

# Modelo Empírico para a Estimativa de Concentração da Clorofila na Zona Eufótica em função da Concentração de Clorofila na Superfície

Ana Cristina Cestari<sup>1</sup>  
Thelma Krug<sup>2</sup>  
Evlyn Novo<sup>2</sup>

Universidade de Santo Amaro  
Departamento de Ciências Filosóficas  
Rua Prof. Eneas de Siqueira Neto, 340 - São Paulo, Brasil  
<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa postal 515, 12201 São José dos Campos, SP, Brasil

**Abstract.** In this paper 294 chlorophyll profiles collected over a large number of reservoirs were used to empirically derive a model to estimate the chlorophyll concentration in the euphotic zone as function of the chlorophyll concentration measured at the surface. The ground data were submitted to statistical analysis (regression analyses and variance analyses to develop an empirical model. A non-linear model was derived to estimate the chlorophyll concentration in the euphotic. The model was tested with ground data collected in the Barra Bonita reservoir (30 profiles). The results showed that the model can be applied in situations where there is an homogeneous distribution of chlorophyll in the water column. In this case, remote sensed derived chlorophyll concentration can be used as input to predict the total chlorophyll concentration in the euphotic zone which is a key parameter for estimating aquatic systems primary production.

## Introdução

Os parâmetros indicadores de qualidade de água de um sistema aquático podem ser estimados através de análises qualitativas e quantitativas de determinados componentes como o fitoplâncton, material particulado, material orgânico dissolvido e nutrientes. Em especial, a produtividade primária fitoplanctônica, tem recebido atenção nos estudos limnológicos, uma vez que representa uma das maiores entradas de matéria orgânica e de energia potencial responsável pelo funcionamento do sistema (Wetzel, 1975).

As análises limnológicas baseiam-se em amostragem "in situ", realizadas a partir de um número limitado de estações, sendo a produtividade primária computada pela extrapolação de medidas pontuais. Muitas vezes, tal metodologia não permite avaliar com precisão a variabilidade espacial e temporal do sistema em estudo. As limitações metodológicas existentes podem ser supridas pela utilização de sensores remotos no estudo de sistemas aquáticos, (Tundisi et al., 1991).

Os modelos de produtividade empíricos gerados a partir de dados de diferentes sistemas sensores foram aplicados tanto para águas do tipo I (Smith e Baker, 1978; Carder et al, 1991; Platt e Sathyendranath, 1988 e 1993; Costa, 1992) como para águas do Tipo 2 (Lathrop e Lillesand, 1986; Harding et al., 1992; Novo et al., 1990; Felix, 1993). Os modelos de produção para águas oceânicas, no entanto, revelam algumas dificuldades. A primeira é que utilizam com entrada perfis verticais de pigmentos, estimados "in situ". Outra

dificuldade refere-se a uma limitação importante no uso da técnica de sensoriamento remoto a qual é capaz de detectar pigmentos apenas na camada superficial devido a forte atenuação que a radiação eletromagnética sofre ao penetrar na coluna d'água (Morel e Berthon, 1989).

Esta limitação pode ser minimizada se for possível derivar estatisticamente relações significativas entre a concentração de pigmentos na superfície e a concentração de pigmentos existentes na coluna (Lorenzen, 1970; Smith et al., 1978; Morel et al., 1989). Através desta função seria possível estimar a concentração média de clorofila na coluna, a partir de dados de clorofila na superfície, detectados por sensoriamento remoto.

Pesquisas desta natureza não tem sido realizadas, até o momento, para águas continentais brasileiras, apesar da grande número de reservatórios existentes. Deste modo, procurou-se desenvolver um estudo cujo objetivo geral é estimar a concentração média de clorofila total na zona eufótica de um corpo d'água a partir de dados de concentração de clorofila total na superfície, como subsídio à aplicação de dados de Sensoriamento Remoto, na estimativa da produtividade primária de sistemas aquáticos continentais ou água do Tipo 2. O objetivo específico deste trabalho é desenvolver um modelo estatístico que relacione a concentração de clorofila total medida na superfície da água a concentração média de clorofila total na zona

eufótica; testar e avaliar o modelo com novos valores de concentração de clorofila total na superfície.

