

Base de dados bio-ópticos como suporte a estudos de ambientes aquáticos por sensoriamento remoto.

Cláudio Clemente Faria Barbosa¹
Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo¹
Renato Martins Passos Ferreira¹
Lino Sander de carvalho¹
Carolline Tressmann Cairo¹
Fernando Bezerra Lopes³
Carlos Alberto Sampaio Araújo¹
Jose Luiz Stech¹
Enner Ancantara²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{rmpf; evlyn; stech}@dsr.inpe.br; claudio@dpi.inpe.br

² Universidade Estadual Paulista – FCT/UNESP
19060-900 - Presidente Prudente - SP, Brasil
enner@fct.unesp.br,

² Universidade Federal do Ceará – UFC
Caixa Postal 6003, CEP 60455-970, Fortaleza, CE, Brasil
lopesfb@yahoo.com.br

Abstract. The Amazonian floodplain has more than 8,000 lakes larger than one hectare of which less than 1% has been adequately studied. Given that the Brazilian electric power matrix is predominantly hydroelectric, the area flooded by the 150 largest reservoirs is nearly 45000 km². The anthropogenic impacts in the Amazonian floodplain lakes as well as the net carbon budget in hydroelectric reservoirs are not well known and needs to be determined and monitored. Due to these aquatic system dimensions, its monitoring is only feasible by means of remote sensing. This work presents ongoing efforts and preliminary results for building a dataset which represents the first and the most comprehensive bio-optical information available on Brazilian inland waters to support the development of remote sensing algorithms for monitoring of aquatic systems. From 2012 to 2014 thirteen field campaigns were carried out in five hydroelectric reservoirs representing different Brazilian biomes, in a irrigation and domestic water supplier reservoir located in the semi-arid region and in Amazonian floodplain lakes. On average, 25 stations were sampled at each site and the following profiles were acquired: absorption, attenuation, scattering and backscattering coefficients, radiances/irradiances spectra above and in-water. Water samples were collected concurrently with profiles for determining concentrations of optically active constituents, CDOM absorption and specific coefficients of algal and non algal particulate. These data are being used to support the development of graduate student in order to foster the scientific development in the remote sensing of inland waters.

Palavras-chave: águas interiores, constituintes óticamente ativos, dados bio-ópticos.

1. Introdução

A água é um recurso natural essencial à vida em geral, e à vida humana, em particular. Ela também é essencial para o desenvolvimento econômico e o bem estar social, os quais dependem da disponibilidade hídrica das nações. Aproximadamente 12% da água doce disponível para uso na terra, circulam pelo território brasileiro. Em função desta disponibilidade hídrica, o Brasil possui um grande número de ecossistemas aquáticos artificiais e naturais de grandes dimensões. A área inundada pelos 150 maiores reservatórios hidroelétricos do Brasil é de aproximadamente 45 10³ km². Estimativas realizadas por Sippel et al. (1992) indicam a existência de mais de 10 mil lagos com área superior a um hectare (1 ha) na planície de inundação da bacia amazônica, dos quais menos de 1% foram estudados adequadamente.

Se por um lado esta disponibilidade hídrica deixa o Brasil numa posição privilegiada, por outro coloca um grande desafio; como monitorar e usar de forma sustentável estes recursos. Por exemplo, os impactos ambientais e em particular, o balanço de carbono nos reservatórios hidroelétricos não são bem conhecidos, e precisam ser determinados e monitorados, pois além de renovável, é importante que as fontes de energia sejam também limpas. A bacia amazônica e seus sistemas aquáticos, dado as suas dimensões e biodiversidade afetam e são afetados por processos globais e regionais. Previsões recentes sobre os efeitos de mudanças climáticas na região amazônica sugerem um aumento na temperatura e na frequência e intensidade de eventos extremos (secas e cheias), com diversas consequências para a biota e a biogeoquímica locais (Foley et al. 2002; Malhi et al., 2008; Marengo et al., 2011).

