

## **Ajuste de bandas de modelos empíricos de estimativa de clorofila aplicados à região da planície de inundação do Lago Grande Curuai - PA**

Lino Augusto Sander de Carvalho  
Cláudio Clemente Faria Barbosa  
Evelyn Márcia Leão de Moraes Novo

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Coordenação Geral de Observação da Terra - OBT  
Caixa Postal 515 – 12245-970 – São José dos Campos - SP, Brasil  
lino@dsr.inpe.br, evlyn@dsr.inpe.br, claudio@dpi.inpe.br

**Abstract.** Empirical Models to estimate chlorophyll-a concentrations are among the most used in the remote sensing community. Historically, those models were applied to ocean monitoring, but in the last decade they were tested for Case II water types studies. In particular, in tropical water bodies characterized by highly complex mixture of optically active components. This complexity, based on high concentration of colored dissolved Organic Matter (CDOM), Total of Suspended Sediments (TSS) and Chlorophyll- (Chlo-a) that varies independently, one from each other, makes it necessary the search for a set of spectral bands able to improve the accuracy of chlorophyll estimates. This work uses a computational search method to find the best band set, for 295 samples distributed in 4 periods in a hydrological cycle. The samples are from the Curuai floodplain located in the Pará State in the Amazon Region. Results show good agreement to literature, but also shows some discrepancies, mostly because of tropical waters complexity. The new bands show better adjustments compared to standard bands intervals, found in literature. Models of Two and three band are adequate only for two periods with high degree of confidence. A discussion about the behavior of each period, and its empirical model best fit is also made.

**Keywords:** Chlorophyll Estimations, Inland Waters, Empirical Modeling Estimativa de Clorofila, Águas de Interiores, Modelos Empíricos

### **1. Introdução**

A utilização de imagens de satélite para a estimativa de parâmetros de qualidade da água é importante para o monitoramento de recursos aquáticos. Dentre os componentes que podem ser detectados por sensoriamento remoto, a clorofila-a, se destaca principalmente pela sua relação com o grau de eutrofização desses ambientes. Além disto, as populações de algas dos sistemas aquáticos continentais podem representar riscos à saúde humana, tendo em vista a produção de potentes toxinas por determinadas espécies.

Os modelos empíricos de estimativa de clorofila-a, que são aqueles que associam dados espectrais, provenientes de espectroradiômetros ou imagens de satélites, com medidas de concentração de clorofila-a por meio de modelos estatísticos, são vastamente utilizados principalmente por sua praticidade. Historicamente esta metodologia foi desenvolvida para aplicações em águas oceânicas mas, especialmente na última década, os esforços têm se voltado para o estudo de águas de interiores.

Quando aplicados à águas oceânicas, tais modelos apresentam resultados convincentes, causados principalmente pela baixa variabilidade dos constituintes opticamente ativos. Por outro lado, as águas estuarinas e em especial as águas de interiores (rios e lagos continentais) apresentam altas concentrações de clorofila-a, matéria orgânica dissolvida e de partículas orgânicas e inorgânicas em suspensão, que variam independentemente umas das outras. Esta variabilidade produz respostas espectrais de grande complexidade em que a matéria

orgânica dissolvida e o material em suspensão interferem na resposta espectral dos pigmentos fotossintetizadores tais como a clorofila-a, o que dificulta o ajuste de modelos estatísticos.

Os modelos empíricos de maior recorrência na literatura são os modelos de duas e três bandas ((DALL'OLMO et al., 2005) e (GITELSON et al., 2008)) e sua aplicação em águas do tipo II é, em sua maior parte, a corpos d'água provenientes de regiões temperadas. Entretanto quando aplicados a águas de regiões tropicais amazônicas as bandas que melhor ajustam o modelo empírico podem ser diferentes, dado o comportamento diferenciado de tais corpos d'água em relação aos das regiões temperadas. Uma alternativa para identificar estes intervalos e em decorrência, melhorar a qualidade dos modelos estatísticos da abordagem empírica, é a utilização de métodos de busca.

