

## Identificação dos comprimentos de onda que apresentam as maiores correlações com diferentes concentrações de clorofila a e c no Reservatório de Ibitinga (SP)

Luciana de Resende Londe <sup>1</sup>  
Lilian Anne Krug <sup>1</sup>  
Gustavo Souto Fontes Molleri <sup>1</sup>  
Caroline Leão <sup>1</sup>  
Flávio Wachholz <sup>1</sup>  
Alexandre Marques de Aguiar <sup>1</sup>  
Evelyn Márcia Leão de Moraes Novo <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 – SERE – Cep 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{luciana, licakrug, molleri, caroline, evlyn}@dsr.inpe.br  
fwalemao@yahoo.com.br; amarques@img.com.br

**Abstract.** It is possible to analyze phytoplankton absorption features using the continuum removal technique. This work aims to use this technique to identify the more sensible wavelengths in relation to chlorophyll concentration. Field data were collected in 51 points in Ibitinga Reservoir (SP\_Brazil), from 24 to 28/October/2005, using *FieldSpec Hand Held* spectrum-radiometer. Five spectral groups were formed, using K-means method. All groups showed a high correlation between chlorophyll-a and chlorophyll-c and it made it difficult to distinguish these two pigments. Group 2 showed the highest differences. In addition, the shorter the range, the bigger the noise influence. Continuum removal is more efficient for small chlorophyll concentrations. Group 2 showed the more significant correlations amongst the tested groups.

**Palavras-chave:** spectral behavior, phytoplankton, chlorophyll-a, continuum removal, comportamento espectral, fitoplâncton, clorofila-a, remoção do contínuo.

### 1. Introdução

Freqüentemente as águas continentais apresentam combinações de diversos constituintes opticamente ativos (COAs), como o fitoplâncton, as substâncias orgânicas dissolvidas e as partículas minerais em suspensão. A ocorrência simultânea desses componentes, suas complexas interações e a interferência atmosférica tornam de difícil análise e interpretação os dados remotamente obtidos para corpos d'água (Mantovani, 1993).

Para analisar feições de absorção e espalhamento de pigmentos presentes na água, é necessário reduzir o efeito dos componentes indesejáveis. Pode-se isolar uma feição de absorção particular na análise de um espectro com a aplicação de técnicas como a remoção do contínuo (RC), que é um meio de normalizar espectros, permitindo a comparação de feições de absorção individuais a partir de um valor de base comum (Kruse et al., 1993).

Este trabalho teve como objetivo usar a RC para identificar os comprimentos de onda de maior sensibilidade às concentrações de clorofila-a e de clorofila-c para dados do Reservatório de Ibitinga (SP) e comparar o quanto esta técnica melhora o resultado desta identificação.

### 2. Área de Estudo

O Reservatório da Usina Hidrelétrica de Ibitinga localiza-se na região central do Estado de São Paulo (21°45' S, 48°59' W), tendo como limites as barragens de Bariri e Promissão. Encontra-se em um sistema denominado cascata, em função da ocorrência de outros reservatórios no mesmo trecho do rio Tietê (Luzia, 2004). Recebe aporte de materiais orgânicos e inorgânicos de seu entorno, caracterizado pelo predomínio de pastagens, ao lado

de zonas expressivas de cultivo de cana-de-açúcar e citricultura (Guimarães Júnior e Leopoldo, 1996).

### 3. Metodologia

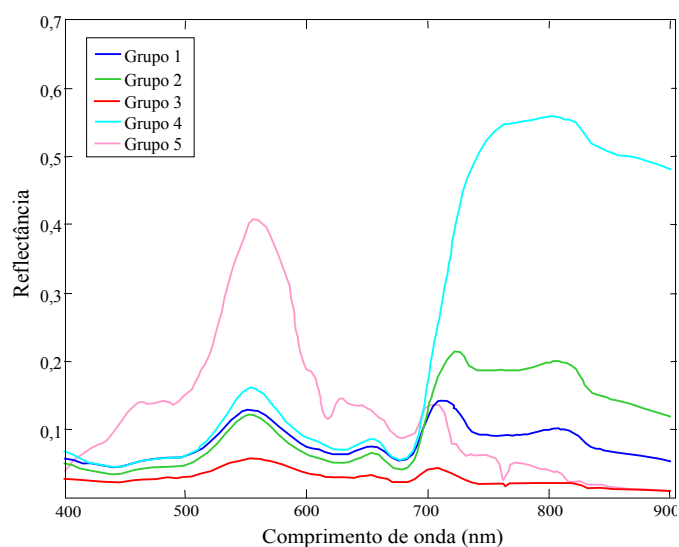
Os dados de espectrorradiometria deste trabalho foram medidos em 51 pontos no reservatório, no período de 24/10/2005 a 28/10/2005, com uso do aparelho FieldSpec Hand Held, (resolução espectral de 1 nm e a abrangência de 325 a 1075 nm). Também foram coletadas amostras de água de cada ponto medido, para análises posteriores em laboratório.