## 2. Procedimentos Metodológicos

A metodologia adotada foi dividida em duas etapas distintas: a) Metodologia para o desenvolvimento e avaliação do modelo estatístico que relacione a concentração de clorofila na superfície da água (CSup) com a concentração média de clorofila na zona eufótica (MCZE); e b) Metodologia para testar o modelo empírico gerado.

### 2.1 Desenvolvimento de modelo estatístico

Para o desenvolvimento do modelo foram utilizados dados históricos (294 perfis de clorofila) medidos em 25 reservatórios no Estado de São Paulo e em 1 reservatório no Estado do Pará, cujas localizações geográficas estão, respectivamente, entre: latitude 20°-24° S e longitude 46°- 53° W e latitude 3°- 5° S e longitude 49°- 50°W.

Os dados dos 26 reservatórios referem-se aos anos de 1979, 1986, 1987, 1988 e 1992, em diferentes épocas do ano e originados dos seguintes projetos: Tipologia dos Reservatórios do Estado de São Paulo, Tundisi (1981); Programa de Monitoramento Ambiental do Reservatório de Tucuruí, Silva (1994); Programa de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos - USP: Calijuri (1988). Aranha (1990), Fonseca (1990); Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos - USP: Reis Pereira (1994).

A região do Estado de São Paulo, esta climatologicamente categorizada em duas estações distintas: a) estação quente e chuvosa entre os meses de outubro a março e b) estação fria e seca entre os meses de abril e setembro (Matsumura-Tundisi, 1981). Na área do reservatório estudado no Estado do Pará, o clima é tropical úmido com inverno seco e precipitação média do mês mais seco inferior a 60 mm (Silva, 1994); os meses do ano dividem-se em dois períodos marcantes: estiagem, que predomina de meados de maio a dezembro; e cheia correspondendo aos demais meses do ano (Pereira et al., 1990).

Para cada estação estudada foram extraídos os seguintes parâmetros: Profundidade do Disco de Secchi (m) utilizados para avaliar a extensão da zona eufótica (Esteves 1.988); Concentração de clorofila total na superfície ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) e Concentração de clorofila total ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) em diferentes profundidades na coluna d'água determinadas segundo a técnica descrita por Golterman et al. (1978). Estabelecida a profundidade da zona eufótica determinou-se para cada perfil o valor médio da concentração de clorofila total (MCZE). Para que os

valores MCZE calculados fossem considerados representativos do valor da concentração de clorofila total na coluna d'água, determinou-se, para cada amostra o valor do coeficiente de variação (CV) ou dispersão relativa. A partir da análise dos valores obtidos dos coeficientes de variação, para cada um dos perfis de clorofila examinados, estabeleceu-se que os perfis que apresentassem alta variabilidade relativa ( $\text{CV} > 20\%$ ), e por este motivo considerados inconsistentes, seriam excluídos do estudo. Para os demais perfis ( $\text{CV} < 20\%$ ) realizou-se o tratamento estatístico necessário para o desenvolvimento do modelo.

### 2.2 Teste do modelo

A área de estudo escolhida para o teste do modelo corresponde ao Reservatório de Barra Bonita, interior do Estado de São Paulo (22°29' S e 48°34'W), formado pelo represamento dos rios Tietê e Piracicaba, inserido na Bacia do Médio Tietê. A localização geográfica deste reservatório, confere a ele uma característica de transição entre os climas tropical e subtropical, em que as estações não são bem definidas. As alterações sazonais são pouco pronunciadas, com diferenças apenas entre a época de maior precipitação (verão) e período seco (inverno), quando as chuvas são escassas ou ausentes (Calijuri, 1988). Como consequência da localização do reservatório e de suas características internas, Calijuri (1988), verificou que a produção primária por área no reservatório é maior no verão, enquanto que no inverno os aumentos ocorrem devido à ação dos ventos que promovem a mistura na coluna d'água.

