

Integração de dados de alta frequência temporal e imagens MODIS/TERRA para o estudo da turbidez na planície de Curuai

Enner Alcântara¹
José Luiz Stech¹
Cláudio Barbosa²
Evlyn Novo¹
Yosio Shimabukuro¹

¹ INPE – Divisão de Sensoriamento Remoto
{enner, stech, evlyn, shimabukuro}@ltd.inpe.br

² INPE – Divisão de Processamento de Imagens
claudio@dpi.inpe.br

Abstract

The hypothesis that motivated the accomplishment of this research was: “the turbidity has a variation in response of flood pulse in the Curuai floodplain and this response could be folloied with the use of satellite images and *in-situ* data (telemetric data)”. Thus, the response of turbidity in the floodplain was studied in two scales: first, point-temporal (turbidity sampling by Environmental Monitoring Sistem-SIMA); second, spatial-temporal analysis (turbidity distribution using MODIS/ TERRA images). As the two scales they are distinct, the treatment methods had also been distinct. For treatment of the point-temporal scale, we used a non-linear method called so Wavelet Transform. For spatial-temporal scale, we used five field campaigns with turbidity sampling. This ground data was treated with Ordinary Kriging. A Linear Mixture Spectral Model was applied in MODIS image during 2003 to 2004, to verify the turbidity distribution during the hydrological cycle. The main results had been: [1] the annual flood pulse is the main driving force that modulates turbidity values in the Curuai floodplain; [2] the results derived from Linear Mixture Spectral Model showed that north region of floodplain is more turbid than south region; [3] it's impossible to adjust a unique mathematical function for estimating the turbidity in floodplain.

Key word: Remote sensing, linear spectral mixing model, SIMA, Amazon floodplain.

1. Introdução

A bacia Amazônica, com aproximadamente $6,1 \times 10^6$ Km², é a maior bacia hidrográfica do planeta. De dimensões continentais, a mesma está situada na zona intertropical, recebendo precipitações médias anuais de 2460 mm. A descarga líquida média do rio Amazonas é estimada em $209.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. O aporte médio de sólidos em suspensão do Rio Amazonas ao Oceano Atlântico é estimado em cerca de 600 milhões de toneladas por ano (Mollinier *et al.*, 1997, Filizola, 1999). Os principais tributários do rio Amazonas são acompanhados ao longo de seus cursos, por extensas planícies de inundações chamadas várzeas ou igapós.

Planícies de inundação são ambientes que oscilam entre as fases terrestre e aquática. Esta característica permite que o ambiente seja favorável à existência tanto de organismos terrestres quanto aquáticos, mas de difícil utilização pelos humanos. Por esta razão, extensas áreas de planícies de inundação da Europa e da América do Norte foram eliminadas ou extremamente modificadas por atividades humanas.

O processo mais compreendido das planícies é o conceito de pulso de inundação (Junk *et al.*, 1989). Esse conceito é baseado em considerações hidrológicas do rio, sua bacia de captação e a própria planície de inundação. Considerando o balanço hidrológico e sedimentar, as áreas de inundação têm um papel de armazenamento temporário ou permanente do material dissolvido e particulado; sendo que o tempo de armazenamento pode variar de alguns meses (águas e substâncias dissolvidas) a algumas centenas a milhares de anos (sedimentos). Estima-se que 80% do material transportado pelo Rio Amazonas, transitam pelas várzeas (Mertes *et al.*, 1996; Dunne *et al.*, 1998). As várzeas constituem áreas preferenciais de deposição de sedimentos (Amorim, 2006).

Diante das dimensões e complexidades dos diferentes corpos d'água da Amazônia, o seu estudo através de coleta de dados *in-situ* é muito dispendioso e de informação limitada. Assim, o uso de técnicas de sensoriamento remoto, associado a dados de campo, apresenta-se como uma boa solução para o entendimento desses sistemas (Barbosa, 2005).