A composição das massas d'água tem relação direta com o funcionamento dos processos ecológicos e biogeoquímicos que ocorrem nos sistemas aquáticos, visto que a composição atua como um indicador da disponibilidade de luz para fotossíntese, da disponibilidade de nutrientes, além de responder aos efeitos das atividades humana na bacia de captação destes sistemas. Então, a composição de suas massas de água pode ser usada como uma "proxy" para o monitoramento destes sistemas aquáticos. Entretanto, dado número e as dimensões destes ecossistemas e as dimensões continentais do Brasil, estudos e monitoramentos destes ambientes, só serão viáveis em escala nacional com o apoio do sensoriamento remoto orbital.

Vários estudos foram realizados nos últimos anos com auxílio do sensoriamento remoto com o objetivo de desenvolver metodologias para entender, mapear e monitorar a dinâmica de composição das massas de água e o estado trófico de ambientes aquáticos brasileiros. Modelos empíricos e semi-empíricos foram desenvolvidos a partir de relações estatísticas entre os constituintes da água e medidas espectro-radiométricas adquiridas acima da água. Estes estudos permitiram caracterizar os padrões de composição das massas de água, sem, no entanto descrever, analisar e caracterizar a composição espectral do campo de luz subaquático, informação essencial, por exemplo, para estimar a produtividade primária em ambientes aquáticos. Além disto, os modelos empíricos não têm abrangência temporal, o que demanda a realização de campanhas de campo para calibração, uma vez que os mesmos são válidos somente para o conjunto de dados para os quais foram desenvolvidos.

Para uma melhor compreensão dos processos ecológicos, biogeoquímicos e estados trófico destes ambientes, é fundamental uma caracterização biótica abrangente, que inclua dados da coluna d'água, como por exemplo, medidas de propriedades óticas inerentes (coeficientes de absorção, atenuação, espalhamento, retro-espalhamento, coeficientes de absorção específicos de clorofila, de particulados e do material orgânico colorido dissolvido (CDOM)), medidas das propriedades aparentes (refletância de sensoriamento remoto, coeficiente de atenuação difuso, cosseno médio, etc), determinação das concentrações dos constituintes óticamente ativos (COA), e medidas de parâmetros limnológicos (oxigênio dissolvidos, pH, turbidez, condutividade elétrica, etc).

A disponibilidade destes parâmetros viabiliza o desenvolvimento de modelos analíticos que permitem não só estimar as concentrações dos constituintes das massas de água, mas também determinar o campo de luz subaquático, a profundidade da zona eufótica e os coeficientes de atenuação difusa que são essenciais para compreensão de processos, como a produtividade primária nos ecossistemas aquáticos. Além disto, a abrangência temporal dos modelos analíticos também tornaria mais fácil a operacionalização do monitoramento sistemático destes ambientes a partir de dados de satélite de observação da Terra, além de reduzir o custo de calibração dos modelos. Para que isso se torne realidade, contudo, torna-se fundamental uma base de dados bio-ópticos dos corpos d'água brasileiros, que cubra uma grande amplitude de variação de suas propriedades.

Com o objetivo de construir esta base de dados, nosso grupo de pesquisa investiu nos últimos anos não só no levantamento, na especificação, e na busca de recursos para compra

dos equipamentos necessários, mas também na capacitação da equipe para operação e processamento dos dados adquiridos com os equipamentos, e na fundamentação teórica para o desenvolvimento de modelos analíticos, que incluiu um curso duas semanas sobre a teoria de transferência radiativa no meio aquático, ministrado pelo Dr. Curtis Mobley, um dos maiores especialistas no assunto. Nos últimos três anos com recursos de vários projetos foram comprados equipamentos, organizado um Laboratório de Instrumentação de Sistemas Aquáticos (<http://www.dsr.inpe.br/labisa/>) e realizadas campanhas de campo em cinco reservatórios e em lagos da planície de inundação amazônica em várias fases do ano hidrológico.

O objetivo deste artigo é apresentar os esforços em andamento para a construção, segundo os protocolos internacionais de coleta e processamento dos dados (NASA/TM-2000-209966), da primeira base abrangente de dados bio-ópticos representativa da diversidade das águas continentais brasileiras.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Áreas de estudo

Para que as propriedades bio-ópticas coletadas fossem representativas das massas de água continentais brasileiras, cinco reservatórios localizados em diferentes regiões e bacias hidrográficas brasileiras, um açude no sertão cearense, e lagos natural da planície de inundação amazônica foram selecionados inicialmente. A Figura 1 mostra a localização, os nomes e as dimensões dos sistemas aquáticos selecionados.



