

DIFICULDADES NO USO DE DADOS ESPECTRAIS ORBITAIS PARA INFERIR OU  
ESTIMAR CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA EM ECOSISTEMAS LÊNTICOS  
TROPICAIS.

Marisa Dantas Bitencourt Pereira

Depto Ecologia Geral - IB USP

Caixa Postal 11461 CEP 05499-900 São Paulo-SP

**Abstract** There are many details about limnological parameters which may jeopardise the use of satellite images to estimate them. Two of the major factors affecting surface water quality, suspended sediments and chlorophylls, produce visible changes in reflected solar radiation. However, depending on the concentration, the mineral suspended sediments in the euphotic zone can mask completely the spectral response due to the chlorophyll. Another problem is the degradation products of the chlorophylls, the phaeophytins, which are structurally so similar to chlorophyll that absorb red light at the same wavelengths. Since both pigments occur in fresh water in variable amounts and from two different origins (autochthonous and allochthonous), it is impossible to determine the spectral influence of each pigment in the radiance registered by satellite. The intention of this paper is to meet some of these aspects in order to help decision-makers whether they should use or not satellite images to estimate limnological parameters like algal biomass and trophic state.

## Introdução

Desde a década de 70 que se tenta relacionar pigmentos fitoplanctônicos em suspensão na água com a reflectância registrada desde sensores fotográficos até sensores orbitais, como pode ser visto na revisão bibliográfica de Sausen-Pereira (1986).

No início, as dificuldades eram atribuídas aos sistemas sensores por não serem suficientemente sensíveis. Paralelamente, as vantagens oferecidas pelos sensores orbitais, no que tange a repetitividade e a espectralidade, motivaram os estudiosos na busca da melhor utilização destes dados para fins limnológicos, especialmente para estimar clorofila fitoplanctônica, que seria de grande valia dada as dificuldades dessa amostragem no campo.

Entretanto, algumas dificuldades têm se colocado no caminho desta possível aplicação. Algumas delas foram trazidas à discussão a partir de Bukata et alii (1983). Estes autores levantaram a influência espectral de cada um dos componentes de um corpo d'água separadamente. Nota-se que os pigmentos fitoplanctônicos têm uma resposta espectral muito tênue quando comparada às respostas dos outros elementos.

As peculiaridades dos pigmentos fitoplanctônicos encontrados nos ambientes lênticos tropicais, no que tange ao seu comportamento espectral, somadas às limitações dos sistemas sensores hoje disponíveis, fizeram despertar dúvidas sobre a viabilidade do uso destes dados na limnologia.

Apesar de haver na literatura trabalhos bem sucedidos de estimativa da clorofila fitoplanctônica através de imagens de satélite (Lathrop-Lillesand, 1986; 1989), a falta de discussão sobre alguns pontos deixaram dúvidas sobre a eficiência dos estimadores encontrados.

Por estas razões, fez-se um levantamento dos pontos discutíveis do uso de imagens de satélite na detecção de pigmentos fitoplanctônicos numa tentativa de auxiliar os futuros usuários destes dados na limnologia.

## Fundamentos

Do total de luz que chega na superfície da Terra entre 300 e 3000 nm, cerca da metade é utilizada pelos organismos autotróficos. A luz que incide sobre os corpos d'água se atenua rapidamente de conformidade com o coeficiente de extinção, que é função da absorção e do espalhamento por parte dos constituintes da água (Duntley, 1963; Smith-Baker, 1981; Dokulil,

1983; Kirk-Tyller, 1986; e Kirk, 1989).

De um corpo d'água o que se observa através dos diversos sensores remoto é a radiancia emergente resultante do espalhamento causado pelos elementos em suspensão na zona eufótica. Cerca de 90% do fluxo emergente de um corpo d'água é originado dentro do mesmo (Jerlov-Nielsen, 1968; e Kirk, 1983) pelo espalhamento provocado por todas as partículas presentes.

