

## Distribuição sazonal de fitoplâncton no Lago Grande de Curuai em resposta ao pulso de inundação do Rio Amazonas a partir da análise de imagens MODIS

Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo<sup>1</sup>  
Cláudio Clemente Faria Barbosa<sup>1</sup>  
Ramon Morais de Freitas<sup>1</sup>  
John Melack<sup>2</sup>  
Yosio Edemir Shimabukuro<sup>1</sup>  
Waterloo Pereira Filho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{evlyn, ramon,yosio}@ltid.inpe.br  
{claudio@dpi.inpe.br}

<sup>2</sup>Bren School of Environmental Science and Management  
University of California, Santa Barbara, CA 93106, USA  
melack@lifesci.ucsb.edu

<sup>3</sup>Universidade Federal de Santa Maria  
Departamento de Geociências - Prédio 17 – 97111-970 – Santa Maria – RS, Brasil  
waterloo@base.ufsm.br

**Abstract.** This paper reports an experiment carried out to assess seasonal changes in phytoplankton distribution in the Amazon floodplain lakes. In this study, a mixing model algorithm was applied to MODIS reflectance single date images acquired at critical Amazon River stages: rising (April), high (June), low (December). Results showed striking changes in lake and river surface occupied by phytoplankton patches among rising, high and lower water stages.

**Palavras-chave:** remote sensing, image processing, limnology, sensoriamento remoto, processamento de imagens, limnologia

### 1. Introdução

A maior parte dos trabalhos sobre a produção primária da Várzea amazônica é baseada principalmente em dados da Amazônia Central, região compreendida grosseiramente entre a confluência do Jutai e o estreitamento do canal do Rio Amazonas em Óbidos. Esses trabalhos sugerem que a produção fitoplanctônica é apenas uma pequena fração da produção das florestas inundáveis e das plantas aquáticas (Junk, 1984; Junk et al., 1989; Junk e Piedade, 1997; Piedade et al., 2000). Estudos isotópicos realizados por Forsberg et al. (1993) mostraram, entretanto, que o conteúdo de carbono presente na alimentação de peixes da região, indicava uma participação maior do fitoplâncton do que a suposta pela produção fitoplanctônica. De acordo com esses autores, esses resultados sugeriam que produção algal dos lagos amazônicos deveria ser mais bem investigada e a sua magnitude reavaliada.

O principal problema para estudar essa questão é a dimensão e a complexidade dos lagos amazônicos, sujeitos a oscilações da descarga do rio Amazonas, a regimes de precipitação distintos, e a alternância de vazão máxima entre tributários do hemisfério Sul e do hemisfério norte. Além da variabilidade do ambiente da planície, há que se adicionar também a própria complexidade da distribuição do fitoplâncton que se caracteriza pela ocorrência na forma de

manchas “patches” descontínuas no espaço e no tempo, o que torna sua amostragem muito difícil.

O presente artigo descreve uma estratégia adotada para superar essas dificuldades a partir do uso de técnicas de sensoriamento remoto. Esse trabalho apresenta os resultados preliminares de um estudo que vem sendo realizado na planície amazônica, cujo objetivo é quantificar a biomassa fitoplanctônica a partir de modelos semi-empíricos que relacionem a concentração de clorofila *a* (um indicador de biomassa) e propriedades espectrais extraídas de imagens do sensor MODIS a bordo do satélite Terra. O primeiro passo dessa pesquisa foi investigar se as imagens do sensor MODIS, mais especificamente o produto MOD09 teriam sensibilidade para detectar as variações na distribuição fitoplanctônica em função das variações do pulso de inundação do rio Amazonas.

## 2. A Área de Estudo

A área selecionada para esse estudo é formada por um conjunto de lagos os quais, durante o período de nível máximo da hidrógrafa, coalescem e dão origem a grandes lagos contínuos como o Lago Grande de Curuai (**Figura 1**).

