

Avanços no estudo do comportamento espectral do fitoplâncton e identificação remota de algas

Luciana de Resende Londe ¹
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo ¹
Maria do Carmo Calijuri ²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{luciana, evlyn}@ltid.inpe.br

²Universidade de São Paulo - USP/Escola de Engenharia de São Carlos
Caixa Postal 359 - 13566-590 - São Carlos - SP, Brasil
calijuri@sc.usp.br

Abstract. Algae is a strong indicator of alterations in water quality status. Algae studies can benefit from new remote sensing techniques. Hyperspectral sensors, for instance, can be potentially used for discriminating different algae populations by detecting accessory pigment signatures. Methods for processing hyperspectral data have been developed, such as derivative analyses, continuum removal and the spectral angle mapper. These advances brought about the identification of algae groups, such as cyanobacteria and dinoflagellates. In spite of the advances there is still a need for an increased knowledge on the spectral behaviour of other algae groups in order to establish a spectral library for remote phytoplankton identification.

Palavras-chave: remote sensing, hyperspectral data, algae identification, sensoriamento remoto, dados hiperespectrais, identificação de algas.

1. Introdução

Tem sido crescente a demanda, por parte da sociedade, de informações relativas às possíveis conseqüências de ações antrópicas sobre ecossistemas aquáticos, bem como informações sobre grupos de algas indicadoras da qualidade da água.

Um dos objetivos dos profissionais que atuam em manejo de lagos e reservatórios é controlar os crescimentos de espécies de algas potencialmente tóxicas, como as cianobactérias, que produzem toxinas consideradas um risco à saúde pública (Millie et al, 1992; Pitois et al, 2001; Vincent, 2004). Outro problema relacionado à presença de algas é a eutrofização de lagos e reservatórios, com impactos como a mortandade de peixes e conseqüentes problemas à indústria pesqueira, ao turismo e ao uso da água para irrigação (Jernakoff, 1997).

Mas os estudos sobre algas não estão limitados aos problemas que estas podem causar. Os gêneros *Emiliana sp* e *Trichodesmium sp*, por exemplo, podem fornecer informações importantes para o balanço do carbono e do nitrogênio globais (Weaver e Wrigley, 1994).

No Brasil, a Sociedade Brasileira de Limnologia, através da publicação “Limnotemas” (Bozelli e Huszar, 2003), ressalta a escassez de estudos sobre o fitoplâncton tropical e a necessidade de avanços quanto à representatividade das amostras coletadas, para o reconhecimento de padrões espaciais e temporais. (Bozelli e Huszar, 2003).

É possível contribuir para estes estudos em escalas temporais e espaciais adequadas através de técnicas de sensoriamento remoto, e, mais especificamente, com o uso do sensoriamento remoto hiperespectral para os estudos relacionados à identificação das algas presentes em um determinado corpo d'água.

2. Base teórica sobre algas e pigmentos

O termo “alga”, apesar de popular, não corresponde a uma categoria taxonômica, mas apenas a um coletivo que é costumeiramente usado para designar uma gama muito ampla de organismos, que, na realidade, têm pouca coisa em comum (Oliveira, 2003). Este coletivo abrange ampla variabilidade morfológica, estrutural e metabólica, incluindo até grupos procarióticos¹. A maior parte destes seres vive na água, de forma livre, fazendo parte do fitoplâncton, isto é, organismos fotossintetizantes que flutuam nos corpos d’água. Devido à sua eficiência fotossintética, formam a base da cadeia alimentar nos ecossistemas aquáticos e são responsáveis por cerca de 40 a 50 % da fixação de carbono e produção de oxigênio do planeta (Oliveira, 2003).

Tanto a fixação de carbono quanto a produção de oxigênio ocorrem devido à fotossíntese. Este mecanismo fisiológico ocorre devido à presença dos pigmentos fotossintéticos, que são moléculas que captam energia eletromagnética no intervalo de 400 a 700 nm (Kirk, 1993). Estes pigmentos são agrupados em três categorias: clorofilas, carotenóides e ficobiliproteínas (ou ficobilinas). (Richardson, 1996; Kirk, 1993; Weaver e Wrigley, 1994). A distribuição de clorofilas entre diferentes grupos de organismos está resumida na **Tabela 1**.