	Local	Área (km ²)	Bioma
1	Tucuruí	2.430	Amazônico
2	Três Marias	1.040	Cerrado
3	Funil	40	Mata Atlântica
4	Ibitinga	114	Atlântica/Cerrado
5	Itaipu	1.350	Mata Atlântica
6	Planície Curuai	2000	Amazônico
7	Açude Orós	190	Caatinga

Figura 1 - Localização geográfica dos sistemas aquáticos amostrados.

O reservatório de Tucuruí, com uma área de 2430 Km² esta localizado na bacia Amazônia e foi construído (entre 1976 e 1984) a partir do represamento do rio Tocantins no estado do Pará. O reservatório de Três Marias com uma área inundada de 1040 Km² está localizado na região sudeste, no estado de Minas Gerais em uma região de transição entre o bioma mata atlântica e o bioma cerrado. Foi construído entre 1957 e 1962 a partir do represamento do curso superior do rio São Francisco. O reservatório de Funil, que entrou em operação em 1969, foi construído a partir do represamento do curso médio do rio Paraíba do Sul, em Itatiaia RJ, o qual resultou em uma área inundada de 40 km². O Reservatório de Ibitinga, terceiro do sistema de cascata do rio Tietê, esta localizado no médio Tietê, possui uma extensão aproximada de 70 km e área alagada de 114 km². O Reservatório de Itaipú, construído no Rio Paraná, na fronteira entre Brasil e Paraguai, tem área alagada de 114 km². A planície do lago grande de Curuai, com área de 2000 km² está localizada no médio amazonas, próximo a cidade de Óbidos, a 900 km do oceano atlântico e é constituída por 30 lagos interconectados e com alguns canais que fazem ligação com o rio amazonas. O açude Orós, com área de 190 km², foi concluído em 1961 na bacia do Alto Jaguaribe, bioma caatinga, com a finalidade de perenizar o rio Jaguaribe visando o abastecimento da população das regiões do Jaguaribe e Metropolitana de Fortaleza.

2.2 Parâmetros selecionados e Metodologia de Amostragem

A seleção dos parâmetros para compor a base de dados tomou como referência o documento NASA/TM-2000-209966 que lista os principais parâmetros *in situ* necessários e os desejados para validação de dados de satélites sobre ambientes aquáticos, e para desenvolvimento e validação de algoritmos para monitoramento destes ambientes.

A metodologia de amostragem, processamento e documentação dos dados foi mantida a mesma para todos os locais (reservatórios e lagos). Devido às dimensões das áreas amostradas, para que houvesse representatividade das propriedades bio-ópticas das diferentes massas de água presentes em cada uma delas, o esquema amostral seguiu metodologia descrita em Barbosa et al. (2010), a qual se baseia na análise de uma série temporal de imagens TM/LandSat-5. O número de estações amostrais variou de 22 a 32 em função do tamanho e do número de massas de água espectralmente distintas identificadas em cada local. Em campanhas com duração de 6 a 8 dias, amostras de água foram coletadas concomitante com a realização de perfis da coluna de água, utilizando medidores de absorção e atenuação, um conjunto de até seis espectro-radiômetros inter-calibrados, um medidor de retroespalhamento, um medidor de condutividade, temperatura e pressão, disco de Secchi e uma sonda com sensores de pH, turbidez, oxigênio dissolvido, temperatura da água e condutividade.

2.3 Determinações das concentrações dos Constituintes Óticamente Ativos (COA)

As amostras de água foram coletadas em subsuperfície e mantidas resfriadas em caixas de isopor com gelo até o momento da filtragem, que ocorreu em até 4 horas após a coleta. Filtros Whatman GF/F de poro 0.7 μm foram utilizados para filtrar amostras de água para a determinação da concentração de clorofila-a e feofitina de acordo com Nusch (1980). Para determinação de material suspenso (total e frações orgânica e inorgânicas), de acordo com Wetzel e Likens (1991), amostras de água foram também filtradas utilizando filtros GF/F de poro 0.7 μm pré-calcinados, pré-pesados. Carbono orgânico e inorgânico dissolvidos foram determinados pelo método de análise de gás por infravermelho, onde a amostra de água é passada ao estado gasoso por combustão não dispersiva a 680^oC, através do Analisador de Carbono Orgânico Total – SHIMADZU, modelo TOC-5000.