Para o teste do modelo, foram utilizados 30 perfis de clorofila obtidos nos anos de 1983 e 1994, em diferentes épocas do ano (Tundisi et al., 1993; Projeto Temático do médio Tietê, 1995). Os parâmetros analisados foram: Profundidade do Disco de Secchi (m); concentração de Clorofila Total na superfície ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) e concentração de clorofila total ( $\mu\text{g.l}^{-1}$ ) em diferentes profundidades na coluna d'água. Conforme citado no item 2.1, os valores da profundidade da zona eufótica, valores médios da concentração de clorofila total e respectivos valores dos coeficientes de variação foram estimados para cada perfil. O valor da concentração de clorofila total na superfície (CSup) de cada perfil foi aplicado ao modelo, o que permitiu estimar a concentração média de clorofila total na zona eufótica (MCZEest).

### 2.3. Tratamento Dos Dados

Os principais procedimentos seguidos para a realização da análise estatística envolvendo os dados estudados foram: a) Análise da distribuição das variáveis.; b) Determinação e análise do modelo estatístico; c) Teste do modelo gerado

### 3. Resultados E Discussão

Para cada um dos 294 perfis foram determinados os coeficientes de variação, visando avaliar a utilização de valores médios de concentração de clorofila na zona eufótica como valores representativos da concentração de clorofila total na coluna. Verificou-se do total dos perfis examinados que 80 amostras apresentaram grande variabilidade ao redor da média, com um coeficiente de variação maior do que 20%; enquanto que nos demais perfis o valor médio mostrou-se representativo da concentração de clorofila na coluna d'água, conforme o critério estabelecido anteriormente.

Calculando-se a frequência acumulada em relação aos valores dos coeficientes de variação obtidos observou-se que, aproximadamente 73% dos dados possuem coeficientes de variação menores que 20%, ou seja 214 dados do total de perfis analisados.

Desta forma foram excluídos 80 amostras do total das observações nos testes estatísticos posteriores. A elevada variabilidade dos dados excluídos pode ser atribuída a alguns fatores, como erros amostrais, e variações características de cada reservatório de onde cada um dos perfis tiveram origem ( Tundisi, 1981; Matsumura-Tundisi,1981; Calijuri ,1988;Pereira et al., 1990 ). As 214 amostras consideradas representativas e consistentes para serem utilizadas na determinação do modelo estatístico apresentaram uma faixa de variação de 30,59 µg/l para CSup e de 29,43 µg/l para MCZE. Estes valores quando comparados com as faixas de variação iniciais verificadas para os 294 perfis ( 53,13 para CSup e 29,94 para MCZE) mostraram que a exclusão dos 80 perfis resultou apenas na alteração na faixa de variação da variável CSup , enquanto que para variável MCZE não houve alteração significativa na faixa de variação.

### 3.2. Análise da distribuição das variáveis envolvidas na determinação do modelo.

A análise gráfica mostrou claramente a existência de uma assimetria na distribuição de ambas as variáveis (CSup e MCZE) , comprovada pelos resultados obtidos a partir dos Testes de qui-quadrado e de Kolmogorov-Smirnov. Por outro lado, transformando-se os valores da variáveis originais através da aplicação do logaritmo natural (Wonnacott,1980), verificou-se uma distribuição mais simétrica, tendendo à normal. Tal verificação foi comprovada pelos resultados obtidos nos Testes de qui-quadrado e de Kolmogorov-Smirnov. O modelo gerado a partir da utilização das variáveis transformadas foi:

$$MCZE = 1.035 \cdot CSup^{0.977}$$

O desenvolvimento deste modelo, baseado na transformação das variáveis originais para a forma logarítmica, acarretou na determinação de um modelo

exponencial, porém intrinsecamente linear (Draper, 1967).