Tabela 1: Distribuição de pigmentos nos diferentes grupos de organismos que fazem fotossíntese e desprendem oxigênio (Adaptado de Oliveira, 2003 e Richardson, 1996)

	Clorofilas	Carotenóides além do β -caroteno	Ficobilinas	Cor predominante
Cyanophyta	a	Flavicina, Zeaxantina, Oxilaxantina, Myxoxantofila	aloficocianina, ficocianina, ficoeritrina	verde-azul
Prochlorophyta	a, b		-	verde
Rhodophyta	a, d	α -caroteno	aloficocianina, ficocianina, ficoeritrina	vermelha
Fucophyceae	a, c,	Luteína	-	marrom
Bacillariophyceae	a, c	Fucoxantina	-	dourada
Dinophyta	a, c	Peridinina	-	marrom
Chlorophyta	a, b	Luteína, Sifonoxantina	-	verde
Euglenophyta	a, b	Sifonoxantina	-	verde
Plantas terrestres	a, b	-	-	verde

Entre estes pigmentos, o principal responsável pela absorção de energia luminosa é a clorofila. A clorofila-a funciona também como centro de reação fotossintética e possui dois picos de absorção: um no azul (em 433 nm, chamado "Soret") e outro no vermelho (em 686 nm, chamado pico "alpha") (Kirk, 1993, Richardson, 1996). A clorofila-a absorve fracamente entre 450 e 650 nm e a clorofila-b tem o efeito de aumentar a absorção dentro desta janela, tanto para o lado dos comprimentos de onda mais longos quanto para os mais curtos (Kirk, 1993).

Em contraste com o pequeno número de clorofilas, existem mais de 60 tipos de carotenóides, quase todos com a função primária de fotoproteção. Todos eles absorvem

¹ Os seres procariontes são formados por células sem núcleo individualizado (sem presença de cariomembrana). O material nuclear, mostra-se disperso no citoplasma (Soares, 1998).

fortemente a energia na mesma área do espectro eletro-magnético (EEM) (do ultra-violeta ao azul), mas a forma do espectro de absorção de cada carotenóide é única. (Weaver e Wrigley, 1994; Richardson, 1996).

Enquanto alguns carotenóides, como o beta-caroteno, são facilmente encontrados nas células, outros são diagnósticos para certos grupos: a peridininina ocorre apenas nos dinoflagelados e a fucoxantina está restrita às diatomáceas e crisófitas (Kirk, 1993).

A fucoxantina e a peridininina são os carotenóides dominantes nas algas que os contêm e mostram nos espectros "in vivo" como um ombro principal na região entre 500 e 560 nm. Já a sifonaxantina mostra um pico por volta de 540 nm no espectro *in vivo* (Kirk, 1993).

Algumas classes algais, que não contêm biliproteínas, dependem fortemente dos carotenóides para capturar luz. Já as cianobactérias e algas vermelhas possuem esta terceira classe de pigmentos, as biliproteínas (ou ficobilinas), que funcionam como pigmentos acessórios de cor vermelha ou azul (Kirk, 1993). Ao contrário das clorofilas e carotenóides, de natureza lipídica, as ficobilinas são hidrossolúveis. São altamente fluorescentes e absorvem luz na área do EEM que fica entre as áreas de absorção dos carotenóides e clorofilas. (Richardson, 1996).

Teoricamente, a maioria dos pigmentos citados pode ser detectada remotamente. Richardson (1996) assegura que pesquisas sobre as conexões quantitativas entre pigmentos acessórios, assinaturas espectrais e avaliação do ecossistema aquático pela detecção de pigmentos podem servir como fundamento para a nova geração de sensores orbitais.

3. Obtenção de dados por sensoriamento remoto

As medições através de sensores remotos vêm sendo usadas porque, além de oferecer boa cobertura espacial e temporal, podem facilitar a definição de localizações representativas para medições em barcos e possibilitar a inclusão de um número maior de lagos e reservatórios em programas de monitoramento da qualidade da água.

Apesar destas vantagens, há poucos trabalhos sobre a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto para o estudo de águas interiores, em comparação a outros tipos de ecossistemas.

