



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE  $p\text{CO}_2$  NA MARGEM  
DA PLATAFORMA CONTINENTAL ADJACENTE À FOZ DO RIO  
AMAZONAS**

Gabriel Moiano Cesar

Monografia da disciplina de  
Introdução a Geoprocessamento  
(SER300) apresentada ao Dr.  
Antônio Miguel Vieira Monteiro e  
Dr. Claudio Clemente Faria  
Barbosa.

INPE

São José dos Campos

2018

## Resumo

O volume das águas do Rio Amazonas representa aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de toda água doce que deságua no oceano. A pluma do Rio Amazonas se estende por centenas de quilômetros no interior do Atlântico Tropical Ocidental, com impacto direto na salinidade e temperatura da água e indireto sobre a biota local. O Rio Amazonas tem um papel importante no balanço de carbono global, e relevante contribuição na emissão de gases de acordo com estudos recentes. A região de transição rio-oceano é altamente dinâmica e complexa e a compreensão dos processos biogeoquímicos ali atuantes pode ser beneficiada pelo uso do Sensoriamento Remoto. Recentes estudos demonstram que o Rio Amazonas é um emissor de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) ainda maior do que até então descrito na literatura e os dados de sensoriamento remoto aplicados às técnicas de geoprocessamento é uma eficaz ferramenta para estimar a pressão parcial de dióxido de carbono ( $p\text{CO}_2$ ) da região. Este trabalho aplicou algoritmos de sensoriamento remoto para analisar a distribuição de  $p\text{CO}_2$  em uma região de transição entre o Rio Amazonas e o Oceano Atlântico. Os maiores valores de descarga de  $p\text{CO}_2$  foram observados no período de vazante, fato confirmado pelos procedimentos de classificação.

**Palavras-chave:** Pressão parcial de dióxido de carbono,  $p\text{CO}_2$ , classificação de imagens, K-médias, Expectation-maximization.

## 1 INTRODUÇÃO

A realização de amostragens clássicas na foz do Rio Amazonas representa um desafio para a ciência, existem dificuldades inerentes ao processo de coleta de dados espaço-temporal como, por exemplo, o acesso aos locais de coleta e a obtenção de medidas em diferentes ciclos hidrológicos. (PAIVA, 2001, SAWAKUCHI et al., 2017; WARD et al., 2015). Nesse sentido o sensoriamento remoto é uma ferramenta útil para a caracterização da variabilidade espaço-temporal de parâmetros biogeoquímicos importantes para o estudo sobre o ciclo do carbono (VALERIO et al., 2018).

A pluma do Rio Amazonas pode se estender por uma área de até  $1.020 \times 10^3$  km<sup>2</sup> no Atlântico Norte Tropical Ocidental (MOLLERI, 2010). A salinidade é altamente variável e dependente da sazonalidade. A extensão da pluma é o resultado de vários processos incluindo a descarga do Rio Amazonas que varia sazonalmente, processo de advecção causado pelas correntes marinhas, precipitação e turbulência causada por ventos sazonais (GRODSKY et al., 2014).

A matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) é composta por ácidos húmicos e fúlvicos. Podem ter origem local, por exemplo, da degradação de células fitoplanctônicas e subprodutos, ou podem ser trazidas até uma localidade a partir de uma fonte distante. Por exemplo, rios que fluem dentro de matas fechadas e/ou sobre solos ricos em matéria orgânica acumulam carga de CDOM em seu curso. O CDOM presente na água que tem como origem fontes terrígenas está em maior concentração e maior complexidade molecular do que quando originado por degradação do fitoplâncton (IOCCG, 2000). Particularmente alto no domínio espectral do ultravioleta, o espectro de absorção do CDOM tem um aumento exponencial em comprimentos de ondas menores (BRICAUD et al., 1981).