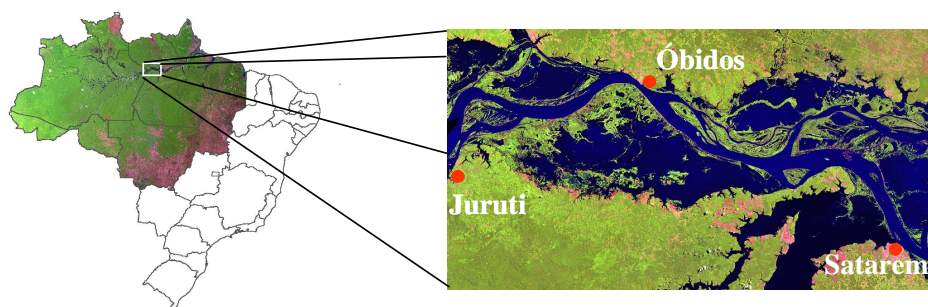


Figura 1– Área de Estudo: Planície do Lago Grande de Curuai (Fonte: Barbosa et al. (2002)).

O funcionamento desses lagos é amplamente modulado pela flutuação do nível da água em Óbidos. Esta flutuação gera quatro condições dinâmicas ao longo do ano: um período de rápida subida da água entre Janeiro e Fevereiro; um período de inundação, quando o rio Amazonas extravasa na planície e tem seu nível estabilizado entre Abril e Junho; um período de descida da água do rio Amazonas e dos lagos da planície entre Agosto e Outubro; um período de nível mínimo da água em Novembro e Dezembro. Nesse estudo foram utilizadas as imagens adquiridas em Abril (início da fase de estabilização da hidrógrafa), Junho (fim do período de estabilização da hidrógrafa) e Dezembro (nível mínimo da água no Amazonas e conseqüentemente no Lago Curuai).

## 3. Fundamentação Teórica

Os trabalhos iniciais voltados para a aplicação de sensoriamento remoto no monitoramento da distribuição de algas foram realizados em águas oceânicas classificadas como águas do Caso I, ou seja, águas em que o componente responsável pela cor da água eram os pigmentos fitoplanctônicos (Kirk, 1994). As águas continentais, classificadas como águas do Caso II possuem composição mais complexa, e sua cor pode ser determinada por outros tipos de componentes opticamente ativos tais como partículas inorgânicas em suspensão e matéria

orgânica dissolvida de diferentes tipos e em diferentes concentrações relativas. Esta complexidade representa uma limitação à aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, uma vez que se torna extremamente difícil decompor o espectro de reflexão da água em termos de seus componentes opticamente ativos.

Uma das primeiras tentativas de se utilizar imagens do sensor Thematic Mapper do satélite Landsat para quantificar a concentração de sólidos totais em suspensão em sistemas aquáticos continentais foi realizada por Mertes (1994). A autora propôs a aplicação de um modelo de mistura para decompor a refletância da água em proporções de seus componentes opticamente ativos. Utilizou como “elementos puros” ou “endmembers” espectros de campo de sistemas com diferentes concentrações de sólidos suspensos. Apesar de questionável a abordagem adotada, tendo em vista que os endmembers utilizados foram medidos num sistema aquático distinto daquele a que foi aplicada a metodologia, ela suscitou o interesse de Novo e Shimabukuro (1994) que aplicaram a mesma abordagem a espectros medidos em campo, utilizando como endmembers espectros de amostras caracterizadas por alta concentração de clorofila, alta concentração de partículas inorgânicas, e água “pura”. Os resultados indicaram uma alta correlação entre a “fração de clorofila” do espectro de refletância e a concentração de clorofila.

#### 4. Procedimento Experimental

Entre 2002 e 2004, campanhas de campo foram realizadas no Lago Grande de Curuai com o objetivo de se medir os componentes opticamente ativos da água: concentração de partículas inorgânicas (MI), concentração de partículas orgânicas (MO) concentração de clorofila a (Fito), concentração de carbono orgânico dissolvido (COD), e concentração de carbono inorgânico dissolvido (CID).