Para identificar as faixas espectrais com melhores correlações com as concentrações de clorofilas a e c das amostras, foram realizadas as seguintes etapas:

1. Delimitação do intervalo espectral de 400 a 900 nm para a realização das análises, para evitar as interferências por ruído nas extremidades dos espectros;
2. Agrupamento dos 51 espectros, pelo método K-means (*software* Matlab 6.5), em 5 grupos distintos, visando identificar amostras com características espectrais semelhantes;
3. Seleção de três grupos de espectros, com base na quantidade de amostras e na concentração média de pigmentos: grupo "todos", Grupo 2 e Grupo 3 (**Tabela 1**);
4. Determinação de 5 intervalos espectrais: 400-472 nm e 630-720 nm (bandas de absorção das clorofilas com base em análise visual); 450-480 nm e 630-700 nm, (faixas do espectro eletromagnético do azul e vermelho) e 400-900 nm, (todo o espectro em estudo);
5. Aplicação da técnica de RC (*software* ENVI 4.2) para identificar as principais feições de absorção nos diferentes intervalos determinados;
6. Geração de correlogramas das concentrações das clorofilas a e c com os espectros sem e com RC, para os três grupos citados no item 3, nos intervalos apresentados no item 4 e
7. Identificação dos comprimentos de onda que apresentaram as maiores correlações nos cinco intervalos determinados para os três conjuntos descritos.

### 4. Resultados e Discussão

Foram testadas divisões em 3, 4 e 5 grupos. O agrupamento em cinco grupos apresentou a melhor diferenciação dos espectros (**Figura 1**). Na **Tabela 1** estão apresentadas as concentrações de clorofilas a e c dos 5 grupos gerados.



**Figura 1** - Espectros dos 5 grupos.

**Tabela 1** - Concentrações das clorofilas a e c para os grupos.

Grupo	Número de pontos	Concentração média		Concentração mínima		Concentração máxima	
		Chl a (µg/l)	Chl c (µg/l)	Chl a (µg/l)	Chl c (µg/l)	Chl a (µg/l)	Chl c (µg/l)
1	6	593,76	22,79	152,57	6,24	1.573,26	61,47
2	11	1.441,83	59,88	377,33	15,89	2.661,50	115,91
3	27	119,59	5,85	6,14	0,34	1.177,18	52,21
4	6	34.179,22	1.812,4	779,75	0	76.809,84	4.758,2
5	1	59,26	3,47	59,26	3,47	59,26	3,47
Todos	51	4.526,88	235,43	6,14	0	76.809,84	4.758,2

A correlação entre as clorofilas a e c é significativa, com um coeficiente de determinação de 97%. Essa alta correlação dificulta a distinção espectral entre os dois pigmentos.

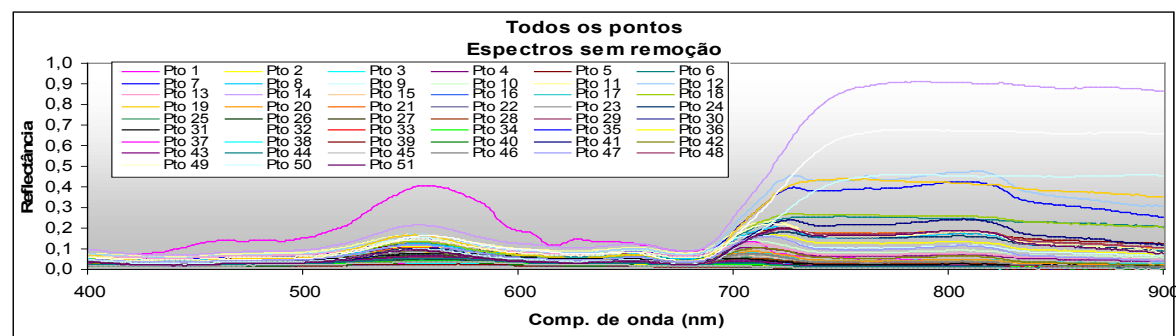
A seguir serão discutidos separadamente os resultados das análises de correlação para os grupos 2 e 3 e para os grupos com todos os pontos amostrados.