A degradação contínua da matéria orgânica dissolvida através de processos biológicos e fotoquímicos contribuem para o aumento da pressão parcial de

dióxido de carbono ( $p\text{CO}_2$ ) acima do equilíbrio com a atmosfera. A supersaturação do  $\text{CO}_2$  leva a uma evasão do fluxo de gás da água para a atmosfera (KOEHLER et al., 2014). Alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos em sistemas lênticos boreais e temperados para estimar  $p\text{CO}_2$  utilizando o carbono orgânico dissolvido como indicador (LARSEN et al., 2011). Existe uma escassez de trabalhos sobre a utilização da relação entre o CDOM e a  $p\text{CO}_2$  principalmente em regiões tropicais. A região da foz do Rio Amazonas é determinante no balanço de carbono global e assim, o objetivo desse trabalho é a caracterização sazonal do  $p\text{CO}_2$  adquirido por dados de sensoriamento remoto utilizando técnicas de geoprocessamento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo aqui definida insere-se na margem equatorial norte brasileira, adjacente à foz do Rio Amazonas (Figura 1), delimitada entre 15°N-5°S e 60°W-45°W. É uma área altamente dinâmica com um enorme fluxo de nutrientes e taxas primárias de produtividade. Esta região recebe grandes quantidades de material orgânico e inorgânico descartado pelo rio Amazonas.

Figura 1 – Margem equatorial norte brasileira, adjacente à foz do Amazonas (15°N-5°S e 60°W-45°W).



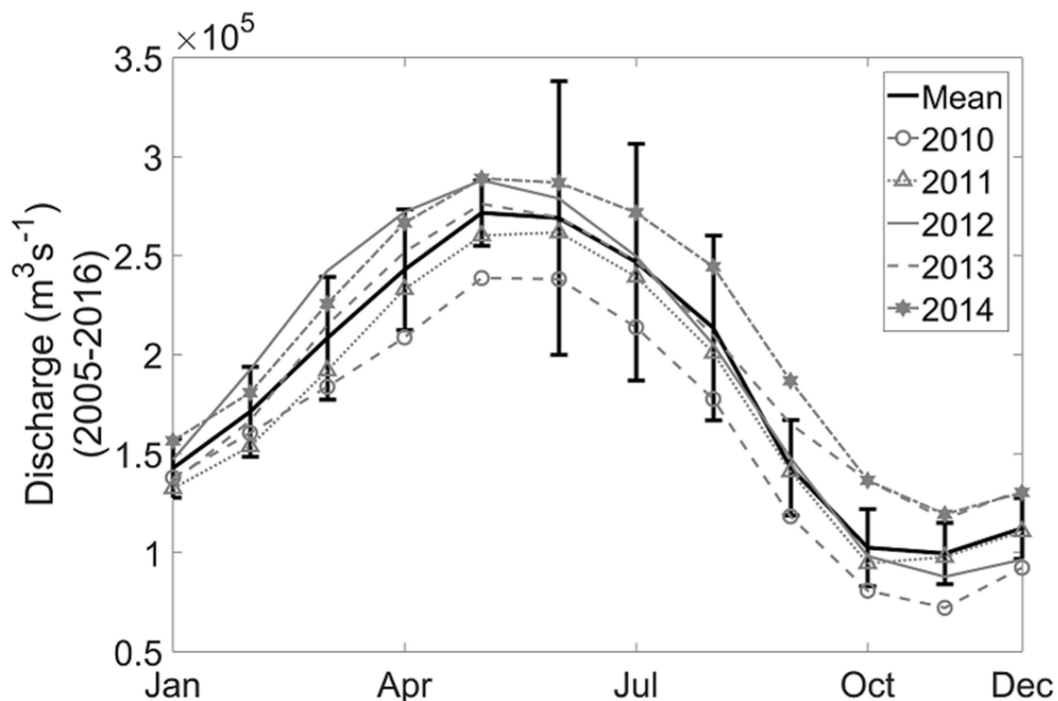
### 2.1 Banco de dados

O satélite ENVISAT (*Environmental Satellite*) desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA) operou entre 2002 e 2012. O sensor *MEdium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS), um espectrômetro de média

resolução espacial, operou na faixa do visível ao infravermelho próximo (400 a 900 nm) gerando um banco de dados muito representativo, de mais de uma década. Os dados MERIS são muito utilizados para a caracterização ambiental, principalmente em regiões costeiras e oceânicas. Um dos aspectos mais atraentes para a utilização desses dados para estimativas em ambientes aquáticos é a sensibilidade deste sensor aos principais componentes opticamente ativos da água, devido à sua configuração espectral planejada (MERIS, 2006). Nesse trabalho foi utilizado o banco de dados mensal do MERIS, para o período de Agosto de 2002 até Fevereiro de 2012. Onde foram feitas as médias sazonais para todo o período. O algoritmo utilizado para a correção atmosférica desse banco foi o Polymer (STEINMETZ et al., 2011), onde as imagens com mais de 30% de dados espúrios não foram utilizadas.