Para orientar a estratégia de amostragem foram adquiridas imagens MODIS cujas características são apresentadas na **Tabela 1**.

**Tabela 1** - Características do Sistema EOS-MODIS.

Órbita	705 Km, Sól-síncrona, quase polar descendente, cruzando o equador às 10:30 e horário local.
Largura da faixa	2330Km ± 550 em cross-track.
Bandas espectrais	36 bandas, entre 0,405 e 14,385µm com subsistemas de calibração a bordo.
Resolução radiométrica	12 bits
Resolução espacial no nadir	250 m bandas 1 e 2; 500 m nas bandas 3 a 7 ; 1000 m nas bandas 8 a 36.
Período de Revisita	Diariamente para latitudes norte, acima de 30°. A cada dois dias, para latitudes inferiores a 3°.
Precisão da grade de geolocalização	Dentro de 150 m (1 sigma) no nadir
Registro banda a banda, para as bandas de 1-7.	Dentro de 50 m ao longo faixa de imageamento Dentro de 100 m ao longo da direção de imageamento

(Fonte: Adaptado de Justice et al., 2002.).

Embora o sensor MODIS tenha bandas específicas para aplicações oceanográficas, pelas limitações de resolução espacial que oferecem, optou-se por utilizar o produto MOD-09. Esse produto corresponde aos dados de refletância de superfície, e é computado a partir dos níveis

de radiância 1A, nas bandas 1 a 7 do sensor, destinadas aos estudos da superfície terrestre, cujos intervalos de sensibilidade encontram-se descritos na **Tabela 2**. Essas imagens permitiram identificar, em campo, locais em que a havia uma correspondência entre a cor da água registrada na composição colorida normal da imagem MOD09 e a presença de um determinado componente opticamente ativo. Esses locais foram registrados a partir de dados de coordenadas GPS e depois examinados em termos da correspondência entre a cor e o componente opticamente ativo dominante.

**Tabela 2** – Bandas Espectrais do Produto MOD 09

Banda	Largura de Banda	Radiância Espectral
1	620 - 670	21.8
2	841 - 876	24.7
3	459 - 479	35.3
4	545 - 565	29.0
5	1230 - 1250	5.4
6	1628 - 1652	7.3
7	2105 - 2155	1.0

(Fonte: (<http://LPDAAC.usgs.gov> )

As imagens MOD09 foram transformadas para a projeção Lat/Long usando o MODIS Reprojection Tool (<http://lpdaac2.usgs.gov/landdaac/tools/modis/about.asp>) e reamostradas para a resolução de 250 m x 250 m. As imagens originais do MODIS tem resolução radiométrica de 12 bits, mas são disponibilizadas em 16 bits.

Tendo em vista que nesse trabalho a informação relevante encontra-se concentradas em regiões de mais baixa radiância (Kirk, 1994) optou-se por comprimir os dados para 8 bits. Para isso foi utilizada uma ferramenta que permite acomodar a distribuição de refletância da cena ao intervalo de interesse de tal forma a ser minimizada a perda de informação no processo de compressão (Arai, 2003).

Como o interesse do estudo era o de determinar a distribuição de fitoplâncton nos lagos da planície, o primeiro passo no processamento dos dados foi delimitar a região inundável com o auxílio da máscara desenvolvida por Hess et al. (2003). Após a delimitação da planície, a banda 5 do produto MOD09 foi utilizada para gerar uma máscara dos lagos abertos (sem vegetação flutuante). As imagens MODIS foram então confrontadas com os dados de campo e examinadas de modo a se identificar “assinaturas espectrais” representativas de endmembers a serem utilizados na decomposição do sinal de energia refletida pelos lagos. Os três endmembers definidos foram água com baixa turbidez (A), fitoplâncton (F) e partículas inorgânicas (PI). A **Figura 2** mostra o comportamento espectral desses componentes puros selecionados para decompor a refletância dos corpos d’água.