A turbidez é uma propriedade óptica relacionada exclusivamente à luz espalhada pelo material em suspensão e depende do comprimento de onda da radiação incidente e do tamanho, forma e natureza das partículas (Klooster-Scherz, 1974). Todo corpo d'água apresenta uma certa quantidade de particulado em suspensão que pode ser tanto inorgânica (como silte e argila) como orgânica (organismos planctônicos) conforme descreveu Schelley (1976). O plâncton, mais especificamente o fitoplâncton, constitui o segundo maior responsável pelo espalhamento da luz na água. Os primeiros são silte e argila (Ritchie et alii, 1976). Este fato é que possibilita a interceptação da radiação refletida pelos corpos d'água por sensores remotos de vários tipos.

Além dos particulados, outros fatores concorrem para a atenuação da luz na água: o próprio meio físico e os pigmentos não biogênicos. Considerando somente os pigmentos fitoplanctônicos, verifica-se uma variedade significativa destes no corpo d'água. A Figura 1 mostra os diversos pigmentos que se encontram associados ao fitoplâncton e suas faixas de absorção. O que chama a atenção são dois picos de absorção da clorofila (um no azul outro no vermelho).

De acordo com Smith-Baker (1968 e 1978 a,b) e Bukata et alii (1981 a,b) para descrever fisicamente o estado bio-óptico das águas usa-se o coeficiente de atenuação difusa total ou  $K_t$  que consiste de:

$$K_t = K_w + K_c C + K_x$$

onde  $K_w$  é o coeficiente de atenuação da água pura;  $K_c$  é o coeficiente de atenuação dos pigmentos semelhantes a clorofila;  $C$  é a concentração das clorofilas e dos feopigmentos ( $C = C_t + C_k$ ), e  $K_x$  é o coeficiente de atenuação devido aos pigmentos não biogênicos. A concentração de pigmentos na água também adiciona um componente  $K_t$  que é função da profundidade: quanto maior a concentração de pigmentos menor é a profundidade da zona eufótica (Smith-Baker, 1981). O que se detecta por sensoriamento remoto é o  $K_t$ , que se relaciona muito bem com  $C_t$  (concentração total de clorofila na zona eufótica) que, por sua vez, tem alto coeficiente de correlação linear (0,95) com  $C_k$

(concentração de clorofila na superfície). Esta última é fácil de se determinar e é, do ponto de vista espectral, a concentração de clorofila + feofitina + os outros pigmentos. É preciso trabalhar na faixa do vermelho para evitar os outros pigmentos.

A clorofila, pigmento presente em todos os vegetais inclusive no fitoplâncton, sofre naturalmente um processo de degradação cujo primeiro produto é a feofitina. Essa degradação se caracteriza unicamente pela perda do Mg de seu anel pirrólico (Holt, 1965; Goedheer, 1966; e Wetzel-Linkes, 1979). Na Figura 2 observa-se as curvas de absorção espectral da clorofila e da feofitina, ambas do tipo "a", nas faixas do visível do espectro eletromagnético. O que se observa é uma enorme semelhança da resposta espectral no vermelho entre as duas moléculas de clorofila e feofitina "a", quando dissolvidas em éter.

Bukata et alii (1983), obtiveram experimentalmente as curvas de atenuação e espalhamento dos principais componentes de um corpo d'água que são apresentadas na Figura 3. Esta figura trás gráficos de atenuação (a') e de espalhamento (b') da água pura, nas escalas da direita, e nas escalas da esquerda os pigmentos de origem biológica e os particulados de origem mineral. Observa-se uma fraca capacidade de atenuação e espalhamento por parte da água pura na região do visível (400 a 700 nm). Os pigmentos biológicos contudo, apesar de apresentarem alguma capacidade de atenuar e espalhar, não atingem a capacidade apresentada pelos particulados de origem mineral nas mesmas faixas. Nestes gráficos os pigmentos biológicos se referem a clorofila "a" mais sua respectiva feofitina, que passam a ser chamados de pigmentos "a".