2.4 Coeficientes de absorção espectral total e específicos dos COA

Um espectrofotômetro Shimadzu 2600 de feixe duplo, com varredura de 300 a 800 nm, com incremento de 1 nm foi utilizado para medidas de densidade ótica (OD) de amostras para posterior determinação dos coeficientes de absorção espectral de CDOM ($a_{CDOM(\lambda)}$), do particulado total ($a_{TSM(\lambda)}$) e das frações algal ($a_{chl(\lambda)}$) e particulado não algal ($a_{NAP(\lambda)}$), segundo métodos descritos por Tassan, (2002). Para $a_{CDOM(\lambda)}$ medidas de densidade ótica (OD) de amostras de água filtradas em filtros de poros de 0,22 μm foram realizadas e os espectros de $a_{CDOM(\lambda)}$ determinados de acordo com a equação 1.

$$a_{CDOM}(\lambda) = \frac{2.3}{l} [OD_{s(\lambda)} - OD_{null}] \quad \text{Equação 1}$$

Onde l é o comprimento da cubeta (0.1 m) e OD_{null} a densidade ótica em um comprimento de onda onde a absorção por CDOM é assumida como zero (valor médio entre 700–800 nm).

Para as absorções específicas de $a_{TSM(\lambda)}$, $a_{chl(\lambda)}$ e $a_{NAP(\lambda)}$, uma esfera de integradora foi acoplada ao espectrofotômetro e foram medidas as ODs dos filtros com o material particulado total e após a remoção da fração algal com o uso da técnica quantitativa de transmitância-refletância (Tassan, 2002). Para a remoção do material pigmentado, após a medida da OD de $a_{TSM(\lambda)}$, uma solução de hipoclorito de sódio a 10% foi utilizada seguindo Ferrari & Tassan, (1999). Desta forma, a absorção da fração do material não algal $a_{NAP(\lambda)}$, inclui detritos

orgânicos e particulados inorgânicos. As densidades óticas (OD) foram então convertidas para absorções e a absorção da fração algal determinada pela diferença da absorção total do particulado pela absorção da fração não algal ($a_{chl(\lambda)} = a_{TSM(\lambda)} - a_{NAP(\lambda)}$). Finalmente a absorção total em laboratório é obtida pela soma da absorção do particulado total com a absorção do CDOM ($a_{TLab(\lambda)} = a_{TSM(\lambda)} + a_{CDOM(\lambda)}$).

2.5 Medidas das Propriedades óticas inerentes (POI)

Os perfis dos coeficientes de atenuação [$c(\lambda)$] e absorção [$a(\lambda)$] espectral nos reservatórios foram realizados com um medidor de absorção e atenuação (AC-S) de caminhos óticos de 25 cm, enquanto nos lagos da planície de inundação amazônica, devido a alta atenuação na coluna d'água, foi necessário utilizar um equipamento com caminhos óticos de 10 cm. Os coeficientes espectrais foram adquiridos com resolução de aproximadamente 4 nm, na faixa entre 400 e 700 nm até a profundidade correspondente ao limite da zona eufótica. Os equipamentos foram programados para aquisição em modo contínuo com taxa de amostragem de 4 Hz. Os perfis espectrais de espalhamento são obtidos de forma direta, pela subtração da absorção da medida de atenuação [$b(\lambda) = c(\lambda) - a(\lambda)$]. Perfis do coeficiente de retroespalhamento (b_b) foram determinados para seis comprimentos de onda (420, 442, 470, 510, 590 e 700nm) a partir de medidas da função de espalhamento volumétrica, para o ângulo de 140° . A taxa de amostragem também foi definida em 4 Hz.

