

## Monitoreo espacial y temporal del estado trófico de los lagos de planicies de inundación en la Amazonía central mediante sensores remotos

María del Carmen.Mendoza España<sup>12</sup>

Jean Michel Martinez<sup>23</sup>

Patricia Moreira-Turcq<sup>2</sup>

Marie.Paule Bonnet<sup>23</sup>

Raúl Espinoza Villar<sup>3</sup>

Alcira Villagra de Gamundi<sup>1</sup>

Gwenaël Abril<sup>2</sup>

Patrick Seyler<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Tucumán UNT  
San Lorenzo 4000 – San Miguel de Tucumán, Argentina  
{mmendozaespana, alcytucu03}@yahoo.com

<sup>2</sup> Institut de Recherche pour le Développement - IRD  
Caixa Postal 7091 Lago Sul 71635-971 Brasilia - DF, Brasil  
{martinez, Patricia.Turcq, marie-paule.bonnet, gwenael.abril, patrick.seyler}@ird.fr

<sup>3</sup>Universidade de Brasilia, Instituto de Geociências  
Campus Darcy Ribeiro, 70910900 Brasilia (DF), Brasil  
raulev@unb.br

**Abstract.** This work aims at monitoring the trophic state of floodplain lakes in the Amazon central plain using remote sensing data acquired over a 10-year period. Six field sampling campaigns were realized from 2008 to 2010 to collect water samples for chlorophyll-a concentration assessment and hyperspectral radiometric measurements. Field radiometry was used to simulate MODIS sensor bands and to understand the sensitivity of satellite images to pigment concentration. Radiometric measurements supports the idea that combination of MODIS green and red spectral bands may be efficient to monitor the chlorophyll-a minimum absorption peak near 560 nm but also the presence of inorganic suspended matter. Excellent correlation is found between simulation of MODIS green and red band combination and chlorophyll-a concentration. Based on ground observations, we processed 862 MODIS Terra and Aqua on-board sensors using MOD09/MYD09A1 8-day composites. Trophic state for each lake was defined using Carlson index modified for tropical areas based on chlorophyll maps derived from MODIS images. Lakes permanently connected with the Amazon River show predominantly oligotrophic/mesotrophic conditions while lakes occasionally connected to the river main stream show much variability oscillating more frequently between mesotrophic and eutrophic states. Link between floodplain eutrophication and river hydrology is investigated demonstrating the crucial role of hydrological extreme events such as the strong drought of 2005 and the flood of 2009.

**Palabras clave:** water color, MODIS, eutrophication, hydrology, spectroradiometry, limnology, color del agua, MODIS, eutrofización, hidrología, espectroradiometría, limnología

### 1. Introducción

Una de las principales aplicaciones de los sensores remotos sobre las aguas continentales, son los estudios de monitoreo espacial y temporal tendientes a estimar la calidad de aguas (Schalles et al., 1998). En tal sentido, es posible estudiar dos aspectos: el grado de eutrofización y el estado trófico de los lagos. El primero se refiere al aumento de ocurrencia de las floraciones algales que pueden ser tóxicas y perjudicar la calidad de las aguas (Lamparelli, 2004) y el segundo se refiere a la variación de la productividad de algas. La concentración de la clorofila *a* en el agua es usada como un indicador del nivel trófico en los ambientes acuáticos (Toledo, 1990) y al mismo tiempo es una de las variables detectada por las bandas de satélite.

Las planicies de inundación representan ambientes asociados a las dinámicas hidrológicas de los ríos. Al ser estos ambientes extensos y complejos, su estudio demanda el uso de satélites con mayor resolución espacial y temporal. Varios estudios en la región amazónica usando series temporales de imágenes MODIS, MERIS y LANDSAT fueron desarrollados por Martinez et al. (2003) y Martinez et al. (2004) en monitoreo de sedimentos y calidad de aguas. Por otra parte, también fueron realizados estudios específicos en la misma región sobre la distribución de fitoplancton (Novo et al., 2005) y de clorofila *a* (Novo et al., 2006) usando imágenes MODIS.

Este trabajo pretende estimar el estado trófico de los lagos de planicies de inundación Curuaí, Parú y Camaçari, y evaluar la dinámica espacial y temporal a partir de series de datos MODIS relacionadas con la hidrología para un periodo de diez años.