A partir dessa experiência tomou-se conhecimento que 5 g/m<sup>3</sup> de particulado mineral em suspensão são suficientes para mascarar a resposta espectral proveniente da clorofila se esta estiver em concentração inferior a 20 mg/m<sup>3</sup>. Constataram também, que na ausência de particulado mineral somente concentrações de clorofila superior a 5 mg/m<sup>3</sup> são capazes de superar a forte absorção da radiação visível causada pela água em si.

Ritchie et alii (1990) traçaram uma comparação entre dados do LANDSAT e os particulados minerais em suspensão e os pigmentos biológicos semelhantes a clorofila. Com relação aos pigmentos, os autores procuraram saber qual a relação entre a concentração de clorofila "a" bem como da concentração de clorofila + feofitina "a" (pigmentos "a") e a resposta espectral obtida pelo satélite. A melhor correlação encontrada foi de  $r^2=0,48$  entre pigmentos "a", cuja concentração variou de 4,6 a 56,1 mg/m<sup>3</sup>, que é um coeficiente bastante baixo. A maior

dificuldade reside no fato de a clorofila se transformar em feofitina mesmo em condições normais do ambiente e no fato de ambos os pigmentos ocorrem na natureza em quantidades variáveis, sendo que a feofitina é o primeiro produto do processo de degradação da clorofila.

### Resultados do levantamento bibliográfico.

A turbidez é causada por diversos tipos de particulados em suspensão na água. Os particulados de origem mineral (do tipo silte e argila) são os principais responsáveis pela reflectância no visível proveniente das massas de água, seguidos pelas partículas fitoplancônicas. Conforme o tipo e a concentração do particulado, pode se perder a confiança nos dados espectrais registrados tanto por um radiômetro de campo, como por sensores a bordo de aeronaves ou satélites.

A coloração não biogênica que o lago ou reservatório podem apresentar é um outro fator que altera a reflectância da massa de água. Este fenômeno é função das condições físicas, das atividades biológicas do ambiente natural e das atividades humanas na bacia de captação.

A presença da feofitina, tanto autóctone (proveniente do próprio fitoplâncton) como alóctone (proveniente da decomposição da cobertura vegetal das vizinhanças), é responsável por várias imprecisões tanto limnológicas como espectrais. Importante lembrar que a feofitina alóctone não está relacionada à produção primária do corpo d'água.

A presença de diversos pigmentos, também de origem vegetal, que absorvem nas faixas do visível que impedem a separação espectral da reflectância devida a feofitina também tem se apresentado como uma outra dificuldade.

A dosagem em laboratório das quantidades de feofitina por outro lado, é prejudicada pela metodologia uma vez que quase sempre os métodos que são bons para extrair clorofila são nocivos a feofitina e vice versa. Esse fato acarreta em imprecisões na hora da calibração dos dados espectrais com os dados de campo.

A semelhança espectral entre a clorofila e a sua feofitina chega mesmo a comprometer a interpretação dos dados. Se não houver um perfeito controle da participação da feofitina na resposta espectral, a reflectância no vermelho, proveniente da água, não serve para inferir biomassa algal como seria desejável.

## Discussão das dificuldades.

A primeira dificuldade está no fato de o particulado de origem mineral mascarar a resposta espectral do fitoplâncton, dependendo de suas concentrações. Deste modo, água com uma concentração de particulado mineral igual ou superior a  $5 \text{ g/m}^3$  só permite a detecção, por sensores orbitais, de pigmentos "a", quando a concentração destes for igual ou maior a  $20 \text{ mg/m}^3$ . Em águas límpidas, somente concentrações de pigmentos "a" superiores a  $5 \text{ mg/m}^3$  são seguramente detectadas por sensores orbitais. Assim, somente em águas cuja reflectância seja predominantemente resultante da clorofila é que se pode seguramente utilizar dados espectrais para estimar a concentração e o tipo do fitoplâncton (Ritchie et alii, 1990; e Bhargava-Mariam, 1990 e 1991).