Com a utilização do software SeaDAS 7.4 (<https://seadas.gsfc.nasa.gov/>) foram realizadas as álgebras de mapas e aplicação das técnicas de geoprocessamento que resultaram nos mapas de caracterização proposta. As imagens médias foram geradas utilizando matemática de bandas e os valores foram selecionados de acordo com o período de descarga já descrito em trabalhos anteriores (Figura 2).

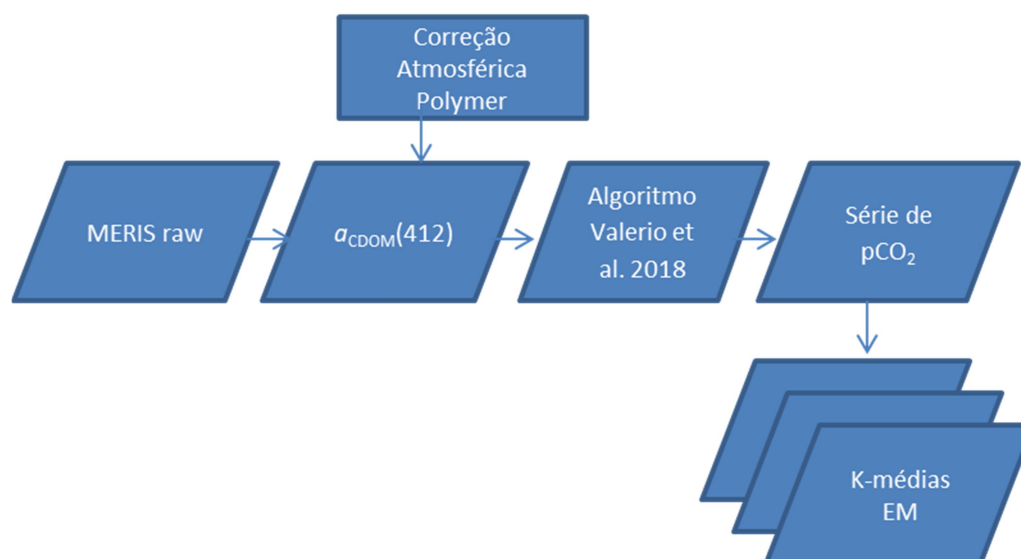
Figura 2 – Valores de descarga do Rio Amazonas entre os anos de 2010 e 2014. (Fonte: Valério et. al. 2018).



As matrizes de dados do coeficiente de absorção de luz pelo CDOM em 412 nm -  $a_{\text{CDOM}}(412)$  que possuíam mais de 70 % de valores válidos foram utilizadas no processamento. Dessa forma, foram utilizados 114 arquivos da série inicial de 117 meses (compreendendo os meses da série do satélite MERIS - Abril de 2002 a Fevereiro de 2012) para os cálculos médios.

A Figura 3 apresenta o diagrama de classes do banco de dados (modelo OMT-G).

Figura 3 - Representação semântica do modelo de dados.



## 2.2 Algoritmo pCO<sub>2</sub>

A utilização de algoritmos empíricos para a estimativa de parâmetros biogeoquímicos em oceanos vem amplamente sendo aplicada em séries de dados com diferentes aplicações científicas. O algoritmo aqui utilizado para a estimativa do pCO<sub>2</sub> foi desenvolvido no trabalho de Valério et. al. (2018), que se baseou em dados in situ coletados no Rio Amazonas durante os anos de 2014-2017 em diferentes condições hidrológicas. Com a utilização de técnicas estatísticas desenvolveu um modelo empírico para a estimativa de valores de pCO<sub>2</sub> utilizando dados de satélites.