Os dados adquiridos com os AC-S, conforme sugerido pelo fabricante, estão sendo submetidos a protocolos de correção de temperatura (Pegau et al., 1997), espalhamento no tubo de absorção (Zaneveld et al., 1994) e a análises de consistência. Devido ao grande volume de dado gerado, rotinas estão sendo desenvolvidas, adaptadas e testadas em Matlab para aplicação de forma eficiente dos protocolos de correção.

Em águas interiores, onde geralmente a atenuação é bem mais alta que em águas oceânicas, os valores de retroespalhamento são subestimados durante o processo de medida, e também estão sendo submetidos a protocolos de correção Sigma, utilizando medidas corrigidas de atenuação, conforme metodologia descrita em Carvalho et al. 2014.

2.6 Medidas das Propriedades óticas Aparentes (POA)

As medidas espectralradiométricas (radiâncias e irradiâncias descendentes e ascendentes acima e na coluna d'água) foram realizadas por um conjunto de seis espectralradiômetros Ramsés TriOS, com faixa de operação entre 320 e 950nm e resolução de 3,3 nm. Três sensores, um coletor cosseno e dois com campo de visada de 7° foram posicionados no barco para registrarem a irradiância incidente e radiâncias emergente e difusa na superfície da água. Para minimizar efeitos de reflexão especular o barco foi orientado de maneira a manter ângulos entre 90° e 135° em relação à posição do Sol, e os dois sensores de radiância posicionados com ângulo de visada próximos a 45° em relação ao nadir. Os outros três sensores (dois coletores cossenos e um com campo de visada de 7°) foram instalados em uma gaiola de perfilagem subaquática, para registrarem as irradiâncias ascendente e descendente e radiância ascendente na coluna d'água.

Em cada estação amostral, o seguinte protocolo de medida foi executado: a) a gaiola de perfilagem foi posicionada inicialmente acima da água, próxima a superfície; b) a gaiola foi posicionada em subsuperfície (logo abaixo da interface ar-água); c) e a gaiola foi baixada na coluna d'água, parando de metro em metro, para realização de medidas. Em estações amostrais onde o campo de luz reduzia rapidamente, como em todas as estações nos lagos amazônicos e em algumas em reservatórios, o intervalo de profundidade entre paradas da gaiola foi reduzido para 0,3 metros. Para garantir que o perfil radiométrico contemplasse toda a zona eufótica, baixou-se a gaiola até que a irradiância descendente atingisse um valor menor do que 1% do seu valor de sub-superfície na região do verde (~550 nm). Para reduzir as

oscilações decorrentes dos efeitos de focagem e desfocagem produzidos por ondas, e obter medidas representativas do campo de luz subaquático, quinze leituras simultâneas de todos os sensores foram realizadas em cada posição da gaiola.

3. Resultados e discussão

A Tabela 1 lista os parâmetros coletados durante as campanhas realizadas entre 2012 e 2014 nas seis áreas selecionadas e que farão parte da base de dados bio-ópticos de águas continentais brasileiras. Como as campanhas estavam vinculadas a projetos com prazo de termino definidos, nem todos os parâmetros sugeridos por NASA/TM-2000-209966 foram coletados nas primeiras campanhas, dada a indisponibilidade de alguns equipamentos. Por exemplo, dados de absorção específica por clorofila (a_{chl}^*) e particulado não algal (a_{NAP}^*) e por matéria orgânica colorida dissolvida (a_{CDOM}) não foram determinados nos reservatórios de Tucuruí e Itaipu. Para Tucuruí, não foram feitos perfis de retroespalhamento (b_b) e para Itaipu, não foram feitos perfis de atenuação e absorção, devido a problemas com equipamento.

Tabela 1- Síntese das medidas realizadas em campanhas de campo entre 2012 e 2014 em seis áreas selecionadas. [Te] Temperatura; [Co] Condutividade; [Tu] Turbidez; [OD] Oxigênio dissolvido; [FRB] Fator de refletância bidirecional; [E_s] irradiância incidente; [E_d, E_u] irradiâncias ascendente e descendente na coluna d'água; [L_w] radiância emergente na superfície; [L_u] radiância ascendente durante o perfil; c = atenuação total; a = absorção total; b = espalhamento total; bb retroespalhamento; [Chl-a] clorofila; [TSS] Total de sólidos suspensos; [TSI] Total de Sólidos Inorgânicos; [TSO] Total de Sólidos Orgânicos; [DOC] Carbono Orgânico Dissolvido; [DIC] Carbono Inorgânico Dissolvido; [CDOM] Matéria Orgânica Coloridos Dissolvido; [a_{chl}^*] coeficiente de absorção específico de clorofila; [a_{TSM}^*] coeficiente de absorção específico de particulado total; [a_{NAP}^*] coeficiente de absorção específico de particulado não algal.