Os pigmentos não biogênicos ou "gelbstoff" vêm sendo apontados como um dos causadores de dificuldades, mas não há na literatura suficiente discussão sobre o assunto. Entretanto, Smith-Baker (1981) e Kirk (1983) já mencionam este problema como um obstáculo ao uso de sensores remotos principalmente os sensores orbitais.

O problema da feofitina, presente em todos os corpos d'água, se agrava nos ecossistemas lênticos tropicais onde se pode observar concentrações de feofitina três vezes maior que a concentração da clorofila respectiva (Rai, 1978 a b; e Rai-Hill, 1980).

Para averiguar se o dado espectral é ou não um bom estimador do parâmetro de campo é necessário uma análise regressiva do dado espectral versus dado de laboratório. Contudo, a dosagem destes pigmentos ainda tem muito que ser aperfeiçoada. A maioria dos métodos primeiro fornece a concentração dos pigmentos totais. Após o processo de acidificação, o que não era feofitina se feofitiniza e por diferença descobre-se qual a concentração da clorofila real. Esta, por sua vez, está diretamente relacionada a produção primária do corpo d'água. Contudo, do momento de coleta até a dosagem a clorofila se feofitiniza. Além disso, este método assim como outros são sujeitos a perdas tanto nas paredes da vidraria como se tornando turvos ao receber o ácido. Cabrera (1983) fez uma investigação minuciosa dos diversos métodos de extração de pigmentos e concluiu que, via de regra, os bons extratores de clorofila são nocivos à feofitina e vice versa. Sugere por fim o método de acetona alcalinizada 90% como sendo a menos nocivo a ambos.

A semelhança espectral no vermelho entre a feofitina e a sua respectiva clorofila, as quantidades de feofitina alóctone + autóctone maiores que da clorofila e o fato de a radiância registrada por qualquer sensor remoto combinar a resposta dos dois pigmentos,

trazem dúvidas sobre o possível uso de dados orbitais para estimar alguns parâmetros limnológicos. Ritchie et alii (1990), após examinar estes aspectos concluíram que diante das dificuldades o mais prudente seria aguardar por melhores sistemas sensores.

## Bibliografia.

BHARGAVA, D.S., MARIAM, D.W. Spectral reflectance relationships to turbidity generated by different clay materials. *PHOTOGRAM. ENG. REMOTE SENSING* 56(2): 225-229, 1990.

BHARGAVA, D.S., MARIAM, D.W. Light penetration depth, turbidity and reflectance related relationships and models. *ISPRS JOUR. PHOTOGRAM. AND REMOTE SENSING* 46(2): 217-230, 1991.

BUKATA, R.P., JEROME, J.H., BRUTON, J.E., JAIN, S.C., ZWICK, H.H. Optical water quality model of Lake Ontario. 1) Determination of the optical cross sections of organic and inorganic particulates in Lake Ontario. *APPLIED OPTICAL* 20(9): 1693-1703, 1981a.

BUKATA, R.P., BRUTON, J.E., JEROME, J.H., JAIN, S.C., ZWICK, H.H. Optical water quality model of Lake Ontario. 2) Determination of chlorophyll-a and suspended mineral concentrations of natural waters from submersible and low altitude optical sensors. *APPLIED OPTICAL* 20(9), 1704-1714, 1981b.

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.

CABRERA, S.S. Estimación de la concentración de clorofila y feopigmentos. In: N. BAHAMONDE e S. CABRERA (Ed.) Embalses, Fotosíntesis y Productividad Primaria. MaB/UNESCO, Santiago pp. 189-200, 1983.