O trabalho de Valério et al. (2018) descreve as relações entre a distribuição da pCO<sub>2</sub> com outros parâmetros ambientais como clorofila, temperatura e CDOM. Um dos algoritmos empíricos propostos é o que estima a pCO<sub>2</sub> por meio dos valores de a<sub>CDOM</sub>(412), como descrito na Equação 1.

$$pCO_2 = 1240 * a_{CDOM}(412) - 1845 \quad (1)$$



### **2.3 K Médias**

De acordo com estudos prévios feitos na região (SAWAKUCHI et al., 2017; WARD et al., 2015; BITTENCOURT; AMADIO, 2007) o ciclo sazonal de descarga do Rio Amazonas é definido como: enchente (Janeiro, Fevereiro e Março), cheia (Abril, Maio e Junho), vazante (Julho, Agosto e Setembro) e seca (Outubro, Novembro e Dezembro).

O algoritmo de agrupamento K-médias é um método de classificação não supervisionada e foi utilizado para classificar as imagens médias dos períodos de descarga: enchente, cheia, vazante e seca.

Os algoritmos de classificação não supervisionada são utilizados quando não se conhece o comportamento do conjunto de dados utilizados para definir os clusters, o que o torna menos sujeito a erros do usuário (VANTREPOTTE, et al., 2012). Foram realizados testes de configuração nas imagens médias e o número mínimo de classes que representavam os diferentes valores de  $p\text{CO}_2$  na série para a realização do procedimento foi definido como 5 classes, buscou-se utilizar a mesma quantidade de classes para todos os períodos à título de comparação, assim ficou estabelecido que a classe 0 contém os valores maiores que  $3500 \mu\text{atm}$ , e a classe 4 agrupa os valores menores de  $p\text{CO}_2$  para cada imagem média.

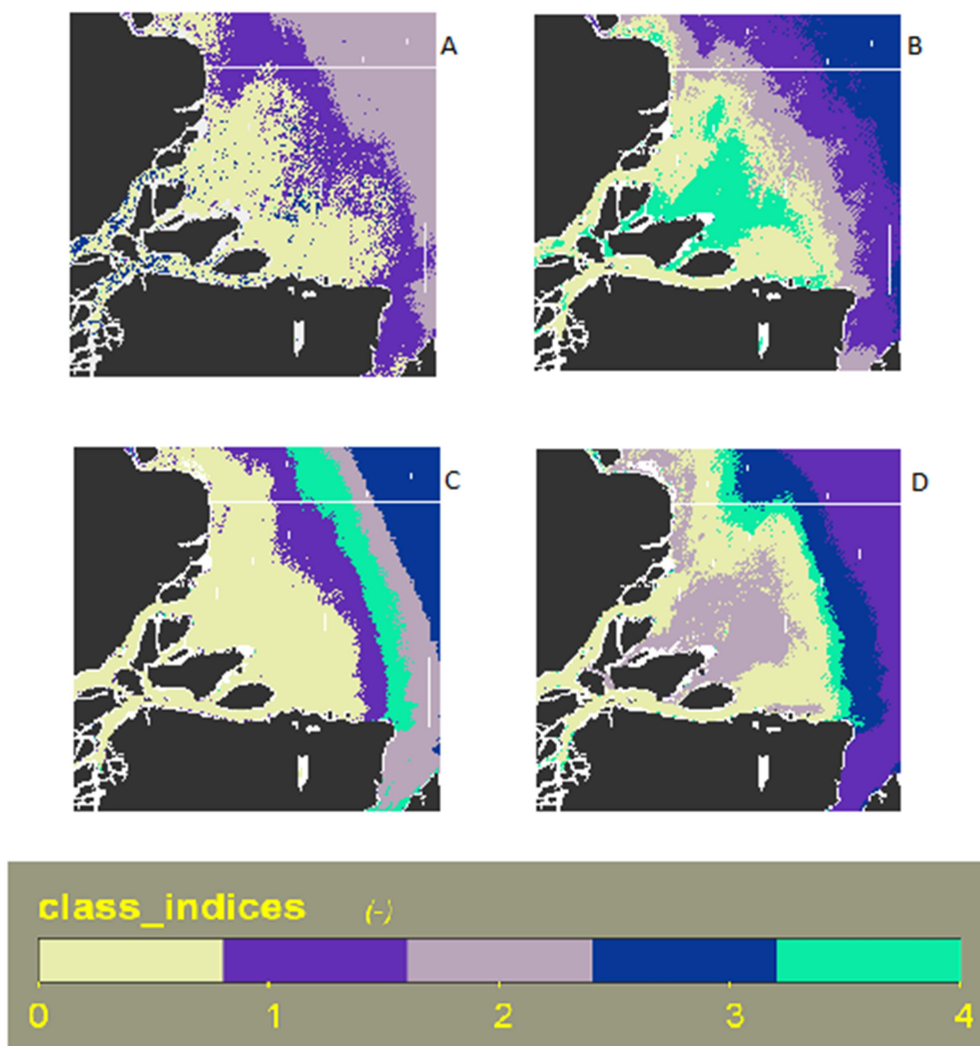
### **2.4 Expectation-maximization (EM)**