Östlund et al (2001) observaram que sistemas como o CZCS e o SeaWiFS foram configurados para a observação de mar aberto, mas teriam utilidade limitada para o estudo de sistemas aquáticos continentais, exceto grandes lagos. Östlund et al (2001) também citam como problemas no monitoramento orbital da água a resolução espectral limitada dos sensores e o fato de que a maioria dos sistemas de sensoriamento remoto de alta resolução espacial é dedicada a aplicações terrestres, cujos sensores não possuem resolução espectral e número de bandas adequados à caracterização dos componentes da água.

Koponen et al (2002) ressaltam a baixa resolução espacial como uma das limitações dos sensores orbitais, visto que esta aumenta a dificuldade de definição de parâmetros limnológicos. Como os lagos estudados por eles incluem pequenas ilhas, são pequenos e têm formato irregular, a radiação refletida pelas margens e sua vegetação é mais forte do que a radiação da água. Se uma porção de um pixel, mesmo que pequena, for coberta por terra, isto pode impossibilitar a caracterização de variáveis de qualidade da água (Koponen et al 2002).

De acordo com Vincent et al (2004), a vantagem de satélites como o "Coastal Zone Color Scanner" (CZCS), o "Airborne Ocean Color Imager" (AOCI) e o "Sea-viewing Wide Field Sensor" (SeaWiFS) é que eles têm mais bandas espectrais que o TM e podem cobrir a lacuna entre as bandas do verde e do vermelho (2 e 3) do TM. A **Figura 1** mostra a importância desta região para a detecção de ficocianina. Por outro lado, o sensor TM apresenta como vantagem a resolução espacial de 28,5 m, que é ideal para lagos e zonas costeiras, difíceis de estudar com a resolução espacial de 1 Km do CZCS e SeaWiFS (Vincent et al, 2004).

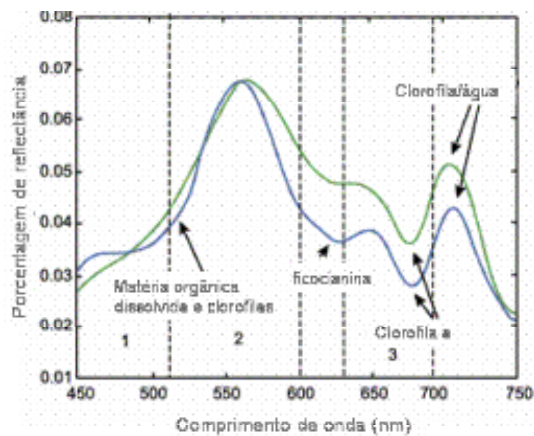


Figura 1: Feições de absorção de um lago contendo clorofila a (curva superior) e de outro contendo clorofila-a e ficocianina (curva inferior). As barras verticais mostram os limites das bandas 1, 2 e 3 do sensor Landsat/TM. (Fonte: Vincent et al, 2004).

Estudos realizados com sensores aerotransportados ou baseados em simulações em campo e laboratório sugerem que os sensores hiperespectrais têm o potencial de fornecer informações sobre populações de algas a partir da detecção de pigmentos espectralmente isolados (Richardson, 1996). A pesquisadora ressalta a necessidade do desenvolvimento de métodos para interpretar a vasta quantidade de espectros que estes sensores fornecem.

4. Análise de dados hiperespectrais

A disponibilidade de tecnologias de sensoriamento remoto com alta resolução espacial e espectral tem crescido muito nos últimos anos. Isto motiva o desenvolvimento de métodos de interpretação da vasta quantidade de espectros que os sensores hiperespectrais fornecem. A análise de dados hiperespectrais é diferente da empregada para multiespectrais, porque a cobertura espectral de alta resolução permite um tratamento determinístico da extração da informação, em vez das abordagens estatísticas mais tradicionais desenvolvidas para dados multiespectrais (Vane e Goetz, 1993).

4.1. Análise derivativa

A análise derivativa de espectros de reflectância tem sido usada em dados hiperespectrais para eliminar sinais de fundo, resolver feições espectrais sobrepostas e melhorar o contraste espectral, aumentando, deste modo, a acurácia da estimativa da informação sobre o alvo (Zhang et al, 2004).