DOKULIL, M. La influencia de la luz en la fotosíntesis. In: N. BAHAMONDE e S. CABRERA (Ed.) Embalses, Fotosíntesis y Productividad Primaria. MaB/UNESCO, Santiago pp 111-121, 1983.

- DUNTLEY, S.Q. Light and the sea. *JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA*. 53(2): 214-233, Fev.1963.
- GOEDHEER, J.C. Absorption and fluorescence of chlorophyll and its aggregates in solution. In: LEO P. VERNON AND GILBERT R. SEELY (Ed.) *The chlorophylls*. Academic Press, New York, 1966.
- HOLT, A.S. Nature, properties and distribution of chlorophylls. In: T.W. GOODWIN (Ed.) *Chemistry and biochemistry of plant pigments*. Academic Press, New York, 1965.
- JERLOV, N.G, NIELSEN, E.S. Beam attenuation. Optical aspects of oceanography. Aberdeen, Aberdeen Univ., cap.1 pp 47-62, 1968.
- KIRK, J.T.O. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge Univ.Press, Cambridge, 1983.
- KIRK, J.T.O. The upwelling light stream in natural waters. *LIMNOL. OCEANOGR.* 34(8): 1410-1425, 1989.
- KIRK, J.T.O., TYLER, P.A. The spectral absorption and scattering properties of dissolved and particulate components in relation to the underwater light field of some tropical Australian freshwaters. *FRESHWATER BIOLOGY* 16: 573-583, 1986.
- KLOOSTER, R.A., SCHERZ, J. Water quality by photographic analysis. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*, 40(7-12): 927-935, 1974.
- LATHROP, R.G., LILLESAND, T.M. Use of thematic mapper data to asses water quality in Green Bay and Central Lake Michigan, *PHOTOGRAM. ENGINEERING AND REMOTE SENSING*, 52(5):6710-680, 1986.
- LATHROP, R.G., LILLESAND, T.M. Monitoring water quality and river plume transport in Green Bay, Lake Michigan with SPOT-1 imagery. *PHOTOGRAM. ENGINEERING AND REMOTE SENSING*, 55(3):349-354, 1989.
- RAI, H. Distribution of carbon, chlorophyll-a and pheo-pigments in the black water lake ecosystem of Central Amazon Region. *ARCH. HYDROBIOL.* 82(1/4): 74-87, 1978a.
- RAI, H. Chlorophyll pigments in Central Amazon lakes ecosystem. *VERH. INTERNAT. VEREIN. LIMNOL.* 20:1192-1197, 1978b.
- RAI, H., HILL, G. Classification of Central Amazon Lakes on the basis of their microbiological and physico-chemical characteristics. *HIDROBIOLOGIA*, 72: 85-99, 1980.
- RITCHIE, I.C., SCHIEBE, F.B., McHENRY, J.R. Remote Sensing of Suspended Sediments in Surface Waters. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING*, 42(12): 1539-1545, Dec.1976.
- RITCHIE, J.C., COOPER, C.M., SCHIEBE, F.R. The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake, Mississippi. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 33:137-148, 1990.
- SAUSEN, T. M., PEREIRA, M. D. B. Estudo da qualidade da água de reservatórios, utilizando técnicas de sensoriamento remoto: conceitos metodológicos. SIMP. LATINO-AMERICANO DE SENS. REMOTO, Gramado, RS. 10-15 Agost. 1986. Anais. INPE/SELP/RS. Vol. 1 pp. 638-644, 1986.
- SHELLEY, P.E. Sediment measurements in estuarine and coastal areas. Washington, DC, NASA, (NASA CR-2769), 1976.
- SMITH, R.C. The optical characterization of natural waters by means of an extinction coefficient. *LIMNOL. OCEANOGR.* 13:423-429, 1968.
- SMITH, R.C., BAKER, K.S. The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. *LIMNOL. OCEANOGR.* 23:247-259, 1978a.
- SMITH, R.C., BAKER, K.S. Optical classification of natural water. *LIMNOL. OCEANOGR.* 23:260-267, 1978b.
- SMITH, R.C., BAKER, K.S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800nm). *APPLIED OPTICS* 20:177-184, 1981.
- WETZEL. R.G., LIKENS, G.E. *Limnological analysis*. W.B. Saunders - Philadelphia, 1979.
- YENTSCH, C.S. Light attenuation and phytoplankton