Desta forma, este trabalho tem por objetivo identificar o intervalo espectral que produz o melhor ajuste para modelos de estimativa de clorofila - a de duas ou três bandas em uma região tropical amazônica. O método de busca foi aplicado a dados da campanha de campo realizada em todo um ciclo hidrológico dos anos de 2003/2004, na região do Lago Grande do Curuai - PA. Por fim, os resultados dos modelos empíricos são comparados às variáveis limnológicas adquiridas.

## 2. Modelo Empírico de Estimativa de Clorofila-a a partir de Sensoriamento Remoto

Atualmente, os modelos empíricos mais amplamente utilizados em estudos de concentração de clorofila em corpos d'água continentais são os desenvolvidos por (DALL'OLMO et al., 2005) (GITELSON et al., 2008). Estes modelos são baseados em operações em regiões específicas do espectro eletromagnético utilizando razões de duas e três bandas para a estimativa de clorofila-a.

De acordo com a metodologia proposta em (GITELSON et al., 2008) na aplicação do modelo de três bandas à regiões temperadas, primeiramente uma banda espectral  $R(\lambda_1)$  na faixa de (660 a 690 nm) é selecionada, uma vez que esta é a região de máxima absorção por clorofila-a. Entretanto, além da alta absorção por clorofila-a, esta região também é afetada pela absorção por tripton (parte inorgânica do material em suspensão), CDOM (matéria orgânica dissolvida), água pura e pelo retroespalhamento de cada um destes constituintes.

O efeito de absorção pelo Tripton e CDOM ( $a_{tripton} + a_{CDOM}$ ) pode ser minimizado pela escolha de uma segunda banda espectral  $R(\lambda_2)$  na faixa de (710 a 730 nm), onde a absorção de clorofila é mínima e a absorção por tripton e CDOM se mantém praticamente constante. Por outro lado, o efeito do retroespalhamento presente tanto em  $R(\lambda_1)$  quanto em  $R(\lambda_2)$  é minimizado por uma terceira banda,  $R(\lambda_3)$  que é escolhida em uma região espectral onde as absorções por clorofila, tripton e CDOM são mínimas, a absorção total se deve preferencialmente à componente da água pura e desta forma o retroespalhamento é proporcional à reflectância.

Desta forma, o modelo de três bandas de estimativa da concentração de clorofila pode ser expresso por (Equação 1):

$$Chlo - a \propto \left( \frac{1}{R(\lambda_1)} - \frac{1}{R(\lambda_2)} \right) \cdot R(\lambda_3) \quad (1)$$

onde (chlo-a) é concentração de clorofila e  $R(\lambda_1)$ ,  $R(\lambda_2)$ , e  $R(\lambda_3)$  são os fatores de reflectância previamente mencionados.

Em situação onde o coeficiente de absorção da clorofila é muito maior do que os coeficientes de retroespalhamento ( $b_b$ ), e muito maior do que a soma da absorção ( $a_{tripton} + a_{CDOM}$ ), pode ser empregado um segundo modelo de duas bandas, expresso por:

$$Chlo - a \propto \left( \frac{R(\lambda_1)}{R(\lambda_2)} \right) \quad (2)$$

### 3. Material e Métodos

#### 3.1. Área de Estudo

A área de estudo selecionada compreende a região conhecida como Planície do Lago Grande de Curuai PA. A planície de Curuai está localizada a 900 km da foz do Rio Amazonas e abrange os municípios de Juruti, Óbidos, e Santarém - PA, entre as latitudes  $01^{\circ}50'S$  e  $02^{\circ}15'S$  e longitude  $55^{\circ}00'W$  e  $55^{\circ}55'W$  (Figura(1)).