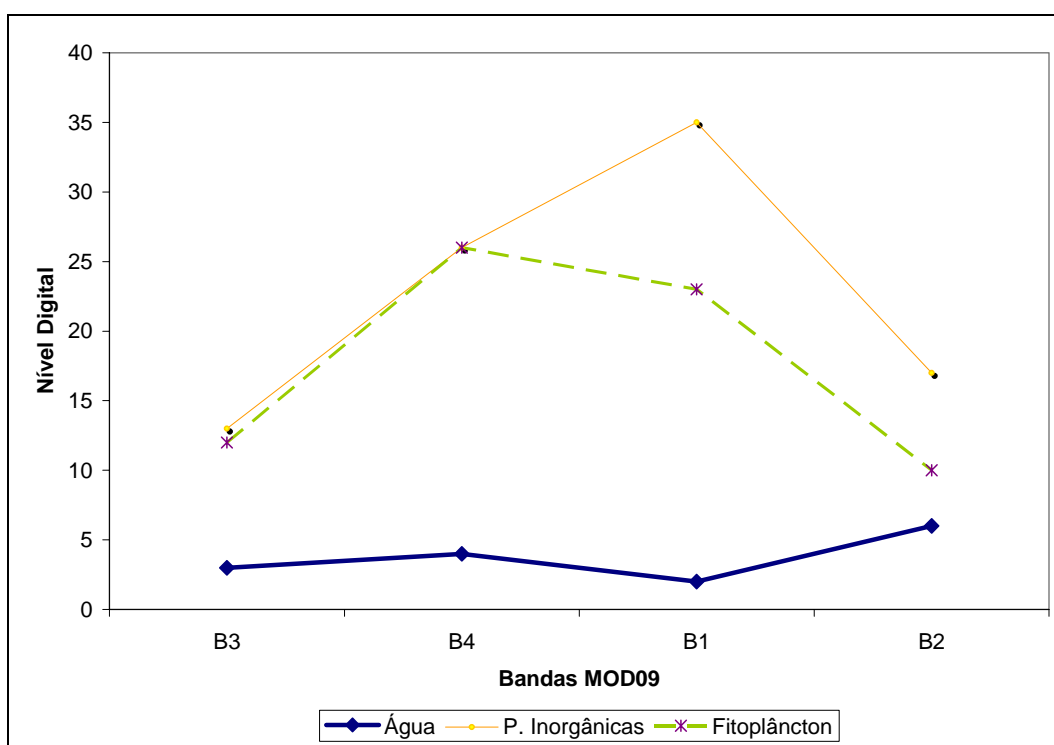


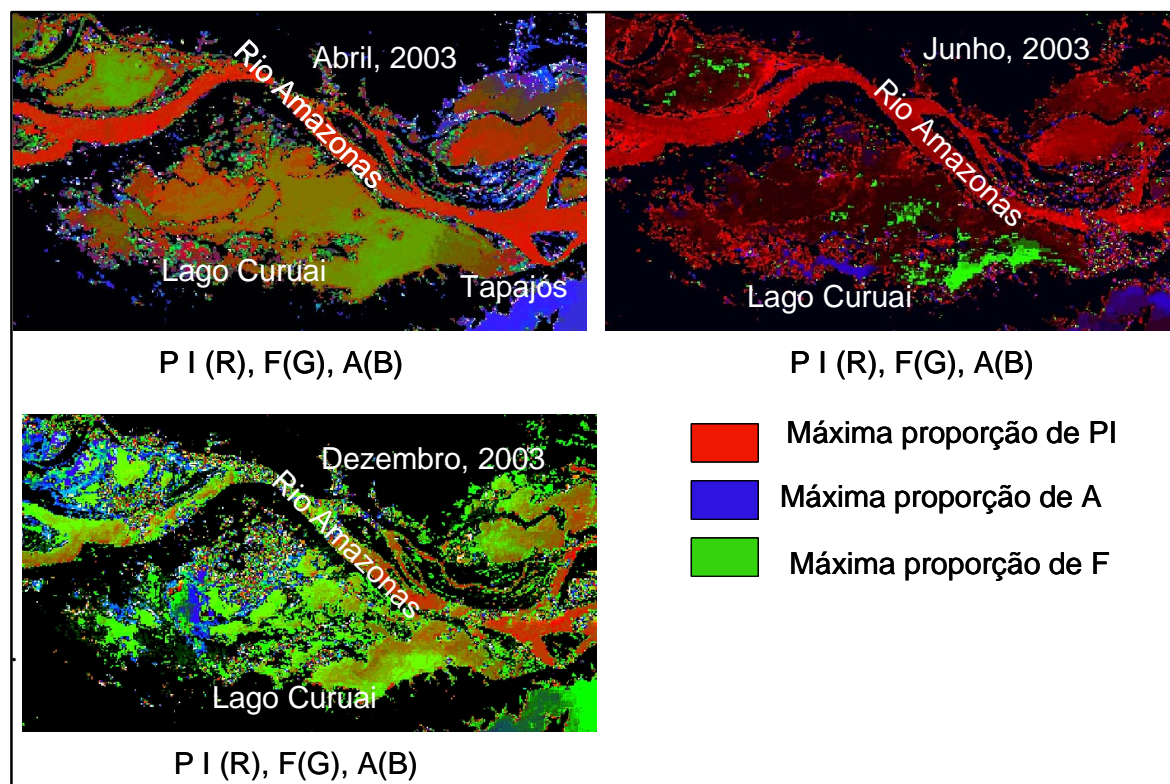
Figura 2 – “Assinatura Espectral” dos endmembers selecionados para decompor a refletância da água.

A análise da Figura 2 mostra que os três componentes puros selecionados para gerar as imagens-fração apresentam comportamento espectral bastante distinto. O comportamento do fitoplâncton é caracterizado por um máximo de refletância (equivalente ao nível digital) na banda B4 que corresponde ao verde e a uma redução da refletância nas regiões do azul (B3) e do vermelho (B1) devido à absorção pelos pigmentos. A absorção no vermelho não é tão acentuada quanto à do azul provavelmente devido ao espalhamento por partículas, inevitável tendo em vista que na natureza o fitoplâncton ocorre em águas com material particulado em suspensão. A distinção entre a resposta espectral de águas com grandes florescimentos de algas e águas com alta concentração de partículas inorgânicas é dada pelo aumento da refletância da fração PI na banda B1, e sua relativamente alta refletância na banda B2 (infravermelho próximo). A fração A (água com baixa turbidez) se distingue claramente das demais pelo espectro plano e pela baixa refletância ao longo de toda a região do visível e infravermelho próximo.

## 5. Resultados

A Figura 3 mostra a composição colorida das imagens fração PI (partícula inorgânica), F (fitoplâncton), e A (água com baixa turbidez) associadas respectivamente às cores Vermelha (R), Verde (G) e Azul (B). Essas imagens foram derivadas da aplicação do modelo linear de mistura às imagens MOD09 referentes aos meses de Abril, Junho e Dezembro de 2003. Nelas os pixels cuja refletância é explicada por uma maior fração ou proporção do efeito do comportamento espectral do fitoplâncton, apresentam valores digitais mais elevados o que resulta na cor verde. Da mesma forma, os pixels com maior proporção de partículas inorgânicas e de água com baixa turbidez, apresentar-se-ão com as cores vermelha e azul, respectivamente.