- a) variável lnCSup;
- b) variável ln MCZE

### 3.3. Análise estatística do modelo

O modelo obtido para a estimativa de MCZE apresentou um coeficiente de determinação igual a 96,95%, explicando satisfatoriamente a relação entre os valores observados e estimados (Figura 1). Os resultados obtidos pela estatística F aplicada ao modelo (6748.88) e aos resíduos (1.14) comprovam respectivamente, a existência de relação entre as variáveis (  $H_1: \beta_1 \neq 0$  ) e que esta relação é linear (  $H_0 : E(y) = \beta_0 + \beta_1 X$  ).

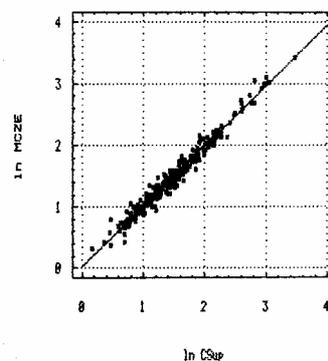


Figura 1 - Diagrama de dispersão de ln CSUP vs ln MCZE e correspondente reta de regressão

A análise gráfica dos resíduos plotados em relação a variável independente (Figura 2), mostra uma distribuição aleatória e provável variância constante. Por outro lado, a análise dos resíduos padronizados mostra que 69% dos resíduos encontram-se entre -1 e +1, e 95% entre -2 e +2 , satisfazendo o mínimo de respectivamente 68% e 95%, em cada faixa, indicando a tendência normal de distribuição para os resíduos . Considerando-se o número de resíduos com valores positivos e negativos tem-se respectivamente, 47% e 53%, o que indica que há uma certa tendência do modelo em superestimar os dados.

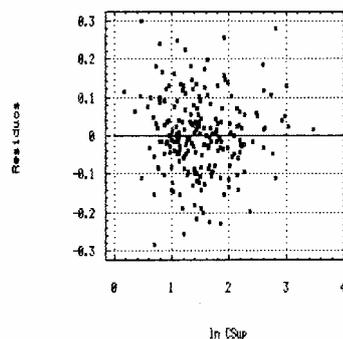


Figura 2 - Diagrama de dispersão de resíduos em relação à variável independente (lnCSup).

O modelo estimado para os dados de clorofila provenientes de águas continentais (Tipo 2), além de satisfazer estatisticamente as condições de normalidade, melhor ajuste e estabilidade na variância, que o torna adequado e confiável para aplicação (Neter, 1973), coincide com os modelos propostos para águas oceânicas (Tipo 1) descritos por Lorenzen (1970), Smith e Baker (1978) e Morel e Berthon (1989), como também com os resultados de Harding et al. (1992) para águas continentais.

### 3.4. Análise dos valores calculados dos coeficientes de variação para os 30 perfis utilizados para o teste do modelo.

Dos 30 perfis utilizados para testar o modelo, 18 apresentaram valores de CV < 20%, significando que apenas 60% dos valores de MCZE podem ser considerados representativos da concentração de clorofila total na coluna d'água. A menor variabilidade relativa na distribuição de pigmentos, pode indicar uma baixa ou provável de ausência de estratificação na coluna d'água nas datas em que as coletas foram realizadas.

O modelo foi testado em três diferentes versões: (a) utilizando todos os valores de MCZE calculados; (b) utilizando somente os valores de MCZE no qual o CV > 20%; e (c) utilizando somente os valores de MCZE no qual CV < 20%. As diferenças observadas nos resultados indicariam a não pertinência de utilização do modelo para valores de MCZE de alta variabilidade relativa.

### 3.5. Teste do modelo

A Figura 3 mostra o diagrama de dispersão entre MCZE estimada e MCZE observada, correspondendo a um valor de  $r^2$  de 91,36%. Verifica-se que para valores de MCZE observados acima de 14  $\mu\text{g/l}$ , correspondendo a valores de CSup maiores do que 18  $\mu\text{g/l}$ , ocorre uma maior dispersão dos dados, de tal forma que se estes valores fossem excluídos da análise, o coeficiente de determinação resultante seria de 98%.