## 2. Metodología de trabajo

### 2.1 Area de estudio

Los lagos Curuaí, Parú y Camaçari se localizan en la región central de la Amazonía brasilera (Figura 1). La várzea de Curuaí enmarcada entre los 01° 50' y 02° 15' S y los 55° 00' y 56° 05' O, está localizada en la planicie baja del río Amazonas, al sur de la población de Óbidos en el Estado de Pará. Es una planicie extensa de aproximadamente 3600 Km<sup>2</sup>, delimitada al norte por el río Amazonas y al sur por tierra firme. Esta várzea está formada por más de 20 lagos, los que en su mayoría son de aguas blancas, interconectados entre sí temporalmente o conectados permanentemente al río principal, por pequeños canales (Bonnet et al., 2008). Los lagos seleccionados para este estudio corresponden a 3 regiones de la várzea de Curuaí: (1) la región de lagos influenciada permanentemente por el Río Amazonas (2) la región central y (3) la región que se extiende al este de la várzea (Figura 1).

El Lago Camaçari, descrito por Ferreira de Faria (2010) corresponde a un lago de aproximadamente 600 km<sup>2</sup> que deriva del río Urubu, y se caracteriza por presentar una mezcla de aguas negras y blancas. El área ocupada por este lago es compartida por el Municipio de Silves (90%) y las áreas pertenecientes a Itacoatiara (10%). Al norte este lago limita con el lago de Sacará donde se encuentra la isla de Silves, al este limita con un inmenso banco de arena de la várzea que lo separa del río Amazonas y al oeste con una pequeña península e islas localizadas en el margen derecho del río Urubu (Figura 1).

El Lago Paru es un lago de aproximadamente 200 km<sup>2</sup> compartido entre los municipios de Oriximiná y Óbidos. Se encuentra al noroeste de la várzea de Curuaí (Figura 1). Este lago se encuentra desconectado del río Amazonas en periodo de aguas bajas.

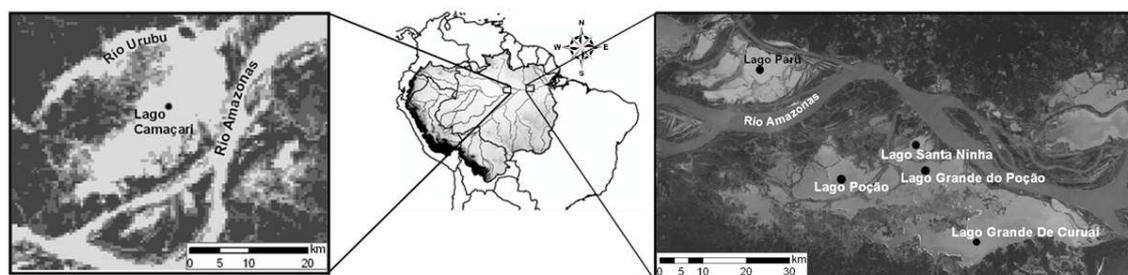


Figura 1. Ubicación de los lagos Curuaí, Paru y Camaçari en la región central de la Amazonía brasilera

### 2.2 Datos disponibles

Para este estudio fueron utilizados: (1) Datos de concentración de clorofila *a*, obtenidos durante 4-6 campañas realizadas entre los años 2009 y 2010. (2) Datos hidrométricos de niveles de agua para la estación de Óbidos obtenidos a partir de la Red de estaciones ANA para un periodo de 10 años. La extracción de la clorofila *a* obtenida durante las campañas se

realizó con etanol caliente (96%) y su cuantificación fue efectuada mediante fluorimetria, en el laboratorio de Geoquímica (LAGEQ) de la Universidade de Brasilia (UnB).

### 2.3 Espectrorradiómetro de campo y mediciones radiométricas

Entre los años 2008 y 2010 fueron realizadas 6 campañas de mediciones radiométricas en los lagos de la planicie. Para tal fin, fue utilizado un espectrorradiómetro de campo compuesto por 3 sensores TRIOS *optical* que operan en un rango de entre 350 y 900 nm y con una resolución de 2nm (Figura 2). Se efectuaron mediciones de irradiancia y radiancia. La irradiancia ( $E_d$ ) fue medida por el sensor en posición vertical ( $\text{Watt/m}^2$ ) que calcula el flujo radiante incidente (luz solar directa + luz difusa del hemisferio superior) que penetra en la columna de agua. Los dos sensores en posiciones oblicuas midieron la radiancia ( $L_t$ ) ( $\text{Watt/m}^2/\text{esterradiano}$ ) que corresponde a la energía retro-dispersada por el agua.