A tecnologia de sensoriamento remoto tem sido utilizada extensivamente para detectar e quantificar parâmetros de qualidade de água em corpos de água naturais e reservatórios, (Kloiber *et al.*, 2002). Sensores com diferentes faixas de resoluções espectral, espacial e temporal, montados em plataformas que incluem satélites e aeronaves, têm sido utilizados para monitorar poluentes químicos, sólidos em suspensão e abundância de clorofila *a*. Um dos problemas mais persistentes do sensoriamento remoto de sólidos em suspensão (incluindo sólidos orgânicos) na água é discriminar o efeito da turbidez devido aos sedimentos suspensos e a clorofila (Goodin *et al.*, 1993).

A turbidez é uma propriedade visual da água que representa a redução ou falta de luz na coluna d'água devido à presença de partículas suspensas (Wetzel, 2001). As principais causas da turbidez na água são a presença de matérias sólidas em suspensão (silte, argila, sílica, colóides), matéria orgânica dissolvida e inorgânica finamente divididas, organismos microscópios e algas. Estes são responsáveis pela cor verdadeira da água e o material em suspensão pela cor aparente¹ (Hutchinson, 1957).

Este estudo tem como objetivo principal avaliar a resposta da turbidez ao pulso de inundação na planície de inundação de Curuai. Para isto serão utilizadas duas escalas distintas: ponto-temporal (dados de turbidez por telemetria) e espaço-temporal (através das imagens MODIS).

2. Área de Estudo

A planície de inundação do lago Grande de Curuai está localizada 850 km acima do Oceano Atlântico, próximo a cidade de Óbidos (Pará, Brasil). A várzea é compreendida por lagos de águas brancas (caracterizadas por altas cargas de sedimentos) e lagos de água preta (caracterizadas pela alta concentração de ácidos húmicos e baixa concentração de sólidos

¹ O material em suspensão, geralmente presente nas águas superficiais gera a cor aparente, ou seja, é como o ser humano a vê. Na verdade é resultado em parte da reflexão e dispersão da luz pelas partículas. Removido o material em suspensão, diz-se que a cor é verdadeira, devido a partículas coloidais carregadas negativamente e material dissolvido (Margalef, 1983).

em suspensão), interconectados um com o outro e permanentemente conectados com o Rio Amazonas através de diferentes canais (Moreira-Turcq *et al.*, 2004; Dosseto *et al.*, 2006), ver Figura 1.

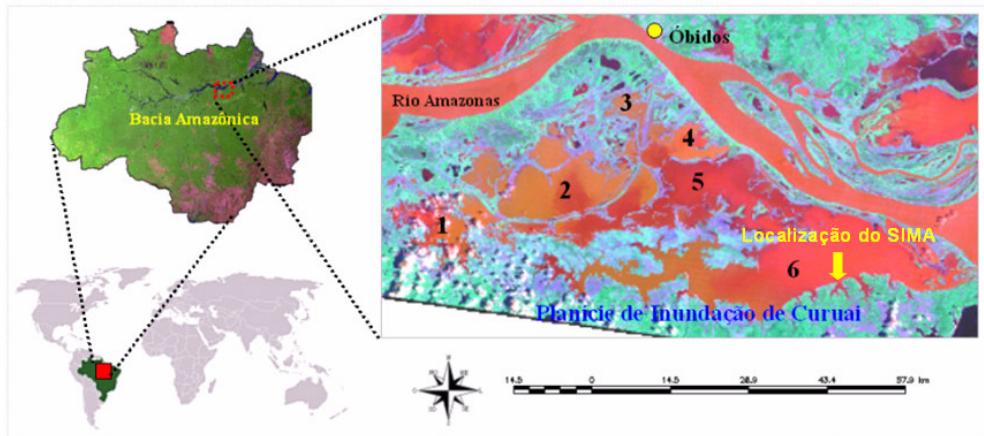


Figura 1: Localização da planície do Lago Grande de Curuaí e do SIMA: 1 – Lago Salé; 2 – Lago do Poção; 3 – Lago Açaí; 4 – Lago Santa Ninha; 5 – Lago Grande do Poção e 6 – Lago Grande de Curuaí. Em detalhe a localização do SIMA.