Neste tipo de análise, a concentração de determinada substância é relacionada com a derivada da reflectância em relação ao comprimento de onda, em vez de se usar a correlação direta com a reflectância (Chen et al., 1992).

A análise derivativa, portanto, pode ser útil para ressaltar as regiões em que a curva espectral apresenta mudanças bruscas de comportamento devido à presença de componentes que favorecem a absorção ou o espalhamento pelo alvo (Carvalho, 2003).

4.2. Remoção do Contínuo

Outra técnica empregada no sensoriamento remoto hiperespectral é a remoção do contínuo, usada para isolar uma feição de absorção particular para análise de um espectro. Nesta técnica, os pontos de máxima reflectância de um espectro são ligados por uma reta, a qual define o contínuo espectral para cada feição. A sua remoção é feita dividindo-se o espectro

original pela curva do contínuo, para normalizar as bandas de absorção, colocando-as em uma referência comum (Clark e Roush., 1984)

O contínuo representa a absorção em um material específico ou o efeito conjunto da absorção de diferentes materiais presentes em uma determinada amostra (Clark e Roush, 1984). Esta técnica, portanto, permite que se remova o componente do sinal causado por substâncias que não estão sendo estudadas, mas que estão presentes na amostra.

4.3. Mapeamento por ângulo espectral

O mapeamento por ângulo espectral é um algoritmo que determina semelhanças em curvas espectrais e espectros de referência, cujas propriedades óticas são previamente conhecidas. O método tem como base o cálculo do ângulo geométrico entre as duas curvas espectrais, tratando-as como vetores. O tratamento computacional consiste em medir o arco-coseno dos espectros. Cada amostra pertencerá à classe cuja distância em relação ao espectro de referência for mínima. Entretanto, o desempenho do algoritmo depende diretamente da escolha do conjunto de dados de treinamento (espectros de referência), o que dificulta o seu uso para análise de águas continentais, ainda sem bibliotecas espectrais estabelecidas (Kruse, 2003; Carvalho, 2003).

5. Relação entre a identificação de algas e o sensoriamento remoto

5.1. Identificação de pigmentos através da assinatura espectral

O estudo de algas com o auxílio de técnicas de sensoriamento remoto teve início com tentativas de detecção de clorofila-a, o pigmento comum a todos os tipos de algas (e portanto indicador da presença de populações fitoplânctônicas) e também parâmetro de quantificação de biomassa.

As pesquisas com o objetivo de identificar clorofila-a foram o passo inicial para que o interesse fosse ampliado e passasse a incluir outros pigmentos. Como estes estão presentes em diferentes proporções nos vários grupos algais, foi criada a hipótese de que a identificação dos pigmentos presentes em maior quantidade em um corpo d'água possibilitaria a identificação dos organismos aos quais estes pigmentos estão relacionados (Bold e Wynne, 1985; Quibell, 1992).

Para classificar os pigmentos, a etapa inicial seria estabelecer uma "biblioteca espectral", um conjunto de espectros de diferentes grupos de algas, que serviria de referência para a etapa seguinte: a identificação do fitoplâncton via satélite.

Ainda há muito a ser feito para a montagem de uma biblioteca espectral. Há uma grande diversidade de pigmentos a ser explorada. No conjunto das clorofilas, por exemplo, além das clorofilas a e b, há todo o conjunto de clorofilas-c, que diferem de 5 a 8 nm em sua absorção no azul.

Alguns pigmentos já tiveram seus espectros determinados em laboratório e podem fornecer informações importantes sobre feições de absorção diagnósticas. Sabe-se, por exemplo, que os florescimentos de *Phaeocystis* têm clorofila c3 e que as diatomáceas têm clorofilas c1 e c2 (Weaver e Wrigley, 1994). A **Figura 2-A** mostra de maneira geral os espectros das clorofilas e carotenóides.

As cianobactérias possuem pigmentos que as distinguem da maioria das algas eucarióticas (**Figura 2-B**). Já as proclorófitas contêm clorofila-b, mas não possuem as ficobilinas características das cianobactérias. Possuem também a banda "Soret" deslocada de 8 a 10 nm para a região do vermelho. Esta combinação de pigmentos, de acordo com Weaver e Wrigley (1994), seria suficiente para mapear estas algas por sensoriamento remoto.