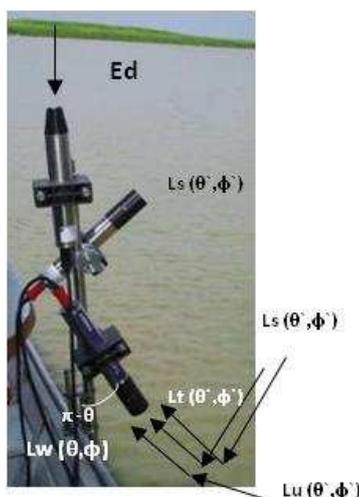


Figura 2. Espectrorradiómetro compuesto por 3 sensores y detalle de las mediciones de irradiancia y radiancia de acuerdo a Froidefond & Doxaran (2004).

El sensor que se encuentra por debajo mide  $L_w$  que es la suma de la radiancia que proviene del agua ( $L_u$ ) más la radiancia difusa reflejada por la superficie del agua ( $L_t$ ). Como ambas no son dissociables, se estima  $L_s$  que es la radiancia original antes de la reflexión por la superficie y se utiliza una estimación *a priori* del coeficiente de reflexión  $\rho$  de la interfase aire-agua, el que es próximo al coeficiente de Fresnel. El parámetro  $\rho$  es generalmente fijado al valor 0.02 (2% de reflexión). La radiancia relevante es  $L_u$ , la verdadera radiancia que sube del agua. Así la reflectancia medida en el campo fue calculada a través de la Ecuación 1

$$R = (L_t - \rho L_s) / E_d \quad (1)$$

En la figura 3 se presentan dos espectros de reflectancia radiométrica obtenidas con esta metodología. La curva de picos menos pronunciados corresponde al río Amazonas mientras que la curva de picos más acentuados correspondería a la várzea. Estas curvas permiten distinguir los valores de absorción de los feopigmentos y de la clorofila *a*, que a su vez, coinciden con la posición de las bandas 2 (verde) y 3 (roja) de MODIS. El mínimo de absorción está representado por una mayor reflectancia, que tiene lugar en la banda verde para la clorofila *a*. En contraste, el máximo de absorción disminuye la reflectancia y se presenta en la banda roja para los feopigmentos y la clorofila *a*. En base a las observaciones de estas diferencias, se seleccionaron estas para determinar la presencia de floraciones de algas. Se efectuó la división de la banda verde entre la banda roja, obteniéndose como resultado una

relación que debería ser proporcional a la concentración de pigmentos. De esta manera, una relación  $< 1$  debería indicar concentraciones bajas de clorofila  $a$  mientras que una relación  $\geq 1$  indicaría mayores concentraciones de clorofila  $a$  y por lo tanto indicaría la presencia de floraciones de algas.

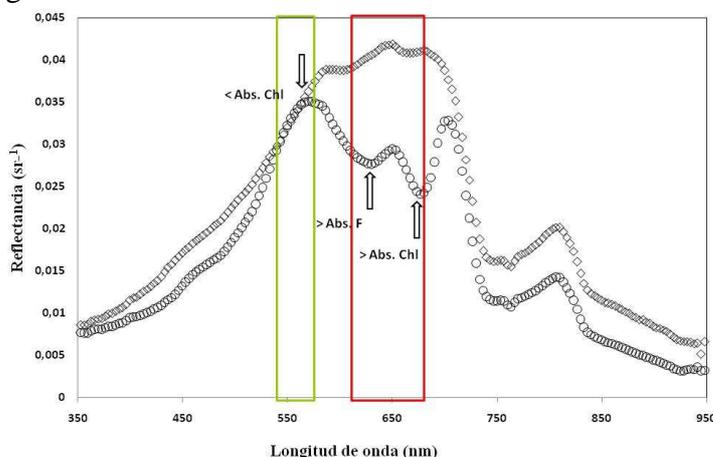


Figura 3. Espectros de reflectancia radiométrica en los que se muestran los valores máximos y mínimos de absorción de los pigmentos fotosintéticos en las bandas 2 (verde) y 3 (roja) de MODIS, estimados en la várzea de Curuaí y en el río Amazonas