A análise da Figura 3 permite verificar que em Abril a calha do rio Amazonas aparece na cor vermelha indicando uma alta proporção de partículas inorgânicas em suspensão. Essa época do ano (Figura 4) corresponde a um período em que o rio Amazonas já extravasou para a várzea e está carreando partículas inorgânicas para dentro do lago. Isso provoca um aumento da turbidez da água, mas ao mesmo tempo introduz nutrientes no sistema. Com isso, ao sul do Lago Curuai pode-se observar a ocorrência de grande florescimento do fitoplâncton, o que explica a cor verde. Em Junho, o nível da água já se encontra estabilizado há algum tempo. Com isso, há um processo de decantação das partículas em suspensão, pois a velocidade do fluxo de inundação diminui, fazendo com que grande parte das partículas suspensas se depositem na várzea. O resultado disso, e que na composição de Junho, o rio Amazonas continua caracterizado pela cor vermelha, que indica alta concentração de partículas inorgânicas, mas o Lago de Curuai se torna dominado pela fração A, responsável pela cor escura do lago nessa data. Localmente ocorrem manchas dominadas pela fração PI. A região com alta proporção da fração F fica restrita ao Sul do Lago, onde a água dominante é proveniente do terciário, e corresponde a águas com pequena turbidez, semelhantes às do rio Tapajós.



**Figura 3** – Composição colorida da fração PI (partícula inorgânica), F (fitoplâncton) e A (água com baixa turbidez) associadas às cores Vermelho (R), Verde (G) e Azul (B).

Em dezembro, o Lago de Curuai volta a ser dominado pela fração F, indicando um aumento da participação do fitoplâncton na refletância da água. É interessante observar que mesmo no Rio Tapajós, um rio tipicamente de águas claras e caracterizado pela cor Azul em Abril, há uma dominância da cor verde em Dezembro indicando a presença de grandes patches de fitoplâncton nessa época do ano. Mesmo no rio Amazonas, há indícios de um aumento da fração F. Esse aumento no rio Amazonas, entretanto, precisa ser mais bem investigado tendo em vista a contaminação por nuvens nessa época do ano.