O funcionamento dos lagos que compõem a planície de Curuaí é amplamente modulado pela flutuação do nível da água próximo à cidade de Óbidos (PA). Esta flutuação gera quatro condições dinâmicas ao longo do ano (Figura 2).

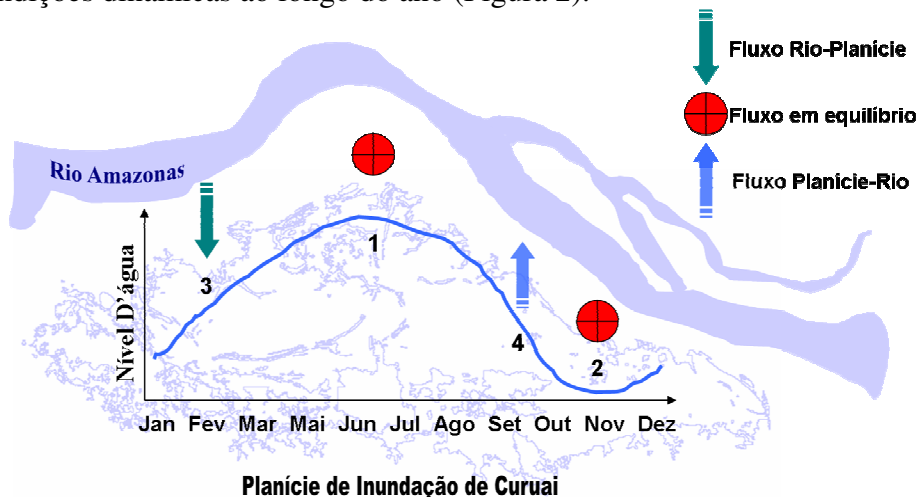


Figura 2: Estados do sistema da planície de Curuaí (Modificado de Barbosa, 2005). (3) período de rápida subida da água, ocorrendo entre janeiro e fevereiro; (1) período de inundação da planície entre abril e junho; (4) período de descida da água entre agosto e outubro; (2) período de nível mínimo de água na planície.

3. Dados *in-situ* e sensoriamento remoto

3.1 Escala Ponto-Temporal (Dados *in-situ* de turbidez)

Os dados de turbidez *in-situ* são provenientes do Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental (SIMA). O SIMA destina-se à coleta de dados de sistemas aquáticos em locais remotos e sua transmissão, via satélite, em tempo quase-real, para a comunidade de

usuários (Stevenson *et al.*, 1993). Esse sistema faz parte do projeto de Monitoramento automático de variáveis limnológicas em sistemas aquáticos amazônicos sujeitos a diferentes graus de interferência antrópica (processo FAPESP 02/09911-1).

Para este estudo foi utilizada a série temporal de turbidez medida pelo SIMA de 20 de Novembro de 2004 a 26 de Abril de 2005, totalizando 3769 amostras realizadas em intervalos de 1 hora.

A análise da série temporal de turbidez foi realizada através da aplicação da Transformada de Wavelet Contínua de Morlet (TWCM). Uma rotina foi escrita em MATLAB contendo todas as premissas metodológicas da TWCM. Devido à metodologia para a aplicação da TWCM ser muito extensa, não será apresentada com detalhes neste artigo (para maiores detalhes ver Torrence e Compo, 1998).

3.2 Escala Espaço-Temporal (Sensoriamento Remoto)

Para o estudo da turbidez na escala espaço-temporal, um Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) foi aplicado a quatro imagens MODIS/ Terra (Bandas 1, 2, 3 e 4) representativas de cada estado do sistema (Figura 2).