	Local	Numero de Campanhas	Período	Numero de estações	Parâmetros medidos
1	Tucuruí	1	24 a 29/11/2012	28	Perfis sonda (Te,Co,pH,OD); Perfis POI (c,a,b) Perfis POA (E_s, E_d, L_w, L_u) COA (Chl-a, TSS, TSI, TSO, DOC, DIC)
2	Três Marias	1	17 a 22/06/2013	22	Perfil sonda (Te,Co,pH,OD); Perfis POI(c,a,b, bb) Perfil POA ($E_s, E_d, L_w, L_u, E_u, E_{sky}$) COA (Chl-a, TSS, TSI, TSO, DOC, DIC, CDOM)
3	Funil	1	11 a 14/08/2014	16	Perfil sonda (Te,Co,pH,OD); Perfis POI(c,a,b, bb) Perfil POA ($E_s, E_d, L_w, L_u, E_u, E_{sky}$) COA (Chl-a, TSS, TSI, TSO, DOC, DIC, CDOM) Específicos ($a_{chl}^*, a_{TSM}^*, a_{NAP}^*$) Duas cadeias de termistores na coluna d'água Uma estação meteorológica durante o campo
4	Ibitinga	6	02/11/2013 06/02 & 26/03 & 13/05 & 16/07 & 18/09/2014		Perfis sonda (Te,Co,pH,OD); Perfis POI(c,a,b, bb) Perfil POA ($E_s, E_d, L_w, L_u, E_u, E_{sky}$) COA (Chl-a, TSS, TSI, TSO, DOC, DIC, CDOM) Específicos ($a_{chl}^*, a_{TSM}^*, a_{NAP}^*$)
5	Itaipu	1	11 a 21 de Março de 2013	22	Perfil sonda (Te,Co,pH,OD); Perfis POI(bb) Perfil POA (E_s, E_d, L_w, L_u) COA (Chl-a, TSS, TSI, TSO, DOC, DIC)
6	Planície Curuai	3	02 a 07/02/2013 11 a 18/08/2013 09 a 15/04/2014	32	Perfil sonda (Te,Co,pH,OD); Perfis POI(c,a,b,bb) Perfil POA ($E_s, E_d, L_w, L_u, E_u, E_{sky}$) COA (Chl-a, TSS, TSI, TSO, DOC, DIC, CDOM) Específicos ($a_{chl}^*, a_{TSM}^*, a_{NAP}^*$)
7	Orós	8	03&06&08&11/2011 02&05&08&12/2012	20	COA (Chl-a, TSS, TSI, TSO, DOC, DIC) POA acima da água (FRB)

3.1 Resultados preliminares

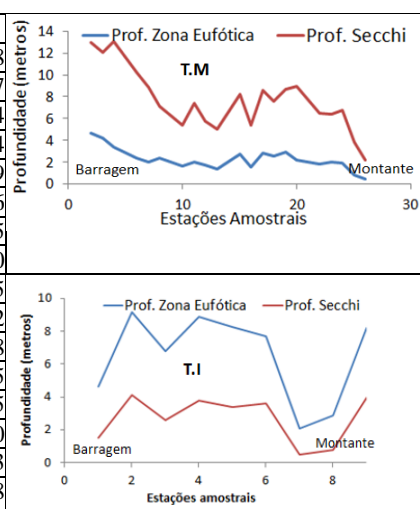
A taxas de amostragem de 4 Hz que foi utilizada nos perfis, para permitir uma filtragem posterior de interferência externa durante a aquisição, resultou em um grande volume de dados. O processamento em planilhas excel de dados de duas áreas, mostrou-se extremamente oneroso em termos de tempo e muito susceptível a erros. Como nossa proposta é construir

uma base de dados bio-ópticos, que deverá aumentar com a inserção futura de novos dados, optamos por desenvolver um conjunto de rotinas para automatizar processamentos padrão de conversão e correção de dados. Estas rotinas estão sendo desenvolvidas e testadas nos dados coletados, e análises de consistência dos resultados estão sendo feitas. Além disso, os protocolos de correções dos dados, que foram desenvolvidos para ambientes oceânicos, estão sendo adaptados com base em publicações que discutem as adaptações destes protocolos para águas continentais.