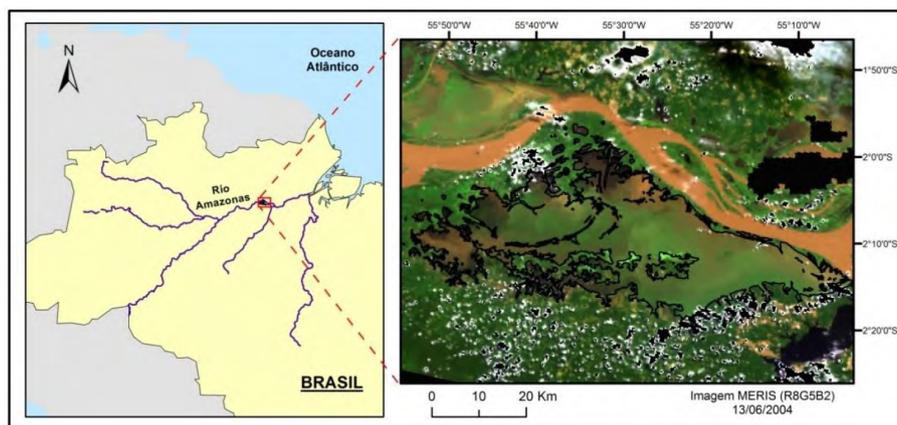


Figura 1: Localização da Área de Estudo - Planície de Inundação do Lago Grande do Curuai - Adaptado de (FERREIRA, 2012)

Possui extensão de 130 km e é constituída por mais de vinte lagos com diferentes características biogeoquímicas, em função dos diferentes tipos de águas lá existente. O maior dos lagos é denominado Lago Grande de Curuai e possui comprimento de aproximadamente 50 km. Segundo (BARBOSA, 2005), a planície possui  $3500 \text{ km}^2$  de área e nível de flutuação da água de até 7 metros, permitindo a caracterização de diversos tipos de paisagem em função do ciclo sazonal da água.

#### 3.2. Dados de Entrada

Foram utilizados dados da campanha de campo descrita em (BARBOSA, 2005). Os dados tomados estão apresentados na Tabela 1. Ela lista o número de amostras coletadas para o período de execução da campanha, a situação do nível de água, além do número de curvas espectrais e número de medidas de clorofila-a. As curvas espectrais foram tomadas utilizando um espectroradiômetro SPECTRON com intervalo de 325 e 1075 nm (visível e infravermelho próximo). A resolução nominal na faixa espectral de 325 a 700 nm foi de 1,6 nm e 3.2 nm na faixa de 700 e 1075 nm, além de tempo de integração de 17 milissegundos. A metodologia de coleta dos espectros assim como a determinação de clorofila-a foi feita segundo (BARBOSA, 2005).

Tabela 1: Conjunto de Dados Utilizados

Período	Vazante	Baixa	Enchente	Cheia
Período de Execução das Medidas	23/09/03 a 09/10/03	19/11/03 a 01/12/03	01/02/04 a 14/02/04	31/05/04 a 21/06/04
Total de Pontos Coletados	72	73	74	76
Número de Espectros Utilizados	25	73	74	76
Medidas de Clorofila-a Utilizadas	25	73	74	76

A Localização dos pontos coletados em cada uma das datas especificadas na Tabela 1 estão apresentados pelos pontos em vermelho na Figura 2.

