaud, A.; Sathyendranath, S. Spectral signatures of substances responsible for the change in ocean color. In: Guyot, G.; Verbrugghe, M. ed., **Colloque International on signatures Spectrales d'Objets en Télédétection.** Avignon, Sept. 8-11, 1981, p. 41-55.
- Bukata, R.P.; Bruton, J.E.; Jerome, J.H. Use of chromaticity in remote measurements of water quality. **Remote Sensing of Environment**, **13**(2):161-177, 1983.

- Bukata, R.P.; Jerome, J.H.; Bruton, J.E. Particulate concentrations in lake St. Clair as recorded by a Shipborne Multispectral Optical Monitoring System. **Remote Sensing of Environment**, 25(2):201-229, 1988.
- Cabral, A.P.; Mantovani, J.E.; Costa, M.P.F.; De Lima, R.F.; Novo, E.M.L.M. Efeitos da concentração e da granulometria na assinatura espectral do material particulado inorgânico em suspensão. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4., Manaus, Jun. 24-29, 1990. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1990, v. 2, p. 496-504.
- Calijuri, M.C. **Respostas fisioecológicas da comunidade fitoplanctônica e fatores ecológicos em ecossistemas com diferentes estágios de eutrofização**. (Tese de Doutorado) -Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 1988. 293 p.
- Calijuri, M.do C.; Tundisi, J.G.; Saggio, A.A. Um modelo de avaliação do comportamento fotossintético para populações de fitoplâncton natural. **Revista Brasileira de Biologia**, 42(4):969-977, 1989.
- Carder, K.L.; Steward, Paul, J.H.; 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.
- Carder, K.L.; Steward, R.G.; Harvey, G.R.; Ortner, P.B. Marine humic and fulvic acids: their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. **Limnology and Oceanography**, 34(1):68-81, 1989.
- 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(3):1119-1121, 1970.
- Collins, M.; Pattiaratchi, C. Identification of suspended sediment in coastal waters using airborne thematic mapper data. **International Journal on Remote Sensing**, 5(4):635-657, 1984.

- Curran, P.J.; Novo, E.M.L.M. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. **Journal of Coastal Research**, 4(3):351-368, 1988.
- Davies-Colley, R.J.; Vant, W.N. Absorption of light by yellow substance in freshwater lakes. **Limnology and Oceanography**, 32(2):416-425, 1987.
- Deering, D.W. Field measurements of bidirectional reflectance. In: Asrar, G. ed. **Theory and applications of the optical remote sensing**. New York, John Willey & Sons, 1989. Cap. 2, p. 14-65.
- Dekker, A.G.; Malthus, T.J.; Wijnen, M.M.; Seyhan, E. The effect of spectral bandwidth and positioning on the spectral signature analysis of inland waters. **Remote Sensing of Environment**, 41(2/3):211-225, 1992.
- Duntley, S.Q. Light in the sea. **Journal of Optical Society of America**, 53(2):214-233, 1963.
- Dupoy, C.; Petit, M.; Dandonneau, Y. Satellite detected cyanobacteria bloom in the southwestern tropical Pacific: implication for oceanic nitrogen fixation. **International Journal of Remote Sensing**, 9(3):389-396, 1988.
- Dutra, L.V.; Ii, F.A.M.; Mascarenhas, N.D.A. **Evaluation of entropy and JM-Distance criterions as feature selection methods using spectral and spatial features derived from Landsat images**. São José dos Campos, INPE, 1984. (INPE-3122-PRE/515).
- Ertel, J.R.; Hedges, J.I.; Devol, A.H.; Richey, J.E. Dissolved humic substances of the Amazon River system. **Limnology and Oceanography**, 31(4):739-754, 1986.
- Esteves, F.A. **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro, Interciência/FINEP, 1988. 575p.
- Exton, R.J.; Houghton, W.M. LASER remote sensing of marine sediment load and algal pigments. In: Chesapeake Bay Plume Study: Superflux 1980; Williamsburg, VA, Jan. 21-23, 1981. **Proceedings**. Washington, DC, NASA, 1981, p. 339-347. (NASA CP-2188).