Resultados preliminares de parâmetros medidos e derivados dos dados processados, dos reservatórios de Três Marias e Tucuruí, estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Estatística descritiva de algumas parâmetros bio-ópticos dos reservatórios de **Tucuruí [TI]** e **Três Marias [T.M.]**. $Z_{eu(1\%)}$ = limite inferior da zona eufótica; $K_d(PAR)$ = coeficiente de atenuação vertical para a irradiação descendente PAR (radiação fotosinteticamente ativa); $c_{(450)}$ = coeficiente de atenuação por feixe em 450 nm, $a_{(450)}$ = coeficiente de absorção por em 450 nm, Chl-*a* = Clorofila-a, TSM = Material Suspenso Total, DOC = Carbono orgânico dissolvido.

Estatística	Reservatório	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Amplitude
$Z_{eu(1\%)}$ [m ⁻¹]	TI	6.17	6.85	1.14	9.42	8.28
	T.M	7.76	7.50	2.19	13.06	10.87
$K_d(PAR)$ [m ⁻¹]	TI	0.99	0.67	0.49	4.03	3.54
	T.M	0.70	0.61	0.35	2.10	1.74
$c_{(450)}$ [m ⁻¹]	TI	4.42	2.32	1.53	13.62	12.09
	T.M	2.52	2.46	1.17	4.92	3.76
$a_{(450)}$ [m ⁻¹]	TI	1.61	0.88	0.68	4.63	3.95
	T.M	0.84	0.60	0.36	4.36	4.00
Temp (°C)	TI	30.56	30.09	29.95	32.20	2.25
	T.M	24.54	24.61	21.03	25.75	4.72
Chl- <i>a</i> (µg/L)	TI	7.19	5.08	2.66	40.45	37.78
	T.M	5.47	4.67	1.17	13.22	12.05
TSM (mg/L)	TI	3.43	1.92	0.26	20.41	20.15
	T.M	4.34	3.33	1.33	11.93	10.60
DOC (mg/L)	TI	2.59	2.59	1.45	9.48	8.03
	T.M	1.95	1.90	0.93	2.71	1.78



Uma análise exploratória dos dados óticos e limnológicos revela que os reservatórios de Tucuruí e Três Marias não são bio-ópticamente homogêneos. Ambos apresentam variabilidade espacial em termos de concentração do COA. Em média as concentrações de Chl-*a*, TSM e DOC para Tucuruí/Três Marias foram, respectivamente 7.19/5.47 µg/L⁻¹, 3.43/4.34 mgL⁻¹, 2.59/1.95 mgL⁻¹. Embora em valores médios não exista diferenças significativas, Tucuruí apresentou maiores amplitudes nas concentrações dos COA. A razão orgânico/inorgânico em Tucuruí (3,1) foi cinco vezes maior do que em Três Marias (0,62). O fato da bacia de drenagem de Tucuruí drenar uma vasta área de floresta, a qual exporta uma grande quantidade de matéria orgânica explica esta diferença.

A última coluna da Tabela 2 mostra os perfis horizontais da profundidade da zona eufótica nos reservatórios de Três Marias e Tucuruí. Enquanto em Tucuruí as maiores profundidades da zona eufótica (≈7.5 metros) ocorreram na região central do reservatório, Três Marias teve os maiores profundidades próximo a barragem (≈13.8 metros), com um decréscimo sistemático em direção a entrada do rio.