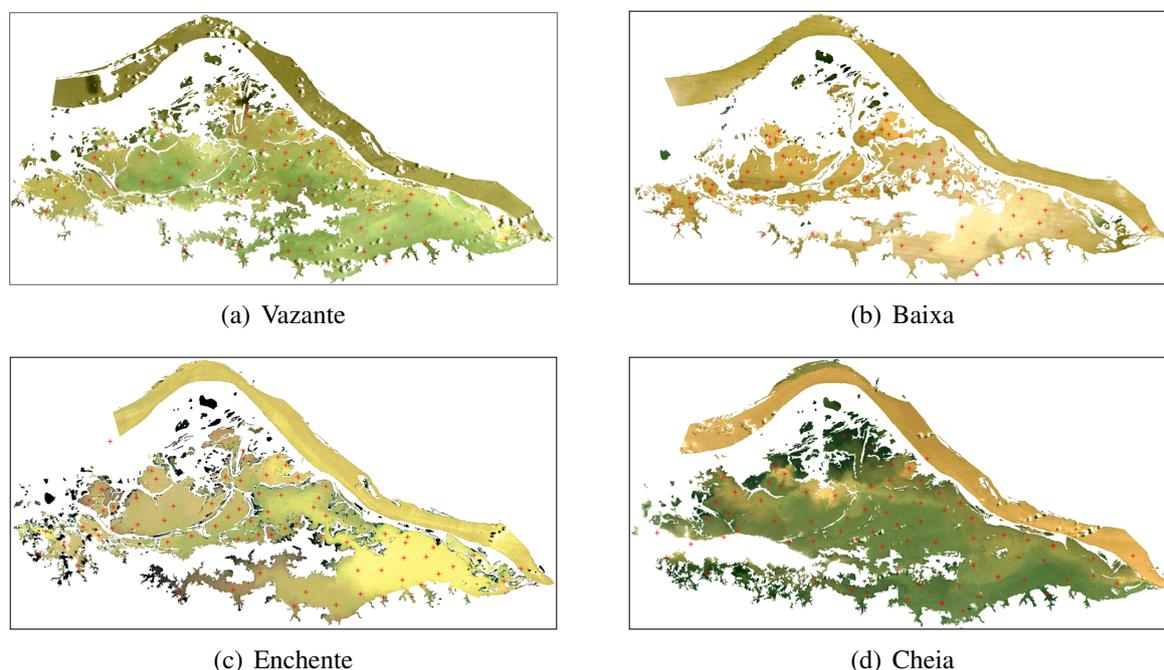


Figura 2: Localização dos Pontos De Coleta de Dados em cada Período

### 3.3. Metodologia

#### 3.3.1. Método de Busca

O método utilizado procurou varrer todas as combinações de bandas no intervalo espectral do espectrorradiômetro especificado na seção 3.2, tanto para o método de duas como para o de três bandas. A cada combinação de bandas, é ajustada uma reta a partir de uma regressão linear, entre a concentração de clorofila-a e o valor da razão de bandas computado. Em decorrência é calculado o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o valor de significância (p-valor) daquela iteração. O método procurou encontrar o intervalo em torno do máximo da função objetivo (valor de  $R^2$ ) que possuísse valores significativos (p-valor  $\approx 0$ ).

### 4. Resultados

A tabela 2 mostra o valor dos intervalos de bandas encontrados para o modelo de duas bandas para todas as datas pesquisadas. Os intervalos espectrais apresentados foram significativos de acordo com o valor P calculado e tiveram valores  $R^2$  próximos ao valor máximo de  $R^2$  encontrado para o intervalo em questão. Os gráficos da figura 3 apresentam o ajuste para o valor máximo de  $R^2$  encontrado.

Tabela 2: Resultados - Modelo Duas Bandas

Período	Vazante	Baixa	Enchente	Cheia
$(\lambda_1)$	723 a 726	670 a 699	687 a 696	721 a 723
$(\lambda_2)$	687 a 690	690 a 693	687 a 690	670 a 673
Valor de $R^2$	0.800 a 0.815	0.53 a 0.569	0.23 a 0.255	0.90 a 0.918
P-Valor	$\approx 0$	$\approx 0$	$\approx 0$	$\approx 0$