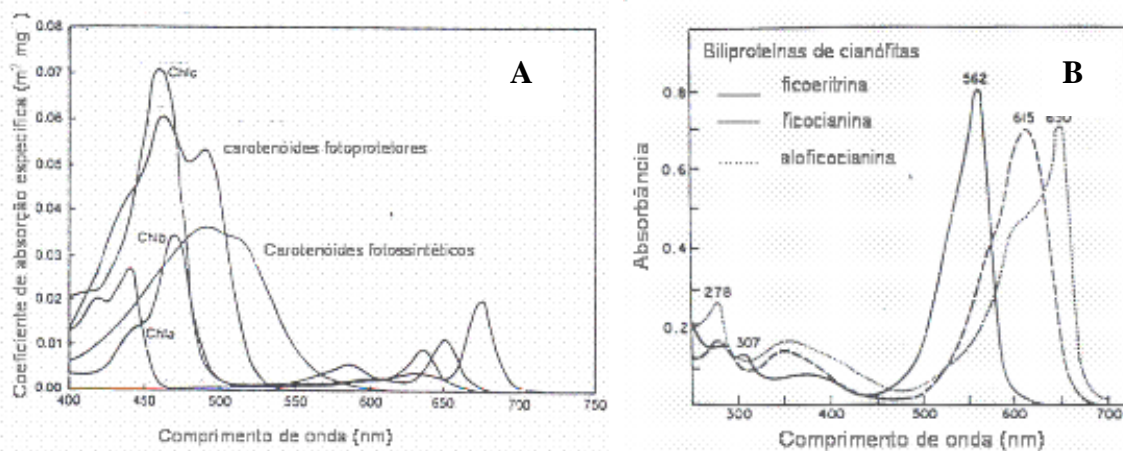


Figura 2: A: Espectros de absorção dos principais grupos de pigmentos. B: Espectros de absorção de biliproteínas de cianobactérias (Fonte: Weaver e Wrigley, 1994).

O gênero *Trichodesmium* tem sido um dos mais estudados no grupo das cianobactérias, devido à sua importância no balanço de carbono e nitrogênio da superfície oceânica (Tassan, 1995). Em seu espectro de absorção há um pico proeminente em 493 nm, característico da ficourobilina, além de dois picos menores em 627 nm e 567 nm (Weaver e Wrigley, 1994).

Tassan (1995) desenvolveu um algoritmo para detecção de *Trichodesmium*, através do sensor SeaWiFS, mas reconhece que a discriminação da biliproteína ficoeritrina não possibilita a distinção entre *Trichodesmium* e outras cianobactérias, como *Synechococcus*. Este fato demonstra que a identificação de algas por sensoriamento remoto já é possível para determinados grupos, mas ainda é um procedimento complexo para a distinção de gêneros.

Outro grupo de algas que teve seus pigmentos estudados foi o dos dinoflagelados, responsáveis pelas marés vermelhas e marrons. Sua cor é causada por carotenóides específicos e há dominância de clorofila c3 (Weaver e Wrigley, 1994).

A classe Prymnesiophyceae, além de ter a clorofila c2 como dominante, apresenta clorofila c3, fucoxantina e um carotenóide responsável por um ombro característico em 470 nm no espectro de absorção. (Weaver e Wrigley, 1994).

Hooligan et al (1983) fizeram a primeira relação entre a presença de *Emiliana huxleyi* (espécie da classe Prymnesiophyceae) e áreas brilhantes em imagens CZCS. Em seguida, Ackleson (1990) monitorou o desenvolvimento de um florescimento da mesma espécie com imagens AVHRR (Weaver e Wrigley, 1994) e Brown e Podestá (1997) usaram imagens CZCS, NOAA e AVHRR para detecção de *E. huxleyi* no sudoeste do Oceano Atlântico.

A distinção *E. huxleyi*, portanto, é possível, porém Brown e Podestá (1997) alertam que florescimentos de cianobactérias como *Trichodesmium* poderiam imitar sua assinatura espectral. Para afirmações precisas, seria mais confiável usar dados hiperespectrais para identificar feições, através de técnicas de comparação de espectros, por exemplo. O sensoriamento remoto hiperespectral seria mais confiável para uso em escala global.