## 2.4 Procesamiento y calibración de las imágenes de satélite

Fueron empleadas imágenes MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) producto MOD09 de reflectancia superficial colección 5 con correcciones atmosféricas, para los satélites Terra (MOD09A1) y Aqua (MYD09A1). Estos productos previamente calibrados presentan 7 bandas radiométricas medidas con una resolución espacial de 500 m, ofreciendo una cobertura casi diaria sobre las áreas tropicales. Los datos de reflectancia MODIS compuestos de 8 días fueron adquiridos a partir de la base de datos específicos GETMODIS del proyecto HYBAM (Hidrología y Geoquímica de la Cuenca Amazónica) desde marzo del año 2000 hasta octubre del año 2010. Un total de 862 imágenes fueron procesadas utilizando el software MOD3R (*MODIS River Reflectance Retrieval*) desarrollado por el IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*) para la extracción de la reflectancia sobre los puntos de interés. Las imágenes de ambos satélites fueron fusionadas seleccionando la de mejor calidad para cada fecha, con el fin de obtener una serie temporal completa. Criterios de calidad integraron el efecto de *sun glint*, la presencia de aguas negras, el efecto de la vegetación y las hiperconcentraciones de sedimento. Sobre esta serie de imágenes fusionadas se aplicaron los algoritmos utilizando relaciones de bandas.

## 2.5 Cálculo del índice de estado trófico

Fue utilizado el índice de estado trófico de Carlson (1977) modificado por Toledo (1990) IET(m) para lagos tropicales. Los valores del índice fueron estimados a partir de la concentración de clorofila  $a$  utilizada como única variable de diagnóstico. Las clases de estado trófico fueron determinadas relacionando los valores calculados por el IET(m) comparadas con los datos de satélite.

## 3. Resultados y discusión

La simulación de bandas permitió determinar 3 clases de estado trófico como se muestra en la Figura 4. La clase hipereutrófica fue deducida a partir de la ecuación de la recta resultante. Los valores de satélite estimados se presentan en la Tabla 1. Los valores del IET(m)  $< 1$  correspondieron a los estados oligotrófico y mesotrófico mientras que, los valores del IET(m) correspondieron a los estados eutróficos e hipereutróficos. De acuerdo Carlson (1977) y

Toledo (1990) las clases de estado trófico están basadas en el criterio de productividad, en este caso, cuantificada a través de la concentración de clorofila *a* que según estas condiciones se refieren a lagos de baja, media y elevada productividad.

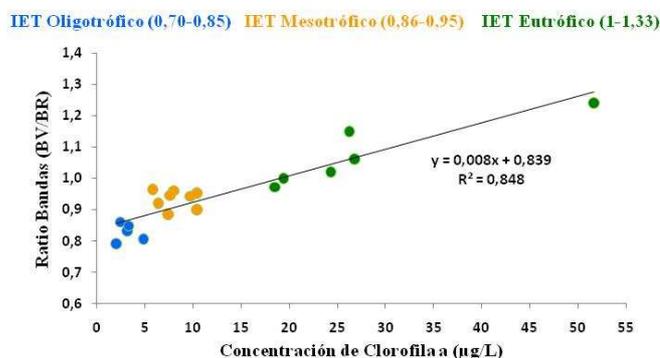


Figura 4. Determinación del estado trófico de los lagos estudiados mediante simulación de bandas. Campañas 2009 y 2010.