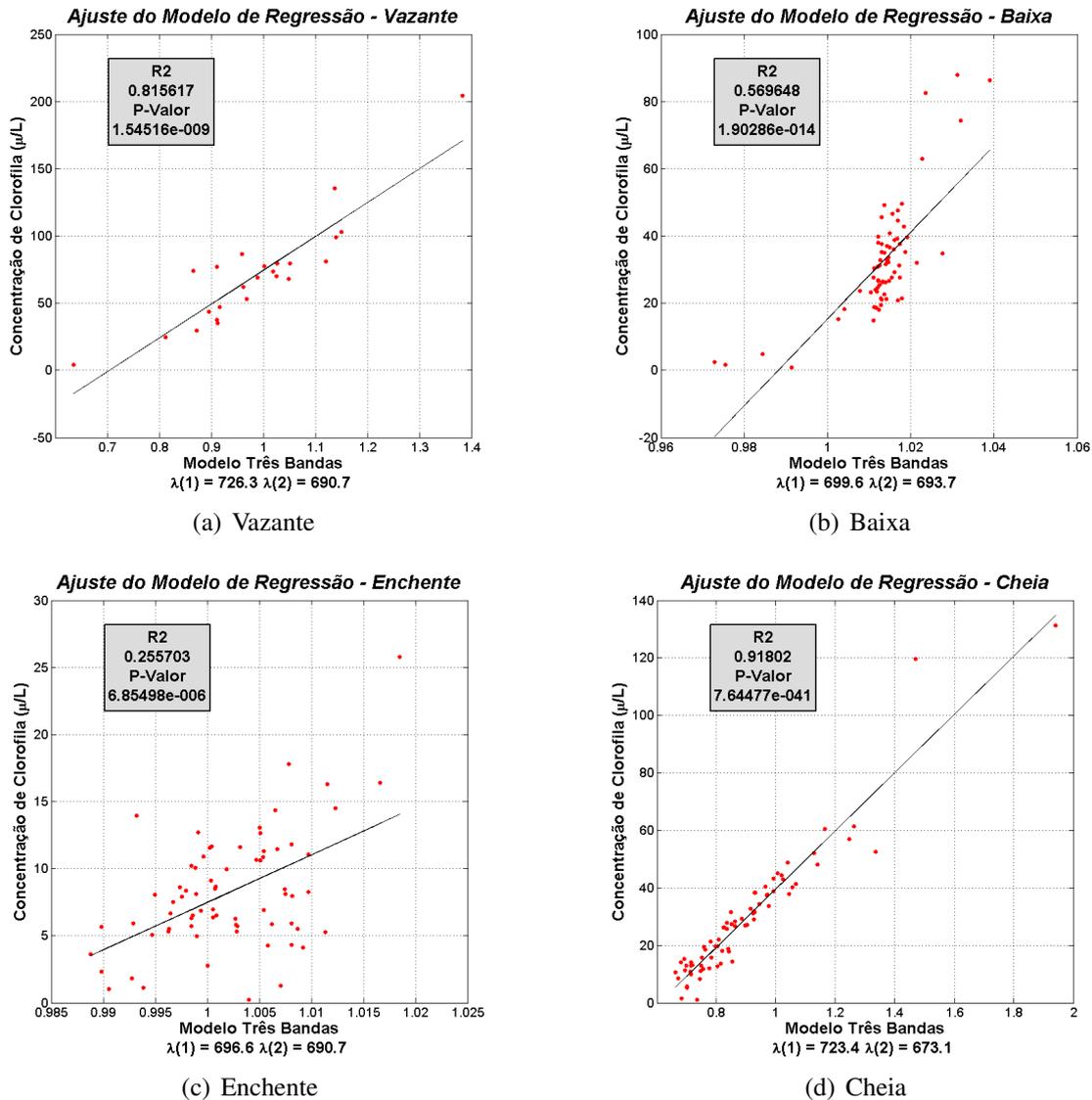


Figura 3: Gráficos Referentes ao Valor Máximo de R2 Encontrado - Modelo Duas Bandas

Os resultados apresentados na tabela 3 mostram os intervalos de bandas encontrados para o modelo de três bandas para todas as datas pesquisadas. Os intervalos espectrais apresentados também foram significativos, como demonstra o valor de P calculado. Os gráficos da figura 4 apresentam os modelos ajustados que obtiveram o maior valor de R2 para cada período estudado.