É importante ressaltar que algas como *Trichodesmium* e *E. huxleyi* são típicas de ambientes marinhos. Embora muito possa ser aprendido pela aplicação do sensoriamento remoto para estudos oceânicos (águas de caso I), as diferenças nas propriedades ópticas das águas interiores devem ser consideradas. Enquanto a clorofila é o principal constituinte responsável pelas variações temporais e espaciais no espectro de reflectância de águas oceânicas, as águas interiores geralmente contêm quantidades de carbono orgânico dissolvido

e matéria particulada inorgânica que dificultam a interpretação do espectro de reflectância. Além disso, a combinação destes fatores varia regionalmente para águas interiores (Arenz Jr et al, 1996, Östlund et al 2001).

5.2. Relação entre o tamanho das algas e a resposta espectral

Ciotti et al (2002) verificaram que, especificando-se o tamanho da célula do organismo dominante (pico, ultra, nano ou micropâncton), pode-se explicar em mais de 80% a variabilidade na forma espectral do coeficiente de absorção do fitoplâncton, entre 400 e 700 nm (Ciotti et al, 2002). Isto é o resultado da forte covariância entre o tamanho dos organismos dominantes e vários fatores como o empacotamento de pigmentos e a concentração de pigmentos acessórios.

Ciotti et al (2002) também afirmam que a composição das comunidades fitoplanctônicas pode ser relacionada ao estado trófico do corpo d'água em estudo. Em ambientes oligotróficos, a biomassa é dominada por células pequenas, com pigmentação característica, como algumas clorófitas e cianobactérias (Ciotti et al, 2002). Sob condições de abundância de nutrientes (ambientes eutróficos), as células maiores podem competir por alimento e dominar o ambiente (Ciotti et al, 2002). Segundo Calijuri et al. (2002), além da disponibilidade de nutrientes deve-se considerar a turbulência da coluna de água como fator determinante ao crescimento do fitoplâncton e, principalmente, na dominância de células maiores como algumas cianobactérias e diatomáceas.

6. Conclusão

As técnicas de sensoriamento remoto hiperespectral são uma ferramenta útil para o estudo de algas, e, conseqüentemente, para o monitoramento de ecossistemas aquáticos e para a modelagem do clima global.

Os avanços na correlação dos principais grupos taxonômicos com pigmentos acessórios característicos abriram a possibilidade de detecção destes pigmentos através de suas assinaturas espectrais. Várias técnicas podem ser aplicadas nestes estudos, como a análise derivativa, a remoção do contínuo e o mapeamento por ângulo espectral.

Houve progresso na identificação por sensoriamento remoto de alguns grupos algais, como cianobactérias e dinoflagelados, mas é necessário ampliar as informações disponíveis sobre estes e outros grupos para que se possa estabelecer uma "biblioteca espectral" que sirva de referência para a identificação do fitoplâncton via satélite.

Referências

- Arenz Jr, R.F., Lewis, W.M., Saunders, J.F. Determination of chlorophyll and dissolved organic carbon from reflectance data for Colorado reservoirs. *International Journal of Remote Sensing*, v.17, n. 8, p.1547-1566, 1996.
- Ackleson, G. (1990) In: Weaver, E.C.; Wrigley, R. **Factors affecting the identification of phytoplankton groups by means of remote sensing**. Moffet Field: NASA, 1994. 121 p. (TM-108799).
- Bold, H.C.; Wynne, M.J. **Introduction to the algae**. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1985.
- Bozelli, R. L., Huszar, V. L. M. Comunidades Fito e zooplanctônicas continentais em tempo de avaliação. **Limnotemas**. Sociedade Brasileira de Limnologia, maio 2003.
- Brown, C.W.; Podestá, G.P. Remote sensing of coccolithophore blooms in the western south atlantic ocean. **Remote Sensing of Environment**, v. 60, p. 83-91, 1997.
- Calijuri, M. C., Dos Santos, A. C. A.; Jati, S. Temporal changes in the phytoplankton community structure in a tropical and eutrophic reservoir (Barra Bonita, SP – Brazil). **Journal of Plankton Research**, v.24, n.7, p.617-634, 2002.