photosynthesis. In: I. MORRIS (Ed.) THE  
PHYSIOLOGICAL ECOLOGY OF  
PHYTOPLANKTON. Univer. California Press,  
Berkeley, 1980.

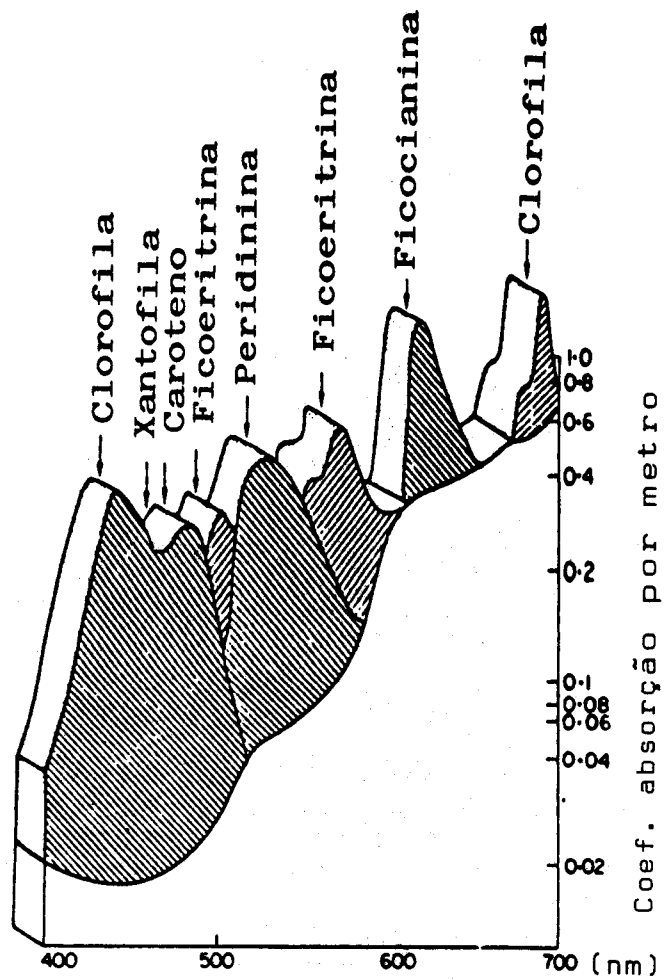


Figura 1 Curvas de absorção espectral dos pigmentos fitoplanctônicos na água. Fonte: YENSTCH (1980)