De acordo com Korting e Dutra. (2007), o algoritmo EM é baseado na teoria bayesiana onde um pixel de uma imagem pode se comportar de maneira diferente se vier da região de borda. Portanto, o comportamento global é provavelmente uma mistura dos dois comportamentos distintos. O objetivo das distribuições de misturas é produzir um modelo probabilístico composto por um conjunto de subclasses. Nessa abordagem, cada classe é caracterizada por um conjunto de parâmetros que descrevem a média e a variância dos componentes espectrais. Foi utilizada na classificação as probabilidades dos maiores valores de  $a_{\text{CDOM}}(412)$  na matriz, para isso foi estabelecido um limiar mínimo de  $3500 \mu\text{atm}$  na série.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

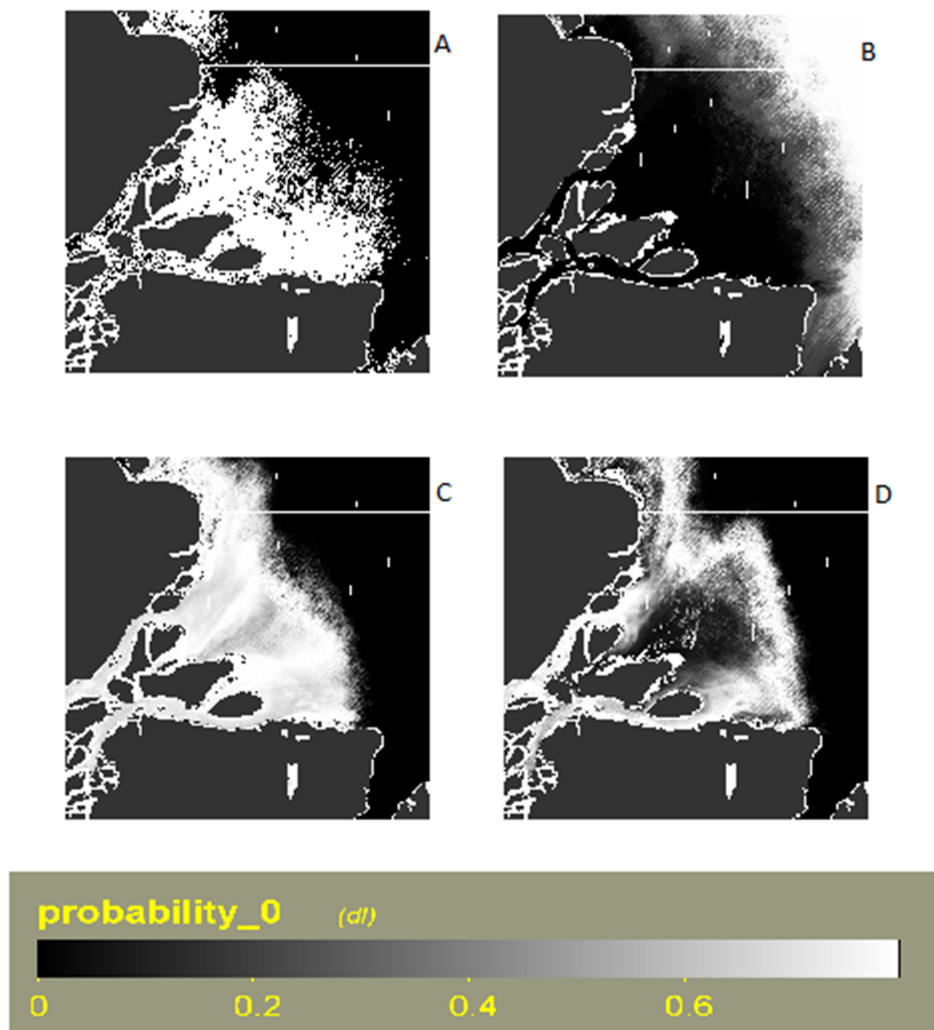
Com a aplicação do algoritmo K Médias sobre a série de médias foi gerada a Figura 4. É interessante notar a progressão do padrão da classe 4 no tempo (que são os pixels que têm os valores menores de  $p\text{CO}_2$  agrupados). O limiar de  $3500 \mu\text{atm}$  (que foi a divisão de classe que agrupava os maiores valores de  $p\text{CO}_2$ ) não mostrou uma boa visualização do resultado da classificação.