Tabela 3: Resultados - Modelo Três Bandas

Período	Vazante	Baixa	Enchente	Cheia
$(\lambda_1)$	701.2 a 702.5	689.8 a 690.7	649 a 693	675.3 a 676
$(\lambda_2)$	704.0 a 705.5	697.2 a 699.6	655 a 699	707.1 a 708.5
$(\lambda_3)$	749.8 a 750.1	736 a 738.2	700 a 750	743.5 a 744.1
Valor de R2	0.844 a 0.854	0.632 a 0.651	0.2545 a 0.2645	0.940 a 0.955
P-Valor	$\approx 0$	$\approx 0$	$\approx 0$	$\approx 0$

O gráficos de três bandas estão apresentados abaixo :

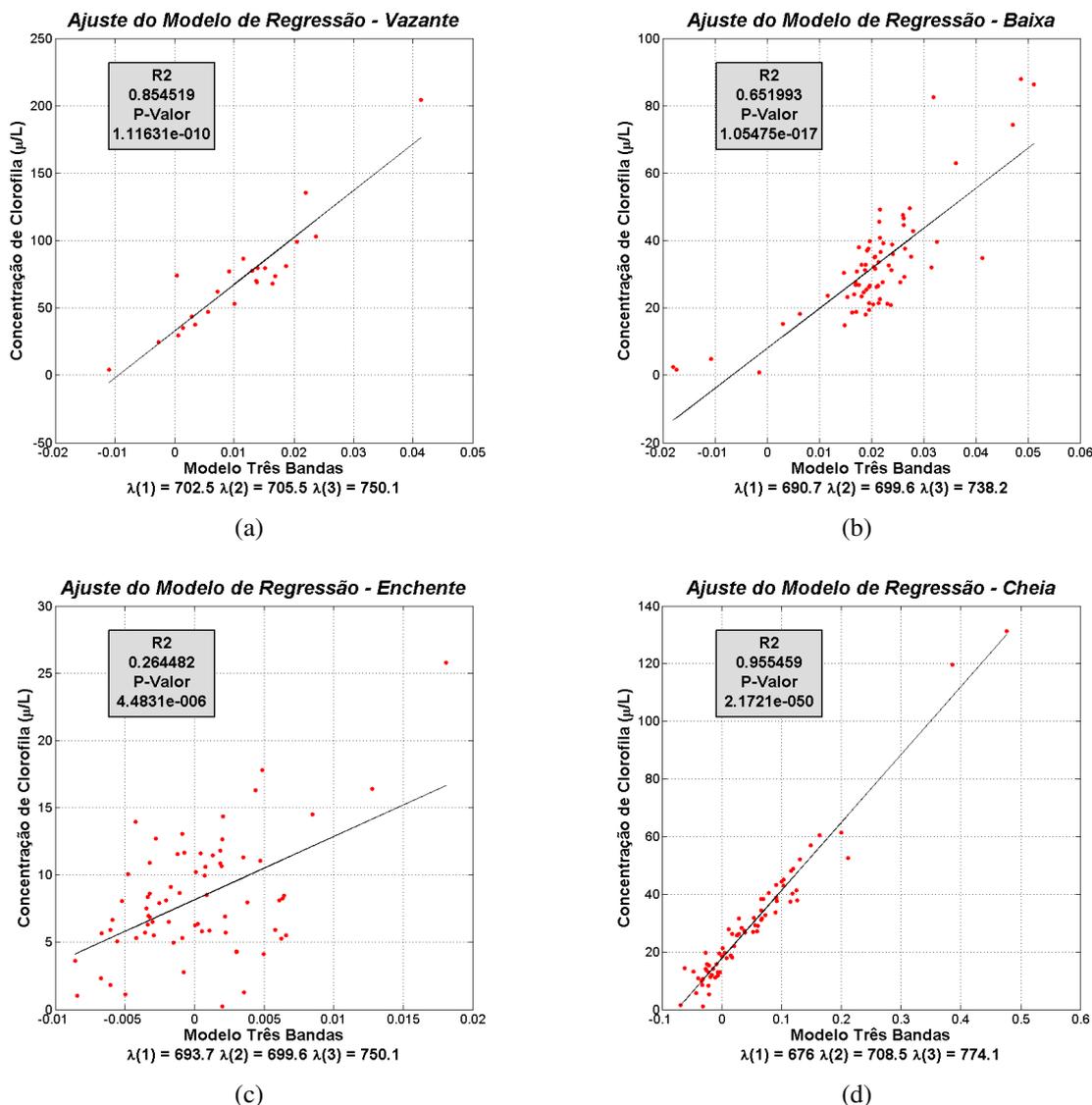


Figura 4: Gráficos Referentes ao Valor Máximo de R2 Encontrado - Modelo Três Bandas

### 5. Discussões

Um primeiro aspecto a se destacar nos resultados apresentados é a sua validade em relação à resultados apresentados na literatura. A tabela 4, apresenta uma série de resultados encontrados por outros autores para o modelo de três bandas. De uma forma geral, foram encontrados valores de coeficiente de determinação (R2), principalmente para o período de vazante e enchente, que se assemelham aos descritos na literatura.

Tabela 4: Comparação Entre Autores - Modelo de Três Bandas - Adaptado de (CHEN et al., 2011)

Autor	Bandas	R2	Amostras
(DALL'OLMO et al., 2005)	$(\lambda_1) = 671; (\lambda_2) = 710; (\lambda_3) = 740$	0.94	86
(GITELSON et al., 2008)	$\lambda_1) = 660 - 670; (\lambda_2) = 700 - 730; (\lambda_3) = 740 - 760$	0.94	145
(GITELSON et al., 2007)	$\lambda_1) = 675; (\lambda_2) = 695; (\lambda_3) = 730$	0.81	44
(CHEN et al., 2011)	$\lambda_1) = 684; (\lambda_2) = 690; (\lambda_3) = 718$	0.81	32

Porém, é interessante notar que os valores de intervalos de bandas encontrados na literatura