4. Conclusões

O trabalho aqui apresentado, devido às dimensões continentais do Brasil e a sua diversidade de massas de água, deve ser visto como um passo inicial de uma atividade de médio e longo prazo que pavimentará o caminho para a construção de modelos analíticos pois permitirá a construção de uma base de dados bio-ópticos, abrangente e de qualidade, que dê conta da amplitude e complexidade das águas continentais brasileiras. Espera-se que esta base de dados

amplie com a integração de novos dados, coletados em outros sistemas aquáticos continentais brasileiros. Em função disto, é essencial manter uma mesma sistemática, seguindo protocolos internacionais definidos para aquisição e processamento de dados para desenvolvimento e validação de algoritmos para monitoramento ambientes aquáticos por sensoriamento remoto. Entretanto, vale ressaltar que estes protocolos, desenvolvidos para aplicação em águas oceânicas, precisam ser adaptados e validados para diversidade das águas interiores brasileiras. Outro fator essencial para a qualidade da base de dados é capacitação da equipe envolvida na aquisição e processamento dos dados. Este esforço está sendo encarado pelo nosso grupo de pesquisa como uma antecipação de demandas futuras, dada a disponibilidade do sensor OLI/LandSat 8 e principalmente os novos sensores, com bandas espectrais adequadas para estudos de corpos de água, previstos nas missões Sentinel da Agencia Espacial Europeia (ESA).

Agradecimentos

Os autores agradecem a Joaquim Leão, Pétala Bianchi e Marcelo Curtarelli pelas contribuições nas campanhas de campo, e a FAPESP Projetos (2008/56252-0; 2011/23594-8; 2011/19523-8), ao CNPq projetos (552490/2011-3; 471223/2011-5), e a ANEEL nº 8000003629 pelo apoio financeiro à aquisição dos equipamentos e as coletas de dados.

Referências bibliográficas

Barbosa, C.C.F., Novo, E.M.L.M., Melack, J.M., Gastil-Buhl, M. Geospatial analysis of spatiotemporal patterns of pH, total suspended sediment and chlorophyll-a on the Amazon floodplain. **Limnology**, 11(2) :155-166, 2010.

Carvalho, L.A.; Barbosa, C.C.F.; Novo, E.M.L.M., Rudorff, C.M. Implications of scatter corrections for absorption measurements on optical closure of Amazon floodplain lakes using the Spectral Absorption and Attenuation Meter (AC-S-WETLabs), Remote Sensing of Environment 2014.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425714002387>

Ferrari, G. M. and Tassan, S. A method using chemical oxidation to remove light absorption by phytoplankton pigments. **Journal of Phycology**, 35, 1090–1098. 1999.

Foley, J. A.; Botta, A. ; Coe, M. T. ; Costa, M. H El Niño–Southern oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia, **Global Biogeochem. Cycles**, 16(4): 1132, 2002.

Malhi, Y.; Roberts, J. T.; Betts, R. A.; Killeen, T. J; Li, . W.; Nobre, C.A. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science** 319, 169-172, 2008.

Marengo, J.A. ; Tomasella, J.; Soares, W. R.; Alves, L. M.; Nobre, C.A. Extreme climatic events in the Amazon basin. Climatological and hydrological context of recent floods. **Theoretical and Applied Climatology** 2011.

NASA/TM-2000-209966 - Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation. In: Mueller, J. L & Fargion, G. S. (Eds.) (2000).

Nusch, E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and pheopigment determination. Archives of Hydrobiology Bulletin (Ergebnisse der Limnologie), v.14, p.14-36, 1980.

Sippel, S.J.; Hamilton, S.K.; Melack, J.M. Inundation area and morphometry of lakes on the Amazon River floodplain, Brazil. Archiv fur Hydrobiologie. Stuttgart. 123(4):385-400, 1992.

Tassan, S. A sensitivity analysis of the “Transmittance-Reflectance” method for measuring light absorption by aquatic particles. Journal of Plankton Research, 24(8), 757–774. 2002.

Wetzel, R. G.; Likens, G. E. Limnological Analyses. New York: Springer Verlag, 1991. 429p.

Zaneveld, J. R. V., Kitchen, J. , & Moore, C., Scattering error correction of reflecting tube absorption meter. In Jaffe, J. S. (ed.), Ocean Optics XII, International Society of Optical Engineering (SPIE Proceedings 2258): 44–55. 1994.