- Farmer, F.H. Interpretation of an index of phytoplankton population composition calculated from remote airborne fluorosensor (RAF) data. In: Chesapeake Bay Plume Study: Superflux 1980; Williansburg, VA, Jan. 21-23, 1981. **Proceedings**. Washington, DC, NASA, 1981, p. 429-437. (NASA CP-2188).
- Fogg, G.E. **Algal cultures and phytoplankton ecology**. 2. ed., s.l., University of Wisconsin, 1975. 175p.
- Gitelson, A. The peak near 700nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. **International Journal of Remote Sensing**, 13(17):3367-3373, 1992.
- Golterman, H.L.; Clymo, R.S. Ohnstad, M.A.M. **Methods for physical and chemical analysis of fresh waters**. 2. ed. Oxford, Blackwell Scientific, 1978. 214p. (IBP Handbook, 12).
- Gordon, H.R.; Morel, A.Y. **Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review**. New York, Springer-Verlag, 1983. (Lectures notes on coastal and estuarine studies, 4).
- Govone, S.H. **O cultivo de *Chlorella* sp.** São Carlos, set. 1990. Comunicação Pessoal.
- Guillard, R.R.E.; Lorenzen, C.J. Yellow green algae with chlorophyll c. **Journal physical**, 8(1):10-14, 1972.
- Harris, G.P. **Phytoplankton ecology**. Chapman & Hall, London, 1986. 384 p.
- Hino, K.; Tundisi, J.G. **Atlas de algas da represa do Broa**. 2 ed., São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, 1984. (Série Atlas, 2).
- Hoge, F.E.; Swift, R.N. Application of the NASA airborne oceanographic LIDAR to the mapping of chlorophyll and other organic pigments. In: Chesapeake Bay Plume Study: Superflux 1980; Williansburg, VA, Jan. 21-23, 1981. **Proceedings**. Washington, DC, NASA, 1981, p. 349-374. (NASA CP-2188).

- Hovis, W.A. Remote sensing of water quality. In: Application of Remote Sensing to the Chesapeake Bay Region; Berkeley Springs, Apr. 12-15, 1977. **Proceedings**. Washington, DC, NASA, 1977. (NASA CR-6).
- Hunt, G.R.; Ashley, R.P. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. **Economic Geology**, 74(7):1613-1629, 1979.
- Jeffrey, S.W.; Humphrey, G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, c_1 and c_2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. **Biochem. Physiol. Pflanzen**, 167:191-194, 1975.
- Jerlov, N.G. **Marine Optics**. Amsterdam, Elsevier, 1976. 231p. (Elsevier Oceanography Series, 14).
- **Optical oceanography**. Amsterdam, Elsevier, 1968. 194p.
- Kampf, N. O ferro no solo. In: Reunião sobre Ferro em Solos Inundados, 1., Goiânia, 1987. **Anais**. [Goiânia], EMBRAPA-CNPDAF, 1988. p. 35-71. (Documentos, 22).
- Kirk, J.T.O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. 2. ed., Cambridge, Cambridge University Press, 1986. 401p.
- Lee, C.M. Practical aspects of aquatic toxicology. In: Workshop sobre O Desenvolvimento de Técnicas em Toxicidade Aquática, São Paulo, 20 set. - 08 out., 1982. **Proceedings**. São Paulo, CETESB, 1982.
- Lewis, M.R.; Cullen, J.J.; Platt, T. Relationships between vertical mixing and photoadaptation of phytoplankton: similarity criteria. **Marine Ecology - Progress Series**, 15:141-149, 1984.
- Mantovani, J.E.; Cabral, A.P. Tank depth determination for water radiometric measurements, **International Journal of Remote Sensing**, 13(14):2727-2733, 1992.
- Maul, G.A. **Introduction to satellite oceanography**. Dorbrecht, Martinus Nijhoff, 1985. 606p.