mencionada são aplicados à águas de regiões temperadas. Desta forma, observa-se uma certa diferença entre os intervalos da literatura e os encontrados neste trabalho, a se destacar os valores de ( $\lambda_1$ ) para os períodos de Vazante e Cheia, cujos valores de R2 foram os mais altos.

Um outro ponto a se destacar são os coeficientes de determinação (R2) diferenciados para os modelos de duas e três bandas. De forma geral, os resultados obtidos pelo modelo de três bandas foram melhores, quando uma comparação período a período é feita. A maior diferença foi obtida no período de baixa, onde o valor máximo de R2 do modelo de duas bandas foi de 0.569 e o valor do modelo de Três Bandas, 0.651.

A principal contribuição do modelo de três bandas é a inclusão de uma terceira banda que diminui a influência do retroespalhamento dos componentes Tripton e CDOM. No caso das águas da planície do lago grande Curuai, a concentração de carga em suspensão é particularmente alta, como pode ser observado na tabela 6, enquanto a influencia do CDOM não é tão significativa tendo valores de concentração na faixa de 7 a 8 ppm (Tabela 7). Desta forma, um dos aspectos que contribui para o melhor ajuste encontrado pelos modelos de três bandas pode ser atribuído à alta concentração de TSS.

Tabela 5: Valores da Concentração de Clorofila-a Medidos - ( $\mu g/l$ )

Período	Vazante	Baixa	Enchente	Cheia
Média	68,78	33,4.7	8,2	28,85
Máximo	350	87.86	25.79	131.28
Mínimo	5.61	0.80	0.21	1.16
Desvio Padrão	63	15.8	4.16	21.61

Tabela 6: Valores da Concentração de TSS Medidos - ( $mg/l$ )

Período	Vazante	Baixa	Enchente	Cheia
Média	66,13	462,71	98,7	14,51
Máximo	200	1137,75	359,42	34,90
Mínimo	5,46	12,74	36,75	5,68
Desvio Padrão	25,27	217,42	53,4	4,23