Para tanto os autores assumem que a composição dos end-members, partícula inorgânica em suspensão (Iss), clorofila-*a* (Chl) e matéria orgânica dissolvida (Dom), são capazes de fornecer informação qualitativa da distribuição da turbidez na planície de Curuai (Figura 3).

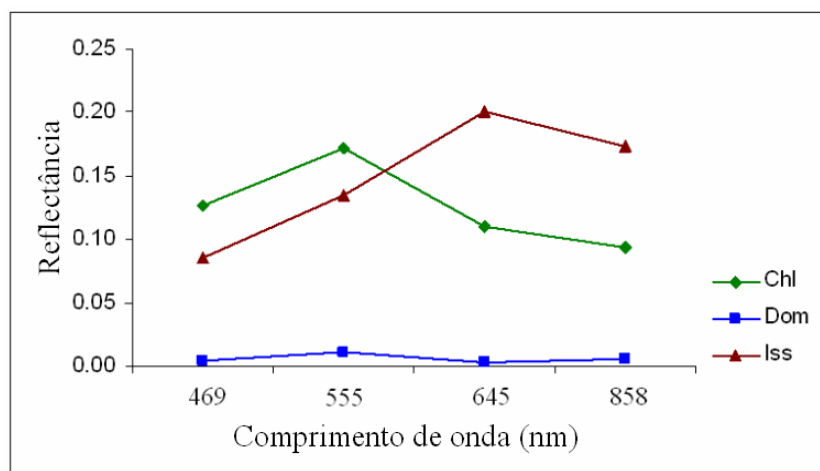


FIGURA 3: End-members selecionados para aplicação do MLME nas imagens MODIS. Clorofila *a* (Chl), Matéria orgânica dissolvida (Dom), Partícula inorgânica em suspensão (Iss).

Tendo selecionado os end-members que serão utilizados no modelo linear de mistura espectral, a equação 1 mostra o modelo utilizado para decompor a reflectância do sinal da água nos end-members selecionados:

$$R_{is} = f_{Chl}r_{Chl} + f_{Dom}r_{Dom} + f_{Iss}r_{Iss} + \epsilon_i \quad (1)$$

Onde: R_{is} é a reflectância da i_{th} banda na estação de amostragem s ; f_{Chl} , f_{Dom} e f_{Iss} são as frações clorofila a , matéria orgânica dissolvida e partícula inorgânica em suspensão; e r_{Chl} , r_{Dom} , r_{Iss} são as reflectâncias dos end-members clorofila a , matéria orgânica dissolvida e partícula inorgânica em suspensão; ε_i é o erro no ith comprimento de onda.

4. Integração da Telemetria e das Imagens MODIS/ Terra

A figura 4.#1.a, mostra a variação da turbidez medida *in-situ* pelo SIMA e a qual estado do sistema cada trecho da série pertence. Nota-se cinco regiões que merecem destaque:

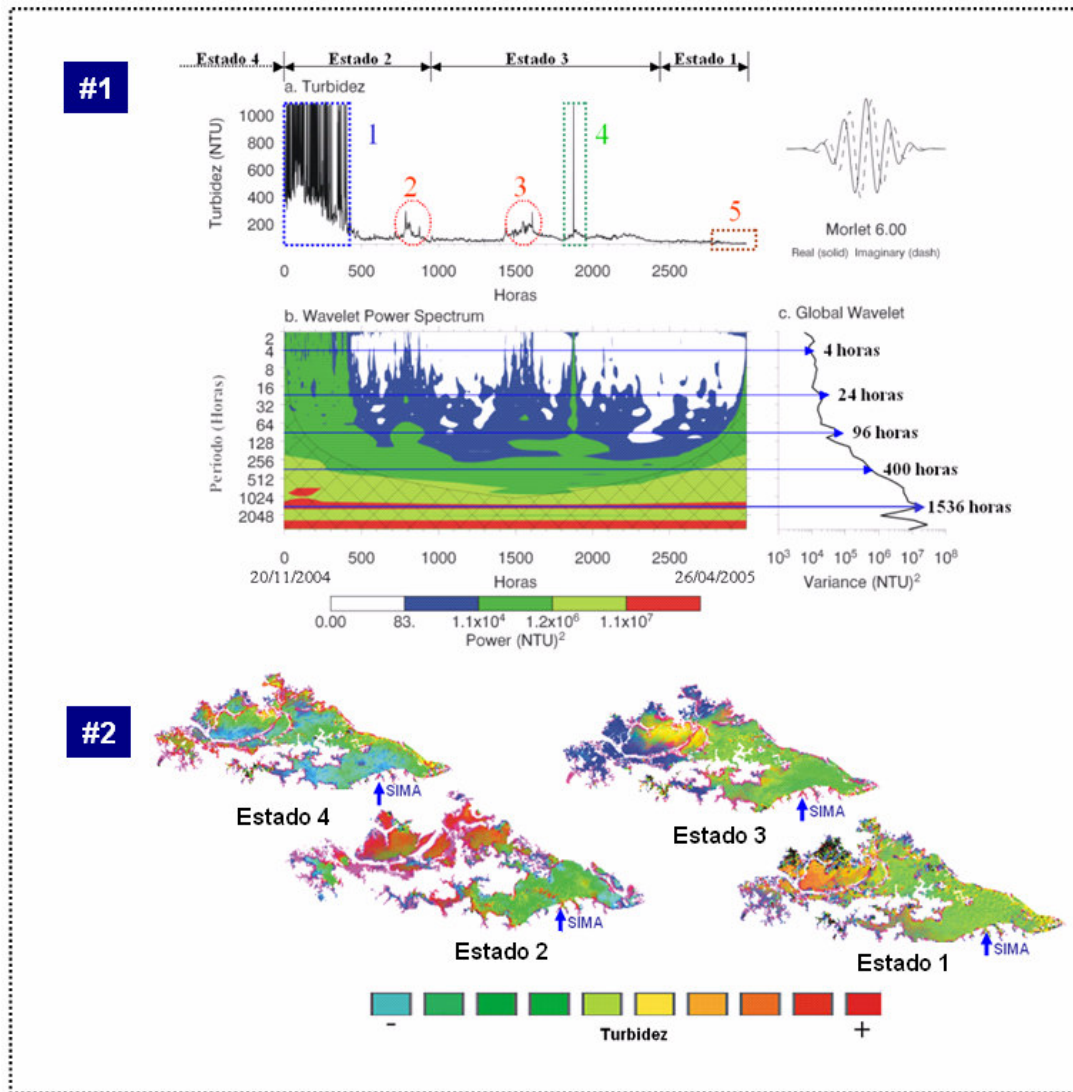


FIGURA **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.:**

Integração dos resultados obtidos por telemetria (SIMA) e por meio das imagens MODIS do Satélite Terra. (#1) resultado da aplicação da TWCM: (a) série temporal de turbidez medida pelo SIMA; (b) espectro de energia da wavelet de Morlet; (c) wavelet global. (#2) resultado da aplicação do MLME nas imagens MODIS/ Terra (Composição das imagens fração: Iss no canal vermelho, Chl no canal verde e Dom no canal azul).