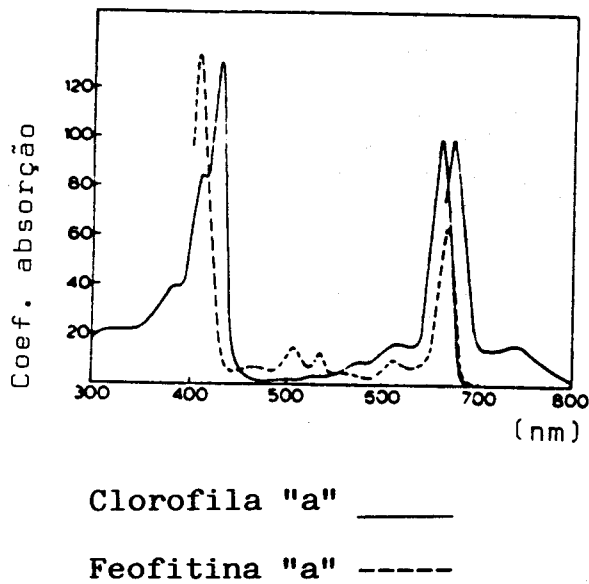
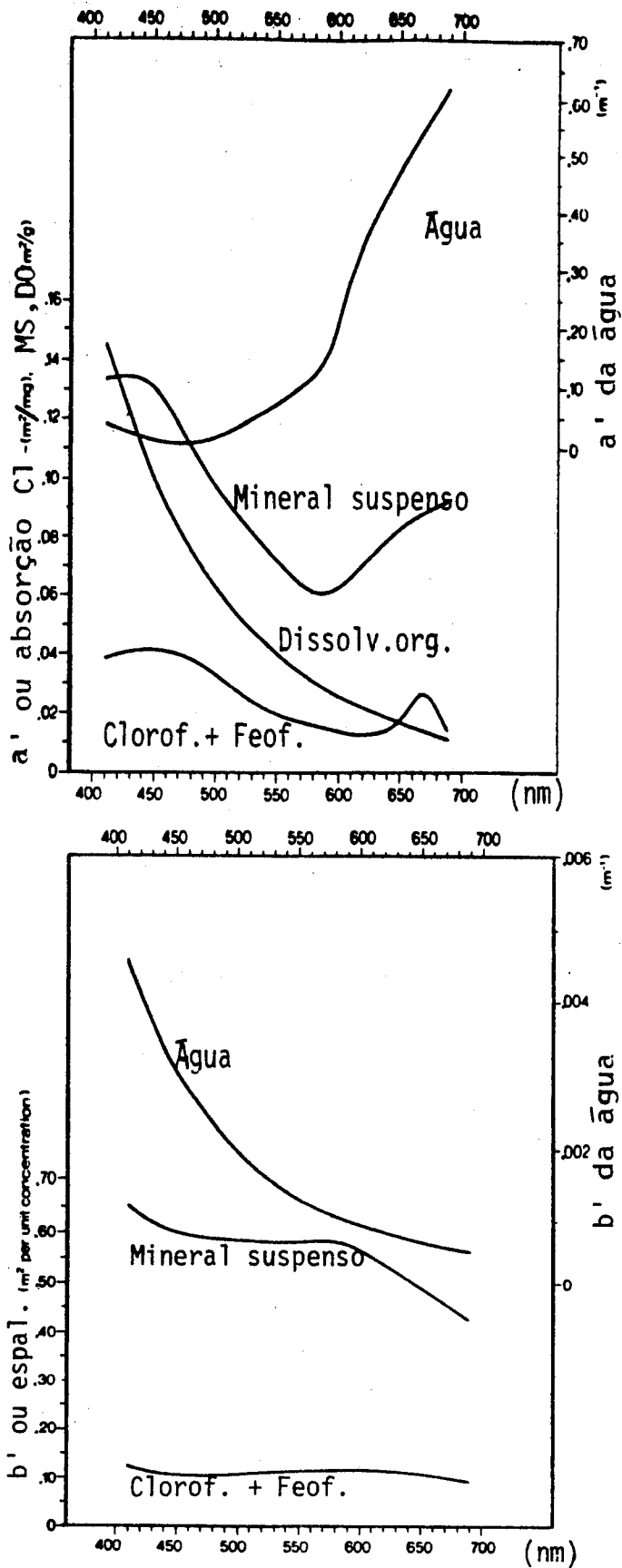


Figura 2 Curvas de absorção espectral da clorofila "a" e da feofitina "a" em éter. Fonte: GOEDHEER (1966)



**Figura 3** Curvas de absorção ( $a'$ ) e de espalhamento ( $b'$ ) espectrais da água, do particulado mineral e da clorofila + feofitina em suspensão na água. Fonte: BUKATA et alii (1983)