Tabla 1. Criterios y valores del Índice de Estado Trófico de Carlson modificado por Toledo (1990) y valores estimados por satélite

Criterio	Estado Trófico	Clorofila a [µg/L <sup>-1</sup> ]	Ratio de bandas (BV/BR)
<44	Oligotrófico	<3,81	0,73 - 0,85
> 44 - ≤ 54	Mesotrófico	3,82 - 10,34	0,86 - 0,95
> 54 - ≤ 74	Eutrófico	10,35 - 76,06	1,0 - 1,33
>74	Hipereutrófico	>76,06	>1,33

### 3.1 Evaluación del estado trófico de los lagos de la planicie

La serie temporal de datos MODIS analizada permitió inferir que el estado trófico de los lagos fue variable inter e intra-anualmente para un periodo de 10 años. En la figura 5 se presenta la variación del estado trófico estimada en porcentajes de ocurrencia anual para 6 lagos representativos. En la várzea de Curuaí, los lagos influenciados permanentemente por el río Amazonas fueron clasificados como oligotróficos a mesotróficos, mientras que los lagos de la región central y región este de la várzea fueron clasificados como mesotróficos a eutróficos. El lago Santa Nina (figura 5a) presentó condiciones oligotróficas dominantes en los 10 años que comprendió el monitoreo. Este lago que mantiene un contacto permanente con el río Amazonas y una mayor proximidad a través de canales de conexión cortos es altamente influenciado por las características propias del río, entre estas una baja productividad y una alta concentración de sedimentos (Amorim et al., 2009). Estas condiciones fueron detectadas por satélite, con valores de ocurrencia de entre 60 y 90% para cada año (Figura 5a) que correspondió al periodo de crecida de las aguas hasta el inicio de las aguas altas. Según Maurice Bourgoïn et al. (2007) en este periodo el río que ingresa a la várzea incrementa las concentraciones de materia en suspensión en los lagos de aguas blancas que están conectados directamente al mismo. El carácter mesotrófico fue observado en todos los lagos (Figura 5) para cada año y en un periodo inter-anual. Los datos de satélite mostraron un incremento en más del 50% desde el año 2006 hasta el presente. Estas condiciones fueron observadas al inicio del periodo de aguas altas que corresponde a la estación seca, fase durante la cual se produce una mezcla entre las aguas de los dos sistemas río-várzea, existiendo además, una contribución de los tributarios del río principal y los aportes desde tierra firme con lo cual se da inicio a la producción primaria en Pérez (2008).

Los lagos eutróficos fueron dominantes en la región central y región este de la várzea de Curuaí (Figura 5b, 5c y 5d) estas regiones fueron definidas por Martínez y Le Toan (2007)

como regiones de aguas abiertas permanentes representando la mayor área inundable observada en la várzea. Los resultados obtenidos en este trabajo confirmaron que los estados eutrófico e hipereutrófico se mantienen en los “grandes lagos” mientras que, estudios realizados por Novo et al. (2005) y Novo et al. (2006) mediante satélite en la várzea de Curuaí reportaron altas concentraciones de clorofila *a* y una distribución mayor del fitoplancton en esta área. Los porcentajes de eutrofia detectados fueron del 50% entre los años 2000 y 2004 observándose también durante estos años condiciones hipereutróficas reducidas. Contrariamente, a partir del año 2006 se registró una fuerte reducción de esta condición llegando hasta menos de un 10% en todos los lagos (Figura 5c y 5d). Cabe destacar, que en algunos años esta condición no fue encontrada (Figura 5b). Los periodos en los que ocurrieron estas condiciones coincidieron con los de aguas altas, hasta el periodo de aguas bajas. Por otra parte, las condiciones hipereutróficas fueron mejor observadas en los periodos de aguas bajas.

Los lagos Camaçari y Paru fueron también clasificados como mesotróficos a eutróficos. En el lago Camaçari (Figura 5e) los datos de satélite mostraron que ambas condiciones se mantuvieron en un 50% para cada año, a excepción del año 2009, durante el cual el lago se tornó oligotrófico a mesotrófico. Según Ferreira de Faria (2010) aún siendo este lago fuertemente influenciado por el Río Urubu, cuando el nivel de las aguas del Río Amazonas pasa su límite, el lago se encuentra enteramente ligado a este. Por consiguiente, el evento de máxima inundación registrado ese año en la región pudo haber alterado su estado trófico. El comportamiento trófico del lago Parú (Figura 5f) fue similar al comportamiento del lago Grande de Curuai (Figura 5d). El comportamiento de este lago se debió posiblemente a su ubicación en sobrerrelieve con respecto al río Amazonas siendo poco influenciado por este.