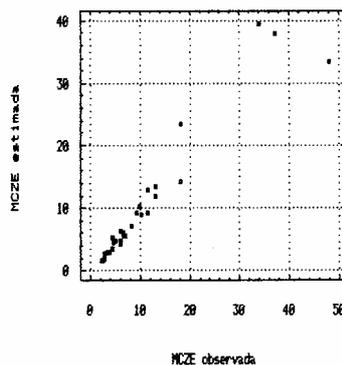


Figura 3 - Diagrama de MCZE estimada e MCZE observada.

Apesar do pequeno número de amostras com elevada CSup utilizadas no teste do modelo, os resultados obtidos mostram, em uma primeira análise, que provavelmente o modelo não explica adequadamente situações em que elevados valores de concentração superficial de pigmentos são observados na coluna d'água.

Paralelamente, os valores MCZE observados e estimados pelo modelo quando submetidos ao Teste "t" para dados emparelhados apresentou nível de significância de 0.237, indicando não haver, em média, diferença significativa entre as variáveis.

Devido a análise inicial dos coeficientes de variação, as variáveis MCZE observada e MCZE estimada com coeficientes de variação maiores e menores do que 20%, foram submetidos ao teste "t" separadamente. Os resultados obtidos mostraram para ambos os casos, não haver diferença significativas entre as variáveis (níveis de significância: 0.054 e 0.336 respectivamente para CV>20% e CV<20%). Estes resultados sugerem que o modelo permite estimar, em média, valores de MCZE, independente de serem realmente representativos da concentração média de clorofila total na coluna d'água.

Por outro lado, calculando-se o percentual relativo de erro entre MCZE observada e MCZE estimada, verificou-se uma variação de valores entre 1,13% e 64,18%, onde 12 das observações apresentaram valores de erro percentual acima de 20%..

## 4. CONCLUSÃO

A metodologia adotada neste trabalho permitiu estimar um modelo empírico genérico e estatisticamente satisfatório, que viabiliza a determinação da concentração média de clorofila total na zona eufótica determinados a partir de valores da concentração de clorofila total determinadas de a partir de amostras coletadas na camada superficial da coluna d'água.

Os resultados obtidos nos testes realizados mostraram uma maior adequação do modelo para casos em que a coluna d'água apresentava-se homogênea quanto à distribuição de pigmentos, ou seja, provável ausência de estratificação térmica resultando numa baixa variabilidade relativa. Nesta situação o modelo estimou valores médios da concentração de clorofila total na zona eufótica com um erro de até 20%.

Por outro lado, o modelo mostrou-se inadequado, superestimando os resultados nos casos em que a distribuição de pigmentos apresentou heterogeneidade com elevada variabilidade relativa, indicando uma provável estratificação na coluna d'água.

A maioria das amostras utilizadas para testar o modelo referem-se ao período de verão, onde costuma ocorrer no Reservatório de Barra Bonita estratificação térmica, aumentando a heterogeneidade da distribuição vertical de pigmentos. No entanto, nem todos os perfis estudados nesta época apresentaram elevada variabilidade relativa.

O conhecimento prévio do comportamento hidrodinâmico somado às características físico-químicas e biológicas do corpo d'água, portanto, merecem especial atenção quando da aplicação do modelo à partir de valores de concentração de clorofila total na superfície determinados por sensoriamento remoto.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aranha, F.J. **Influência de fatores hidráulicos e hidrológicos na composição e biomassa do fitoplancton, em curto período de tempo, na represa de Barra Bonita - SP.** Tese de Mestrado em Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1990.

Calijuri, M.C. **Respostas fisioecológicas da comunidade fitoplanctônica e fatores ecológicos em ecossistemas com diferentes estágios de eutrofização.** Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1988.

Carder, K.L.; Hawes, S.K.; Baker, K.A.; Smith, R.C.; Steward, R.G.; Mitchell, B.G. Reflectance model for quantifying chlorophyll a in presence of productivity degradation products. **Journal of Geophysical Research.** 96 (c11): 20.599-20.661, 1991.

Costa, M.P.F. **Estimativa de clorofila-a em água costeira utilizando dados do sensor TM/Landsat.** Tese de mestrado em Sensoriamento Remoto - Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos campos, 1992.