Tabela 7: Valores da Concentração de CDOM Medidos - ( $ppm$ )

Período	Vazante	Baixa	Enchente	Cheia
Média	8,37	6,04	5,56	6,73
Máximo	31,52	11,38	11,25	15,29
Mínimo	4,20	1,03	2,81	4,38
Desvio Padrão	4,17	1,63	1,6	1,94

Outro fato a se destacar é a diferença de ajuste encontrado entre os períodos estudados. Tanto o modelo de três bandas como o modelo de duas bandas apresentaram valores de R2 mais baixos para os períodos de Baixa e Enchente e mais altos para os períodos de Vazante e Cheia. Em especial o período de Enchente resultou em um modelo com valor destacadamente menor que os outros períodos ( $R2 \approx 0$ ). Este fato já havia sido descrito por (BARBOSA, 2005), porém com diferentes valores de bandas.

Este comportamento pode ser explicado pela relação de sensibilidade que tanto o modelo de duas bandas quanto o modelo de três bandas possuem em relação à concentração de clorofila-a e TSS. Os períodos que obtiverem os melhores ajustes são os que possuem alta concentração de clorofila-a e baixa concentração de TSS. Isto pode ser observado nas tabelas 5 e 6, em que o período da cheia apresenta as condições que melhor se adequam aos modelos empíricos aqui testados. Em especial, o período de Enchente não possui a menor concentração de TSS dentre os períodos, porém apresenta a menor concentração média de clorofila-a, chegando a aproximadamente uma ordem de grandeza abaixo dos outros períodos.

## 6. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo a identificação dos melhores intervalos espectrais para o ajuste de modelos empíricos de duas e três bandas para a estimativa de clorofila-a na região da planície do Curuai-PA. O método de busca utilizado funcionou de forma adequada, mas deve-se ressaltar que o tempo computacional depende da quantidade de pontos e da resolução espectral do radiômetro. Em casos de alto número de pontos ou alta resolução espectral, métodos de mineração de dados poderiam ser utilizados de forma a reduzir o tempo computacional.

Os modelos gerados são significativos para a estimativa de clorofila-a para todos os intervalos de bandas apresentados. Entretanto o ajuste foi melhor para os períodos de Cheia e Vazante, tanto para o modelo de duas como para o de três bandas. A diferença de concentração de clorofila-a e TSS é o principal limitante dos modelos empíricos aplicados à esta área de estudo, onde o aumento da concentração de clorofila-a contribui para um melhor ajuste, enquanto o aumento na concentração de TSS dificulta a estimativa.

Por fim, de acordo com os resultados encontrados, os modelos empíricos de duas ou três bandas podem ser utilizados em águas da planície de inundação do Lago Grande Curuai - PA desde que a melhor combinação de bandas seja encontrada. Esta aplicação também depende fortemente da relação clorofila-a/TSS, visto que ela influencia diretamente na qualidade da previsibilidade do modelo.

## Referências

- BARBOSA, C. C. F. *Sensoriamento Remoto da Dinâmica da circulação da água do sistema planície de curuai /Rio Amazona*. 281 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2005.
- CHEN, S. et al. Evaluation of a three-band model for estimating chlorophyll-a concentration in tidal reaches of the Pearl River Estuary, China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 66, n. 3, p. 356–364, maio 2011.
- DALL'OLMO, G. et al. Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, v. 96, n. 2, p. 176–187, maio 2005.
- FERREIRA, R. D. *Dados fluorométricos e espectrais aplicados à estimativa da concentração de clorofila na Planície de Curuai / Rio Amazonas*. 103 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2012.
- GITELSON, A. A. et al. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 9, p. 3582–3593, set. 2008.
- GITELSON, A. A. et al. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study. *Remote Sensing of Environment*, v. 109, n. 4, p. 464–472, ago. 2007.