- 1) Esta região está localizada no estado 2, região onde o nível da água na planície está baixo. Nesse estado verifica-se que a turbidez é alta e descontínua. A alta turbidez ocorre nessa época devido ao pouco volume de água na planície e ao revolvimento do sedimento para a superfície. A descontinuidade da turbidez nesse período se deve principalmente à ação do vento. Pois, nesse estado a ação do vento se torna uma força predominante na geração de pressão entre a interface ar-água fazendo o sedimento se misturar na coluna d'água, gerando picos de turbidez;
- 2) A região 2 já se encontra no final do estado 2, mostrando já ocorrer uma diminuição da turbidez. Isso ocorre porque o nível da água já começa a subir na planície, aumentando o volume de água e diminuindo a ação do vento sobre a turbidez;
- 3) A região 3 se mostra com um padrão de turbidez muito parecido com o da região 2. A diferença é que a região 3 já se encontra no estado 3, ou seja, estado em que o nível da água na planície está subindo. Foi observado que na transição do estado 2 para o estado 3 a turbidez cai e quando a água começa a entrar com mais intensidade do rio Amazonas para a planície, gera-se uma turbulência capaz de elevar novamente a turbidez na planície.
- 4) A região 4 chama a atenção por apresentar um valor muito alto de turbidez de forma isolada, isto é, apenas uma única medida do SIMA, neste estado, apresentou tal turbidez. Provavelmente, no momento em que o sensor de turbidez foi realizar a medida, uma pluma de sedimento passou pelo sensor, e este alto valor de turbidez foi registrado. Mas ressalta-se que é um evento isolado e não é comum encontrar valores altos de turbidez como este no estado 3;
- 5) Por último, a região 5 que mostra uma queda acentuada da turbidez no estado 1 do sistema. Ou seja, com a subida da água no seu máximo a turbidez deixa de ser alta, devido ao processo de decantação das partículas em suspensão na planície, fazendo com que as partículas que antes impediam a passagem da luz passem para o fundo da planície.

Na escala espaço-temporal, a resposta da turbidez ao pulso de inundação também foi observada (Figura 4.#2). Aqui o enfoque muda. Ou seja, nessa escala o que importa é a distribuição espacial e temporal da turbidez na planície. Aqui se observa como é a resposta da turbidez ao pulso de inundação no espaço.

De forma geral, foi possível observar que no estado 4 (vazante) a turbidez na planície ainda se encontra baixa, mas com uma tendência a aumentar. Quando no estado 2, a turbidez aumenta e se concentra principalmente na região noroeste da planície. De acordo com Barbosa (2005) a região noroeste é a mais rasa da planície, sendo influenciada pela ação direta do vento (Alcântara *et al.*, 2006).

Já no estado 3 (enchente), a turbidez decresce e a mancha de alta turbidez na região noroeste diminui consideravelmente. Barbosa (2005) explica que no início da enchente a água entra na planície preferencialmente pelo leste através de uma conexão com o rio Amazonas, e logo em seguida ocorre a entrada de água por canais situados na região norte e noroeste da planície. Isso explica em parte o motivo pelo qual ocorre uma diminuição da turbidez nessa região. Ou seja, o rio Amazonas “injeta” água na planície com menor concentração de material em suspensão, e com o aumento de volume a turbidez tende a decrescer. Mas os canais se mostram com alta turbidez por causa do atrito causado pela passagem da água do rio Amazonas para a planície com as margens dos canais.

No estado 1 a turbidez se mantém mais uniforme, mas ainda se mantém maior na região noroeste da planície. Mostrando que não ocorre uma parada da entrada da água da planície pelos canais a noroeste, revelando que nessa época possivelmente a vazão é maior do que na enchente, como foi mostrado por Barbosa *et al.*, (2006).

5. Considerações Finais

- O estudo da turbidez através das duas escalas (ponto-temporal e espaço-temporal) oferece resultados semelhantes no tocante ao objeto de estudo, mas diferentes na análise;
- Os resultados confirmam a hipótese de que a turbidez responde através da variação de sua magnitude ao pulso de inundação;
- Os dados de turbidez *in-situ* medidos pelo SIMA são de suma importância para o entendimento da variação da turbidez numa escala temporal fina (1 hora);
- O MLME mostrou ser uma ferramenta interessante para o estudo da turbidez, através da decomposição da reflectância do sinal da água em end-members;
- Mesmo com a resolução espacial do sensor MODIS (250 m) foi possível observar as variações de turbidez na planície.