Figura 4 – Aplicação da técnica de classificação por K-médias sobre as médias dos períodos representativos da descarga do rio Amazonas. A – Enchente, B – Cheia, C – Vazante e D – Seca.



Uma opção para visualização da probabilidade da ocorrência das classes foi a utilização do algoritmo *Expectation-maximization*, também disponível no SeaDAS. Então foram selecionadas as imagens de probabilidades da classe de maior valor, evidenciando que o período de vazante que apresenta maior probabilidade de ter os maiores valores de  $p\text{CO}_2$  na parte adjacente a boca do rio, na entrada da pluma no oceano.

Figura 5 – Aplicação da técnica de classificação por *Expectation-maximization*, sobre as médias dos períodos representativos da descarga do rio Amazonas. A – Enchente, B – Cheia, C – Vazante e D – Seca.



É possível observar que na classificação por K-médias no período de enchente (Janeiro, Fevereiro e Março) existe uma mistura dos valores classificados de  $p\text{CO}_2$ . Também nota-se que as classes que representavam as menores concentrações cobriam uma pequena fração de toda a imagem 4A. Já no período médio de cheia (Abril, Maio e Junho), representado na imagem 4B, é interessante observar que as menores concentrações de  $p\text{CO}_2$  estavam agrupadas na primeira região da pluma. A utilização do algoritmo *Expectation-maximization* para o limiar previamente estabelecido (seleção da classe com as maiores concentrações) foi importante para o entendimento da mistura entre as classes no período de enchente e cheia (respectivamente Figuras 5A e 5B). Também utilizando períodos médios, Valério et al. (2018) realizaram o cálculo do coeficiente de variação para a série, e foi observado que as imagens do período de enchente apresentou um maior coeficiente de variação na pluma, concordando com a classificação por K-médias (Figura 4A). Também foi realizado o cálculo do fluxo de  $\text{CO}_2$ , onde no período de enchente foram encontrados os maiores valores, concordando com o padrão aqui observado. No mesmo trabalho foi encontrado o mesmo comportamento dos menores valores de concentração de  $p\text{CO}_2$  agrupados logo na saída do rio no período de cheia, corroborando com a classificação por *Expectation-maximization* realizada nesse trabalho (Figura 5 B).

#### **4 CONCLUSÃO**

Com a utilização de técnicas estatísticas e de geoprocessamento para análise de variabilidade espaço temporal foi feita a caracterização sazonal da  $p\text{CO}_2$  na margem equatorial da foz do rio Amazonas utilizando dados de sensoriamento remoto. A classificação das imagens médias mostrou os padrões médios de cada período. A classificação por k-médias foi importante para estabelecer os padrões de enchente e cheia na série de dados. O período de vazante apresentou os maiores valores de  $p\text{CO}_2$  agrupados na boca do rio e a aplicação do método *Expectation-maximization* corroborou esse padrão observado.

## Referências Bibliográficas

BITTENCOURT, M. M.; AMADIO, S. A. Proposta para identificação rápida dos períodos hidrológicos em áreas de várzea Do Rio Solimões-Amazonas nas proximidades de Manaus. **Acta Amazonica** v. 37, n. 2, p. 303-308, 2007.