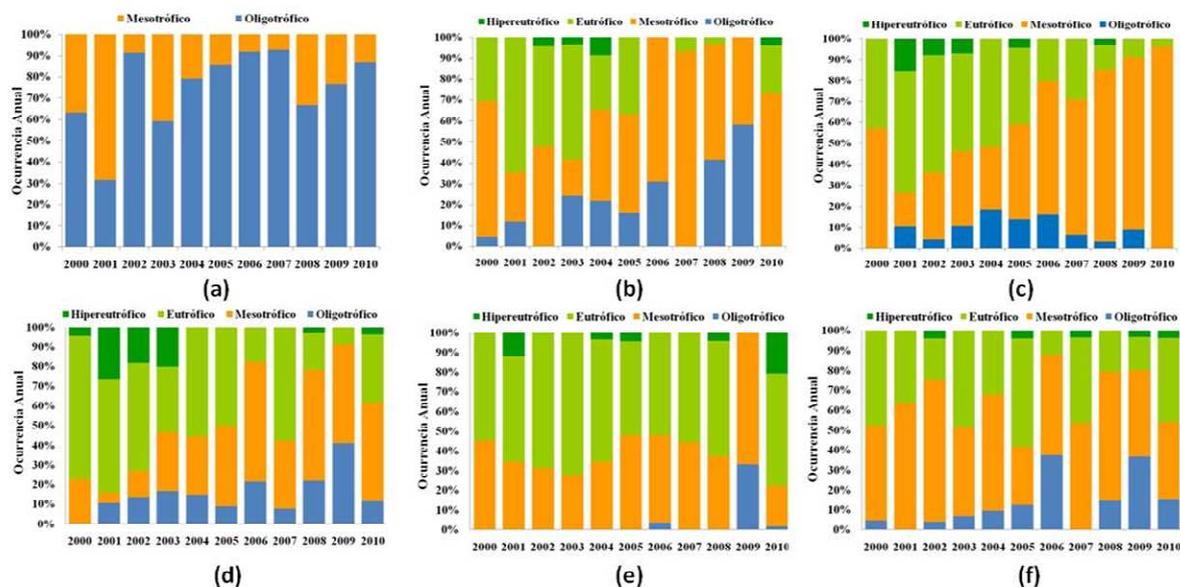


Figura 5. Estado trófico de los lagos de la planicie de inundación. (a) L.Santa Ninha; (b) L. do Poção; (c) L.Grande Norte; (d) L. Grande Sur; (e) L. Camaçari; (f) L. Parú.

En la Figura 6 se muestra la relación entre la permanencia de los *blooms* de algas y la dinámica hidrológica del río Amazonas en Óbidos (ANA). Se consideran dos parámetros hidrológicos, uno de máximo nivel de inundación y otro de nivel bajo extremo. Al mismo tiempo se diferencian dos variaciones cíclicas, cada una con una duración de 5 años. Durante el primer ciclo en la várzea de Curuaí las floraciones de algas permanecieron hasta 16 semanas en el periodo de máxima inundación a diferencia del periodo de aguas bajas cuya permanencia aproximada fue de 7 semanas. En el lago Camaçari (Figura 6d) los *blooms* tendieron a permanecer entre 20 y 21 semanas en algunos años, mientras que en el lago Parú (Figura 6e) su permanencia fue alrededor de 15 semanas. El segundo ciclo se caracteriza por

una reducción drástica e irregular del tiempo de permanencia de los *blooms* en todos los lagos (Figura 6). Estas variaciones podrían estar relacionadas a eventos extremos que se inician a finales del 2005 con un nivel de agua extremadamente bajo en la región, para continuar el año 2006 y particularmente el año 2009 con máximos niveles de inundación. Según Schöngart y Junk (2007) las condiciones extremas relacionadas con los índices ENSO (El Niño-*Southern Oscillation*) como el evento del El Niño en su fase cálida, afectaría el pulso de inundación en la planicie produciendo una reducción de la fase acuática, por el contrario, el evento de La Niña en su fase fría provoca niveles máximos y prolongados de inundación. De acuerdo con Marengo et al., (2008) el evento de sequía extrema del año 2005 estuvo asociado a la elevada temperatura del océano Atlántico tropical norte y no así, al índice ENSO.