- McCluney, W.R. Remote measurement of water color. **Remote Sensing of Environment**, 5(1):3-33, 1976.
- Megard, R.O.; Berman, T. Effects of algae on the secchi transparency of the southeastern Mediterranean sea. **Limnology and Oceanography**, 34(8):1640-1655, 1989.
- Mertens, L.E. **In-water photography**. New York, John Willey & Sons, 1970. 391p.
- Menezes, P.R. **Avaliação e seleção de bandas do TM**. (Tese de Doutorado) - Instituto de Biociências - USP, São Paulo, 1986. 233 p.
- Milton, C. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, 8(12):1807-1827, 1987.
- Mobley, C.D. The optical properties of water. Handbook of optics, 2 ed., McGraw-Hill, 1993. (in press)
- Morel, A.; Prieur, L. Analysis of variations in ocean color. **Limnology and Oceanography**, 22(4):709-722, 1977.
- NASA. **HIRIS High-resolution imaging spectrometer: science opportunities for the 1990s**. Washington, D.C., 1987. V. 2c.
- Nassau, K. The causes of color. **Scientific American**, 243(4):124-154, 1980.
- Nicodemus, F.E.; Richmond, J.C.; Hsia, J.J.; Ginsberg, I.W.; Limperis, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. Washington, National Bureau of Standards, 1977. 52 p. (NBS MN-160).
- Novo, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo, Edgard Blücher, 1989. 269p.
- Novo, E.M.L.M. **High resolution spectrometry for water components assessment: A research proposal**. JPL/NASA, Pasadena, 1992.

- Novo, E.M.L.M.; Godoy Jr, M. Multiviewing linear models for estimating suspended sediment concentration (SSC) from remotely sensed data. In: Congress of the International Society on Photogrammetry and Remote Sensing, 16., Kyoto, 1988. **Proceedings**. Kyoto, ISPRS Comission 7, v. 27, tomo B7, 1989. p. 396-404.
- Novo, E.M.L.M.; Godoy Jr., M. **Eutrophication assesment through remote sensing techniques**. São José dos Campos, INPE, 1989. (INPE-4932-PRE/1422).
- Novo, E.M.L.M.; Hanson, J.D.; Curran, P.J. The effect of viewing geometry and wavelenght on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, 10(8):1357-1372, 1989a.
- . The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, 10(7):1283-1289, 1989b.
- Novo, E.M.L.M.; Tundisi, J.G. **A represa de Barra Bonita**. São José dos Campos, Set. 1990. Comunicação pessoal.
- . Sensoriamento remoto de águas interiores: perspectivas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5., Natal, 1988. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1988, v. 1, p. 13-21.
- Oades, J.M. Colour and turbidity in water. In: Symposium on the Prediction in Water Quality, Camberra, Nov. 30-2 Dec., 1982. **Proceedings**. Camberra, Australian Academy of Science, 1982, p. 159-180.
- Ochiai, S.; Hase, E. Studies on chlorophyll formation *Chlorella protothecoids* I. Enhancing effects of light and added o-aminolevulinic acid, and supressive effect of glucose on chlorophyll formation. **Plant & Cell Physiology**, 11:663-673, 1970.
- Parsons, T.R.; Maita, Y.; Lalli, C.M. **A manual of chemical and biological methods for seawater analysis**. Oxford, Pergamon, 1984. 173 p.

- Rai, H. The measurement of photosynthetic pigments in freshwaters and standardization of methods. In: Proceedings of the Workshop held at Plon, W. Germany, 28-29 July, 1978.
- Richards, J.A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction.** Berlin, Springer-Verlag, 1986. 281p.
- Richardson, L.L.; Bachoon, D.; Ingram-Willey, V.; Chow, C.C.; Weinstock, K. Remote Sensing of the biological dynamics of large-scale salt evaporation ponds. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 24., Rio de Janeiro, May 27-31, 1991. **Proceedings.** Ann Arbor, ERIM, 1992. v.2. p. 611-623.
- 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.; Wilson, R.B.; May, J. Sun angle, reflected solar radiation and suspended sediments in north Mississippi reservoirs. In: Shaharokhi, F., ed., **Remote sensing of earth resources.** Tullahoma, University of Tennessee, 1974. p. 555-563.
- Robinson, I.S. **Satellite oceanography.** Chichester, Ellis Horwood, 1985. 455p.
- Round, F.E. **Biologia das algas.** [Biology of algae]. 2 ed., Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1983. 263p.
- Sathyendranath, S.; Prieur, L.; Morel, A. A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters. **International Journal of Remote Sensing**, 10(8):1373-1394, 1989.
- Schiebe, F.R.; Ritchie, J.C. Color measurements and suspended sediments in North Mississippi reservoirs. In: Shaharokhi, F., ed., **Remote sensing of earth resources.** Tullahoma, University of Tennessee, 1974. p. 543-554.