Draper, N.R.; Smith, H. **Applied Regression Analysis.** New York, John Wiley & Sons, 1967. 407p.

Esteves, F.A. **Fundamentos de limnologia.** Rio de Janeiro, Interciência, 1988. 575p.

Felix, I.M. Monitoramento da qualidade da água utilizando-se modelos empíricos obtidos a partir de dados de sensoriamento remoto Reservatório de Barra Bonita - SP In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7, 1988. **Anais.** São José dos Campos, INPE, 1993, p. 119-127.

Fonseca, C.P. **Estudo de flutuações de curta duração na comunidade zooplancônica, Barra Bonita, Médio Tietê, SP** Tese de Mestrado em Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1990.

Golterman, H.L.; Clymo, R.S. **Methods for chemical analysis of freshwater** Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1969. 171p.

Harding Jr., L.W.; Itsweire, E.C.; Esaias, W.E. Determination of phytoplankton chlorophyll concentrations in the Chesapeake Bay with aircraft remote sensing **Remote Sensing Environment** 40 : 79-100, 1992.

Lathrop, J. R.; Lillesand, T. M. Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Green Bay and Central Lake Michigan. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,** 52(5) : 671-680, 1986.

Matsumura-Tundisi, T.; Hino K.; Claro, S.M. Limnological studies at 23 reservoirs in southern part of Brazil **Verh. Internat. Verein. Limnol.** 21:1040-1047, 1981.

Morel, A.; Berthon, J.F. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. **Limnology and Oceanography,** 34(8) : 1545-1562, 1989.

Neter, J.; Wasserman W. **Applied linear Statistical Models.** Illinois, Richard D. Irwin, 1974. 842 p.

Novo, E.M.L.M.; Braga, C.Z.F.; Tundisi, J.G. **Remote sensing estimation of total chlorophyll pigment distribution in Barra Bonita reservoir.** São José dos Campos, INPE, 1990. 13 p. (INPE-5202-PRE/1664).

Platt, T. ; Sathyendranath, S. Estimators of primary production for interpretation of remotely sensed data on ocean color. **Journal of Geophysical Research.** 98 (c8): 14.561-14,576, 1993.

Platt,T.; Sathyendranath,S. Oceanic Primary production: estimation by remote sensing at local and regional scales **Science.** 241,1613-1620, 1988.

Reis Pereira, V.L. **Produção primária, composição do fitoplâncton e condições ecológicas do reservatório Guarapiranga - São Paulo - S.P.** Tese de Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1994.

Silva, O. **Caracterização dos gradientes longitudinais e laterais do Reservatório de Tucuruí/PA, através da manipulação estatística dos bancos de dados limnológicos e de imagens TM - Landsat** Tese de mestrado em Sensoriamento Remoto - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992.

Smith, R.C.; Baker, K. The bio-optical state of ocean waters and remote sensing. **Limnology and Oceanography,** 23(2) : 247-267, 1978.

Tundisi, J.G. Tipologia de represas do Estado de São Paulo In: Reunião sobre Ecologia e Proteção de águas Continentais **Anais.** São Carlos,16-23 agosto 1981 . p. 191-228.

Tundisi,J.G.; Tundisi, T.M.; Calijuri, M.C.; Novo, E.M.L.M. Comparative limnology of five reservoirs in the middle Tietê River, S. Paulo State. **Verh. Internat.Verein. Limnol.** 24:1489-1496, 1991.

Tundisi,J.G.; Tundisi, T.M.; Calijuri, M.C. Limnology and management of reservoirs in Brazil. In: Straskraba,M.; Tundisi,J.G.; Duncan, A.C. **Comparative reservoir limnology and water quality management.** 1993.

Wetzel, R.G. **Limnology** Philadelphia, W.B.Saunders Company, 1975. 743 p.

Wonnacott, T.H.; Wonnacott, R.J. **Introdução a estatística.** Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1980. 590 p.(Traduzido por Alfredo Alves de Farias).