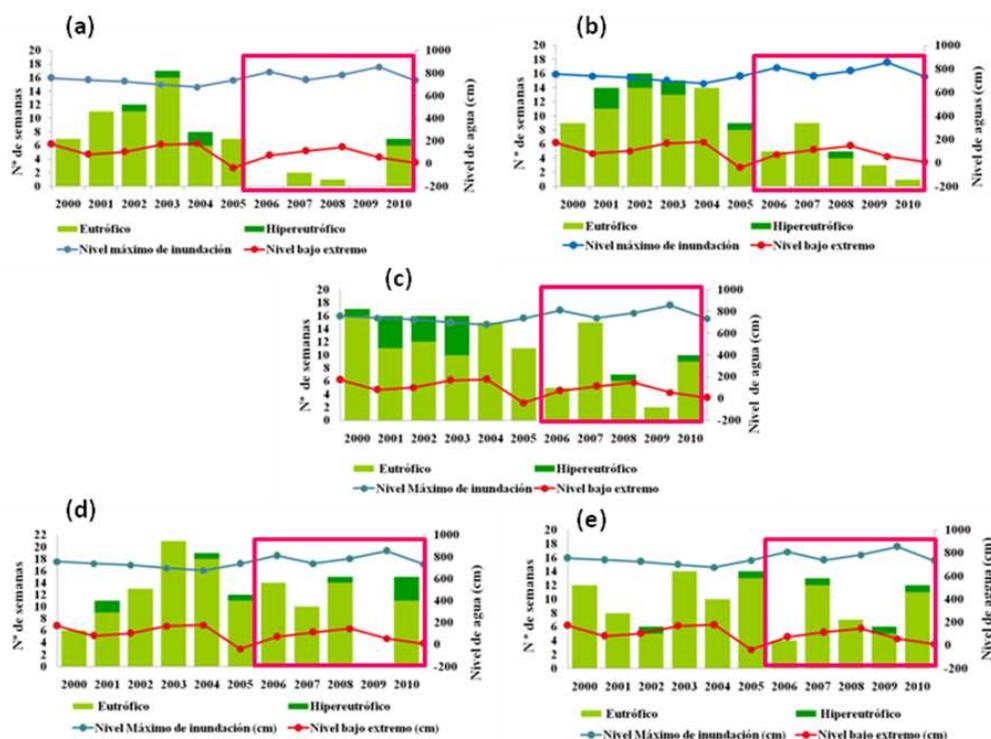


Figura 6. Relación entre la presencia de floraciones algales y la dinámica hidrológica (a) L. do Poçoão; (b) L. Grande Norte; (c) L. Grande Sur; (d) L. Camaçari; (e) L. Parú.

#### 4. Conclusiones

El uso de sensores remotos permitió clasificar los lagos de la planicie de inundación, según su estado trófico y monitorear sus variaciones a nivel espacial y temporal para una década. Los lagos clasificados como oligotróficos a mesotróficos fueron aquellos que mantienen relación directa con el río principal. Los “grandes lagos” en la várzea, así como, los lagos próximos a la misma fueron clasificados como mesotróficos a eutróficos, exhibiendo también condiciones hipereutróficas. Las condiciones de eutrofia permitieron establecer una relación entre la permanencia de floraciones de algas y la dinámica hidrológica. A través de las series temporales MODIS fue posible establecer variaciones cíclicas a lo largo de una década, que podrían estar asociadas a eventos climáticos extremos en la región.

#### Agradecimientos

Este trabajo fue realizado a través de los proyectos: CNPQ-IRD “Biogeoquímica de los Lagos de Várzea en la cuenca Amazónica” y “Estudio y modelaje de las transferencias de agua, de sedimentos y de los elementos químicos entre las zonas inundables (várzeas) y el curso principal de los ríos de la Amazonía”. También contó con el apoyo de los proyectos: SAMSAT (CNES - Agencia Espacial Francesa) y CARBAMA (ANR).

#### Referências Bibliográficas

Amorim, M.A.; Moreira-Turcq, P.F.; Turcq, B. J. & Cordeiro, R. C. Origem e dinâmica da deposição dos sedimentos superficiais na Várzea do Lago Grande de Curuaí. **Acta Amazonica**. 39 (1) :165-172, 2009.