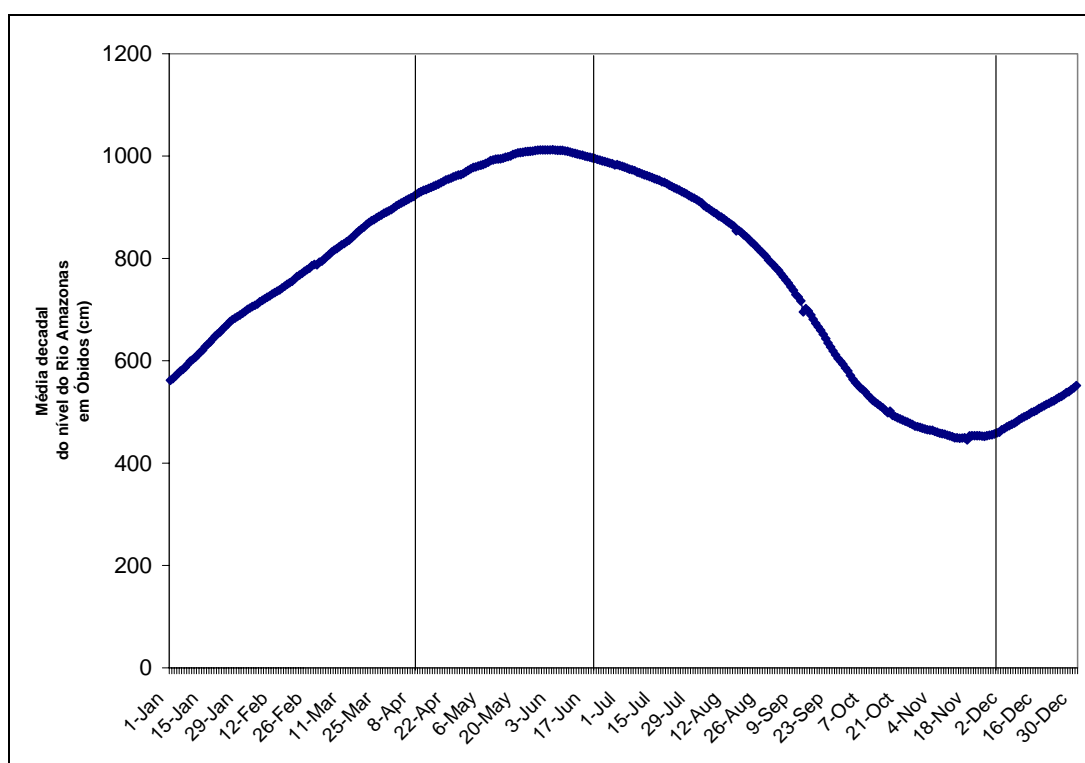


Figura 4 – Cota Média Decadal do Rio Amazonas em Óbidos. (as linhas pretas representam os meses para os quais foram geradas as composições de frações PI, F e A).

## 6. Conclusão

Os resultados preliminares desse trabalho indicam que o modelo de mistura pode ser uma ferramenta de grande utilidade para a avaliação qualitativa da distribuição de fitoplâncton nos lagos da planície do rio Amazonas. Os resultados indicam que, apesar de as bandas do sensor MOD09 não serem as mais adequadas para a caracterização da composição da água, essa limitação é compensada pelo uso do modelo de mistura que permite decompor seu espectro de refletância em seus componentes puros.

## Referências Bibliográficas

Arai, E. Convegatif. Relatório Técnico. INPE, São José dos Campos, 2003.

Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L.M., Costa, M. Remote Sensing for Sampling Station selection in the study of water circulation from river system to and Amazon floodplain lakes: a methodological proposal. II Conferência Científica Internacional do Experimento LBA, Manaus (AM), julho de 2002.

Forsberg, B.R; Araujo-Lima, C.A.R.M; Martinelli, L.A.; Victoria, R.L.; Bonassi, J.A. Autotrophic carbon sources for fish of the Central Amazon. **Ecology** 74(3): 643-652, 1993.

Hess LL, Melack JM, Novo EM et al. (2003) Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, 87, 404–428.

Junk, W.; Piedade, M. T. **Plant life in the floodplain with special reference to herbaceous plants**. In: The Central Amazon Floodplain. Ecological Studies 126. Springer, 1997.

Junk, W.J. Ecology of the várzea, floodplain of Amazonian white-water rivers. In: **The Amazon: Limnology and Landscape Ecology of a Mighty Tropical River and its Basin**, Dr. W.Junk Publishers, Dordrecht, Boston, Lancaster. 215-24, 1984.

Junk, W.J.; Bayley, P.B.; Sparks, R.E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic**, 106: 110-127, 1989.

Justice, C.O.; Vermote, E.; Townshed, J.R.G.; DeFries, R.; Roy, D.P.; Hall, D.K.; Salomonson, V.V.; Privette, J.L.; Riggs, G.; Strahler, A.; Lucht, W.; Myneni, R.B.; Knyazikhin, Y.; Running, S.W.; Nemani, R.R.; Wan, Z.; Huete, A.R.; van Leeuwen, W.; Wolfe, R.E.; Giglio, L.; Muller, J.P.; Lewis, P.; Barnsley, M.J. The moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36(4): 1228-1247, 1998.

Kirk, J. T. O. **Light & photosynthesis in aquatic ecosystems** Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 2ed. 509p.

Mertes, L. A. K. 1994. Rates of flood-plain sedimentation on the central Amazon River. **Geology**22:171-174.

Novo, E.M. L. M.; Shimabuluro, Y.E., 1994, Spectral mixture analysis of inland tropical waters. *International Journal of Remote Sensing*, 15(6):1354-1356, 1994.

Piedade, M.T.F.; Junk, W.J.; Parolin, P. The flood pulse and photosynthetic response of trees in a white water floodplain (várzea) of the Central Amazon, Brazil. **Verh. Internat. Verein. Limnol.** (27):1-6, 2000.