BRICAUD, A.; MOREL, A.; PRIEUR, L. Absorption by Dissolved Organic Matter of the Sea (Yellow Substance) in the UV and Visible Domains. **Limnology and Oceanography**, v. 26, n. 1, p. 43–53, 1981.

GRODSKY, S. A.; REVERDIN, G.; CARTON, J. A.; COLES, V. J. Year-to-year salinity changes in the Amazon plume: Contrasting 2011 and 2012 Aquarius/SACD and SMOS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 140, p. 14–22, 2014.

International Ocean Colour Coordinating Group - IOCCG. **Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex waters**. Report Number 3. 2000. 139 p.

KOEHLER, B.; LANDELIUS, T.; WEYHENMEYER, G. A.; MACHIDA, N.; TRANVIK, L. J. Sunlight-induced carbon dioxide emissions from inland waters. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 28, p. 696–711, 2014.

KORTING, T. S., DUTRA, L. V. Improvements to Expectation-Maximization approach for unsupervised classification of remote sensing data. In: IX Brazilian Symposium on Geoinformatics, Campos do Jordão, Brazil, November 25-28, 2007, INPE, p. 3-11.

LARSEN, S.; ANDERSEN, T.; HESSEN, D. O. The pCO<sub>2</sub> in boreal lakes: Organic carbon as a universal predictor? **Global Biogeochemical Cycles**, v. 25, n. 2, p. 1–8, 2011.

MOLLERI, G. S. F.; NOVO, E. M. L. D. M.; KAMPEL, M. Space-time variability of the Amazon River plume based on satellite ocean color. **Continental Shelf Research**, v. 30, n. 3–4, p. 342–352, 2010.

MERIS. **Product handbook**. European Space Agency (ESA), 2006. Issue 2.1. 130 p. Disponível em: <[https://earth.esa.int/pub/ESA\\_DOC/ENVISAT/MERIS/meris.ProductHandbook.2\\_1.pdf](https://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/ENVISAT/MERIS/meris.ProductHandbook.2_1.pdf)>

PAIVA, R. S. Parâmetros físicos, químicos, biomassa e produção primária do fitoplâncton na Plataforma Continental Amazônica. 2001. 153 f. -Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

RICHEY, J. E.; HEDGES, J. I.; DEVOL, A. H.; QUAY, P. D.; VICTORIA, R.; MARTINELLI, L.; FORSBERG, B. R. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. *Limnology and Oceanography*, v. 35, n. 2, p. 352–371, 1990.

SAWAKUCHI, H. O.; NEU, V.; WARD, N. D.; BARROS, M. D. L. C.; VALERIO, A.; GAGNEMAYNARD, W.; CUNHA, A. C.; FERNANDA, D.; DINIZ, J. E.; BRITO, D. C.; KRUSCHE, A. V.; RICHEY, J. E. Carbon dioxide emissions along the lower Amazon River. **Frontiers in Marine Science**, v. 4, p. 1–12, 2017.

STEINMETZ, F.; DESCHAMPS, P.-Y.; RAMON, D. Atmospheric correction in presence of sun glint: application to MERIS. **Opt Express**, v. 19, n. 10, p.9783-9800, 2011.

WARD, N. D.; KRUSCHE, A. V.; SAWAKUCHI, H. O.; BRITO, D. C.; CUNHA, A. C.; MOURA, J. M. S.; DA SILVA, R.; YAGER, P. L.; KEIL, R. G.; RICHEY, J. E. The compositional evolution of dissolved and particulate organic matter along the lower Amazon River Óbidos to the ocean. **Marine Chemistry**, v. 177, p. 244–256, 2015.

VALERIO, A. M., KAMPEL, M. VANTREPOTTE, V., WARD, N. D., SAWAKUCHI, H. O. LESS, D. F. S., NEU, V., CUNHA, A., RICHEY, J. "Using CDOM optical properties for estimating DOC concentrations and pCO<sub>2</sub> in the Lower Amazon River," **Opt. Express** v. 26, p. A657-A677, 2018.

VANTREPOTTE, V.; LOISEL, H.; DESSAILLY, D.; MÉRIAUX, X. Optical classification of contrasted coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 306–323, 2012.