- Callieri, C., Stockner, J.G. Freshwater autotrophic picoplankton: a review. **Journal of Limnology**, v. 61, n.1, p. 1-14, 2002.
- Carvalho, J.C.; Barbosa, C.; Novo, E.M.; Mantovani, J. E.; Melack, J.; Filho, W.P. Applications of Quantitative Analysis Techniques to Monitor Water Quality of Curuai Lake, Brazil. IGARSS-2003, July 21-25, France, 2003.
- Chen, Z.; Curran, P.J., Hansom, J.D. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. **Remote Sensing of Environment**, v. 40, p. 67-77, 1992.
- Ciotti, A.M.; Lewis, M.R.; Cullen, J.J. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient. **Limnology and Oceanography**, v. 47, n. 2, p. 404-417, 2002.
- Clark, R.N.; Roush, T.L. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, p. 6329-6340, 1984.
- Hooligan, P.M., Voillier, M., Harbour, D.S., Camus, P., Champagne-Phillippe. M. Satellite and ship studies of coccolithophore production along a continental shelf edge. **Nature**, v. 304, p. 339-342, 1983.
- Jernakoff, P.; Hick, P.; Ong, C.; Hosja, W.; Grigo, S. Mapping algal blooms using airborne digital multi-spectral video and the importance of bloom dynamics in the collection of in-water data. **Marine Technology Society Journal**, v. 30, p. 36-45, 1997.
- Kirk, J.T.O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- Koponen, S.; Pulliainen, J.; Kallio, K.; Hallikainen, M. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, n. 1, p. 51-59, jan. 2002.
- Kruse, F.A. Mineral mapping with AVIRIS and EO-1 Hyperion. In: 12th JPL Airborne Earth Science Workshop. **Anais**. Pasadena, California: NASA_JPL_ California Institute of Technology, abr. 2003. v. 04-6.
- Millie, D.F.; Baker, M.C.; Tucker, C.S.; Vinyard, B.T. and Dionigi, C. P. High-Resolution airborne remote sensing of bloom-forming phytoplankton. **Journal of Phycology**, v. 28, p. 281-290, 1992.
- Oliveira, E.C. **Introdução à Biologia Vegetal**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- Östlund, C.; Flink, P.; Strömbeck, N.; Pierson, D.; Lindell, T. Mapping of the water quality of Lake Erken, Sweden, from Imaging Spectrometry and Landsat Thematic Mapper. **The Science of the Total Environment**, v. 268, n. 1-3, p. 139-154, mar. 2001.
- Pitois, S., Jackson, M.H., Wood, B.J.B. Sources of the eutrophication problems associated with toxic algae: an overview. **Journal of environmental Health**, v. 64, n. 5, p. 25-32, dez. 2001.
- Quibell, G.; Estimating chlorophyll concentrations using upwelling radiance from different freshwater algal genera. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 14, p. 2611-2621, 1992.
- Richardson, L.L.; Remote Sensing of algal bloom dynamics; Neu research fuses remote sensing of aquatic ecosystems with algal accessory pigment analysis. **BioScience**, v. 46, n. 7, p. 492-501, 1996.
- Tassan, S.; SeaWiFS potential for remote sensing of marine Trichodesmium at sub-bloom concentration. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, n. 18, p. 3619-3627, dez. 1995.
- Vane, G.; Goetz, A.F.H.; Terrestrial Imaging Spectrometry: Current Status, Future Trends. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2/3, p. 117-126, jun. 1993.
- Vincent, R.K.; Qin, X., Michael, R., McKay, L., Miner, J., Czajkowski, K., Savino, J., Bridgeman, T. Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, p. 361-368, 2004.
- Weaver, E.C.; Wrigley, R. **Factors affecting the identification of phytoplankton groups by means of remote sensing**. Moffet Field: NASA, 1994. 121 p. (TM-108799).
- Zhang, J.; Rivard, B., Sanchez-Azofeifa, A. Derivative Spectral Unmixing of Hyperspectral Data Applied to Mixtures of Lichen and Rock. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 9, p. 1934-1940, set. 2004.