- Shu, S.; Chen, J. A new method to measure chlorophyll concentration in different depth water using spectroradiometer. In: IGARS'87 Symposium, Ann Arbor, May 18-21, 1987. **Proceedings**. New York, IEEE, 1987. v.2. p. 1589-1594.
- Slater, P.N. **Remote sensing, optics and optical systems**. Reading, Addison-Wesley, 1980. 575p.
- Smith, R.C.; Baker, K.S. Optical classification of natural waters. **Limnology and Oceanography**, 23(2):260-267, 1978.
- Steeman-Nielsen, E. **Marine photosynthesis**. New York, Elsevier, 1975. (Oceanography series, 13).
- Steemann-Nielsen, E. Chlorophyll concentration and rate of photosynthesis in *Chlorella vulgaris*. **Physiologia Plantarum**, 14:868-876, 1961.
- Steemann-Nielsen, E. Inactivation of the photochemical mechanism in photosynthesis as a means to protect the cells against too high light intensities. **Physiologia Plantarum**, 15:161-171, 1962.
- Steffen, C.A. **Sobre o cone refletor da fonte de luz..** São José dos Campos, 1993. Comunicação pessoal.
- Sturm, B. Optical properties of water-applications of remote sensing to water quality determination. In: Frayse, G. ed., **Remote sensing applications in agriculture and hidrology**. Rotterdam, Balkema, 1980. p. 471-495.
- Swain, P.H.; Davis, S.M., ed. **Remote sensing: the quantitative approach**. New York, McGraw-Hill, 1978. 396p.
- Sydor, M. Remote sensing of particulate concentrations in water. **Applied Optics**, 19(16):2794-2800, 1980.
- Szekielda, K.H. **Satellite monitoring of the Earth**. New York, John Wiley & Sons, 1988. 326p.

- Timofeeva, V.A. Optics of turbid waters. In: Jerlov, N.G.; Steeman-Nielsen, E.S. ed., **Optical aspects of oceanography**. London, Academic, 1974. cap. 9, p. 177-219.
- Toledo, A.P.P.de Relações entre o humus do solo e do ambiente aquático. In: Colóquio Regional sobre Matéria orgânica do solo. **Anais**. São Carlos, Departamento de química, Universidade Federal de São Carlos, s.d.. p. 29-34.
- Topliss, B.J. Ocean colour imagery: an investigation of some water-related parameters influencing algorithm development and data product interpretation. **Canadian Journal of Remote Sensing**, **15**(1):56-67, 1989.
- Vertucci, F.A.; Likens, G.E. Spectral reflectance and water quality of Adirondack mountain region lakes. **Limnology and Oceanography**, **34**(8):1656-1672, 1989.
- Vieira, A. **O cultivo de Chlorella**. São Carlos, S.P., 1991. Comunicação pessoal.
- Vollenweider, R.A. ed. **A manual on methods for measuring primary production in aquatic environments**. 2 ed., London, Blackwell, 1974. 225p. (IBP Handbook, 12).
- Weidemann, A.D.; Bannister, T.T. Absorption and scattering coefficients in Irondequoit Bay. **Limnology and Oceanography**, **31**(3):567-583, 1986.
- Wetzel, R.G. **Limnology**. Philadelphia, W.B. Saunders, 1975. 743p.
- Whitlock, C.H.; Usry, J.W.; Witte, W.G.; Gurganus, E.A. **Laboratory measurements of upwell radiance and reflectance spectra of calvert, ball, Jordan and feldspar soil sediments**. Washington, DC, NASA, 1977. (NASA TP-1039).
- Witte, W.G.; Whitlock, C.H.; Harriss, R.C.; Usry, J.W.; Poole, L.R.; Houghton, W.M.; Morris, W.D.; Gurganus, E.A. Influence of dissolved organic materials on turbid water optical properties and remote sensing reflectance. **Journal of Geophysical Research**, **87**(c1):441-446, 1982.

- Witte, W.G.; Whitlock, C.H.; Usry, J.W.; Morris, W.D.; Gurganus, E.A. **Laboratory measurements of physical, chemical, and optical characteristics of Lake Chicot sediment waters.** Washington, DC, NASA, 1981. (NASA TP-1941).
- Yentsch, C.S. Light attenuation and phytoplankton photosynthesis. In: **The physiological ecology of phytoplankton.** Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1980. Cap. 3, 95-127.
- Yentsch, C.S.; Yentsch, C.M. Fluorescence spectral signatures: the characterization of phytoplankton populations by the use of excitation and emission spectra. **Journal of Marine Research**, 37(3):471-483, 1979.