Bonnet, M.P.; Barroux, G.; Martinez, J.M.; Seyler, F.; Moreira-Turcq, P.; Cochonneau, G.; Melack, J.M.; Boaventura, G.; Maurice-Bourgoin, L.; León, J.G.; Roux, E.; Calmant, S.; Guyot, J.L.; Seyler, P. Flooding hydrology in an Amazonian floodplain lake (Lago Grande de Curuai). **Journal of Hydrology**, v. 349, n.1-2, p. 18-30, 2008.

Carlson, R. E. A trophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**, 22:361-369,1977

Ferreira de Faria, I. Gestão territorial e mapeamento participativo na Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) de Sacará Piranga/Silves-AM. Em: VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física e II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física, 5.,2010, Portugal. **Actas...** Coimbra: CEGOT, 2010. Comunicações, p. 12.

Froidefond, J.M; Doxaran, D. Télédétection optique appliquée à l'étude des eaux côtières **Télédétection**, vol. 4, n° 2, p. 579-597 . 2004

Lamparelli, M.C. Graus de trofia em corpos d'água do Estado do São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento.2004. 235p. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004.

Marengo, J.A.; Nobre, C.A.; Tomasella, J.; Oyama, M.D.; Sampaio De Oliveira, G.; De Oliveira, R.; Camargo,H.; Alves, L. M.; Foster Brown, I. The Drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, vol. 21, p.495-516. 2008

Martinez, J.M.; Maurice-Bourgoin, L.; Kosuth, P.; Seyler, P.; Guyot, J.L. Analysis of multitemporal MODIS and Landsat 7 images acquired over Amazonian floodplain lakes for suspended sediment concentrations retrieval In: IGARSS'03 2003, Toulouse, France.

Martinez, J.M.; Maurice-Bourgoin, L.; Moreira-Turcq, P.; Guyot, J.L. Use of MODIS and MERIS data for the water quality monitoring of Amazonian rivers and floodplain lakes. In: LBA Third International Conference, 2004, Brasilia, Brazil.

Martinez, J.M.; Le Toan, T. Mapping of flood dynamics and vegetation spatial distribution in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. **Remote Sens. Environ**, doi : 10.1016/j.rse.2006.11.012.

Maurice-Bourgoin, L.; Bonnet, M.P.; Martinez, J.M.; Kosuth, P.; Cochonneau, G.; Moreira-Turcq, P.; Guyot, J.L., Vauchel, P.; Filizola, N.; Seyler, P. Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuaí floodplain and the Amazon River, Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 335, p. 140-156, 2007

Novo, E.L.M.M.; Barbosa, C.C.F.; Freitas, R.M.; Shimabukuro, Y.E.; Melack, J.M.; Pereira-Filho, W. Seasonal changes in chlorophyll distribution in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. **Jap. J. Lim**. 2006, 7, 153-161.

Novo, E.L.M.M.; Barbosa, C.C.F.; Freitas, R.M.; Melack, J.M.; Shimabukuro, Y.E.; Pereira-Filho, W. Distribuição sazonal de fitoplâncton no Lago Grande de Curuai em resposta ao pulso de inundação do rio Amazonas a partir de imagens MODIS. In: **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2005, Goiânia, INPE, 2005, p.3175-3182.

Pérez Pérez, M.A. Biogeoquímica da Várzea do Lago Grande de Curuaí, Ríó Amazonas, Pará, Brasil: Caracterização, origem, ciclagem e destino do material orgânico e inorgânico. 2008. 274 p. Tese (Doutorado em Geoquímica Ambiental) – Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2008.

Schalles, J.F.; Gitelson, A.A.; Yacobi, Y.Z.; Kroenke, A.E. Estimation of chlorophyll *a* from time series measurements of high spectral resolution reflectance in an eutrophic lake. **J. Phycol.** 34, p. 383-390, 1998.

Schöngart, J.; Junk, W.J. Forecasting the flood-pulse in Central Amazonia by ENSO-indices. **Journal of Hydrology**, v. 335, p.124- 132, 2007

Toledo, Jr., A.P. Informe preliminar sobre os estudos para obtenção de um índice para a avaliação do estado trófico de reservatórios de regiões quentes tropicais. São Paulo, CETESB, 12 p. (Relatorio Interno) 1990.