Referências bibliográficas

Alcântara, E.H.; Barbosa, C.C.F.; Stech, J.L.; Shimabukuro, Y.E.; Novo, E.M.L.M. Turbidity Scalar Trend and Flood Pulse at the Curuai Lake Floodplain System. In: 10th LBA-ECO Science Team Meeting, 4-6 October, Brasilia, **Proceedings**...Brasilia. 2006.

Amorim, M.A. **Estudo da Sedimentação Recente na Várzea do Lago Grande de Curuai, Pará, Brasil**. 2006. 150 p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2006.

Barbosa, C.C.F. **Sensoriamento Remoto da dinâmica de circulação da água do Sistema Planície de Curuai/ Rio Amazonas**. 2005. 282 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

Barbosa, C.C.F.; Rurdoff, C.M.; Stech, J.L.; Novo, E.M.L.M. Channel Sensitivity Between Amazon River and Lake Curuai System. In: 10th LBA-ECO Science Team Meeting, 4-6 October, Brasilia, **Proceedings**...Brasilia. 2006.

Dosseto, A.; Bourdon, B.; Gaillardet, J.; Allègre, C.J.; Filizola, N. Time scale and conditions of weathering under tropical climate: Study of the Amazon basin with U-series. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 70, n.1, p. 71-89, january 2006.

Dunne, T.; Mertes, L.A.; Meade, R.H.; Richey, J. & Forsberg, B.R. Exchanges of sediment between the floodplain and channel of the Amazon River in Brazil. **GSA Bulletin**. v, 110, n. 4, p. 450 – 467, 1998.

Filizola, N.P. **O fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Bacia Amazônica brasileira.** Brasília-DF:ANEEL, 1999. 63 p.

Goodin, D.G., Han, L., Fraser, R.N., Rundquist, D.C., Stebbins, W.A.; Schalles, J.F. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v, 59, n. 4, pp. 505-510, April 1993.

Hutchinson, G.G. **A treatise on limnology. I Geography, physics, and chemistry.** New York, John Wiley. 1957. 1015 p.

Junk, W. J., Bayley, P. B. & Sparks, R. E.. The flood pulse concept in river-floodplain systems. *In*: D. P. Dodge (ed.), Proceedings of the International Large River Symposium. **Can. Spec. Publi. Fish. Aquat. Sci.** 106. 1989.

Kloiber, S.M; Brezonik, P.L; Olmanson, L.G; Bauer, M.E. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. **Remote Sensing of Environment**. v. 82, n. 1, p. 38-47, September 2002.

Margalef, R. **Limnologia.** Barcelona: Omega. 1983. 1009 p.

Mertes, L. A. K.; Dunne, T.; Martinelli, L.A. - Channel-floodplain geomorphology along the Solimões-Amazon River, Brazil. *Geol. Soc. of America Bull.*, vol. 108, p. 1089-1107, 1996.

Mollinier, M.; Guyot, J.L.; Callede, J.; Guimarães, V.; Oliveira, E.; Filizola, N. Hydrologie du basin amazonien. *In*: **Environnement et developement en Amazonie brésilienne.** 1997. They H (ed.). Berlin: Paris; 24-41.

Moreira-Turcq, P.F.; Jouanneau, B.; Turcq, B.; Seyler, P.; Weber, O. & Guyot, J.L. Carbon sedimentation at Lago Grande de Curuaí, a floodplain lake in the low Amazon region: insight into sedimentation rates. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. v. 214, p. 27-70, 2004.

Stevenson, M.R., Lorenzetti, J.A., Stech, J.L. & Arlino, P.R.A., 1993: SIMA – An integrated environmental monitoring system. **Anais...** VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, Brazil 4: 300–310.

Torrence, C.; Compo, G.P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 79, n.1, p. 61-78, 1998.

Wetzel, R.G. **Limnology: lake and river ecosystems.** 3^o edição. Academic Press, an Elsevier Imprint. 2001. 1006p.