#### 4.1. Todos os pontos

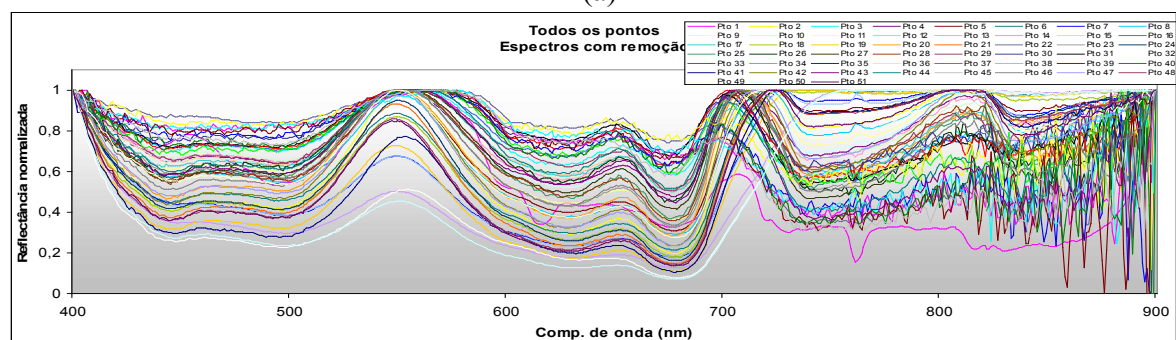
Na **Figura 2 (a)**, observam-se as curvas espectrais de todos os pontos. Os pontos 1 (Grupo 5), 14 (grupo 4) e 32 (Grupo 4) tiveram amplitudes maiores que os demais.

Em relação aos espectros com RC, as diferentes amplitudes nas feições de absorção (azul e vermelho) e de reflexão (verde e infravermelho próximo) se devem às diferentes concentrações de fitoplâncton.

A grande amplitude do infravermelho próximo deve-se à presença de florescimentos de algas, que formam aglomerados e refletem mais do que absorvem, considerando-se que haveria grande absorção nessa região do espectro se houvesse somente água no local amostrado.



(a)



(b)

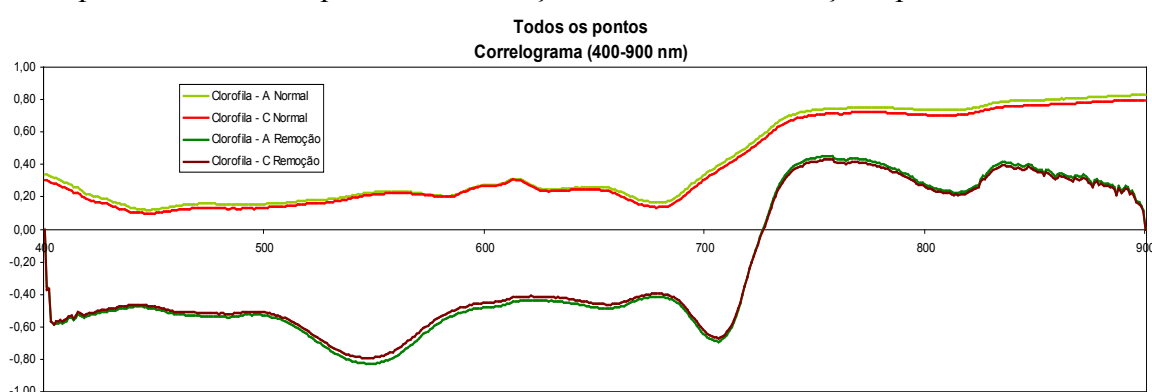
**Figura 2.** (a) Espectro de todos os pontos amostrais, (b) Espectros com o contínuo removido.

Todos os correlogramas sem RC (**Figura 3**) apresentam valores positivos de correlação. Após a aplicação desta técnica, com a normalização das curvas, os correlogramas passam a apresentar também valores negativos.

A partir de 700 nm a correlação aumenta significativamente nas curvas sem remoção, alcançando valores de 0,83 para a clorofila-a e 0,80 para a clorofila-c, devido ao aumento da reflectância na região do infravermelho, provocado por partículas espalhadoras na água.

Nas curvas com remoção, as feições de absorção e reflexão pelo fitoplâncton se tornam mais evidentes, visto que o sinal de outros componentes foi removido. Ocorre uma diminuição da correlação a partir de 700 nm, e esta torna-se positiva por volta de 730 nm.

Observa-se uma alta correlação em 550 e 700 nm, provavelmente devida à alta reflectância do fitoplâncton, principalmente na região do verde. As segundas maiores correlações correspondem às bandas de absorção no azul e no vermelho, devido ao maior retroespalhamento do fitoplâncton em relação às bandas de absorção típicas.



**Figura 3** – Correlograma contendo todos os 51 pontos amostrais, correspondente ao intervalo de 400-900 nm.

As correlações aumentaram com a RC (**Tabela 2**). Quando os comprimentos de onda das extremidades (400 e 900 nm) foram incluídos nas análises de correlação, verificaram-se as maiores correlações nestas extremidades (intervalos 400-472 nm e 400-900 nm). Isto foi observado apenas para os espectros sem RC, contendo todo o conjunto de pontos amostrais. Estas correlações possivelmente estão associadas a ruídos. Por outro lado, quando se utiliza a RC, as maiores correlações aproximam-se de feições associadas às clorofilas (423 e 547 nm).

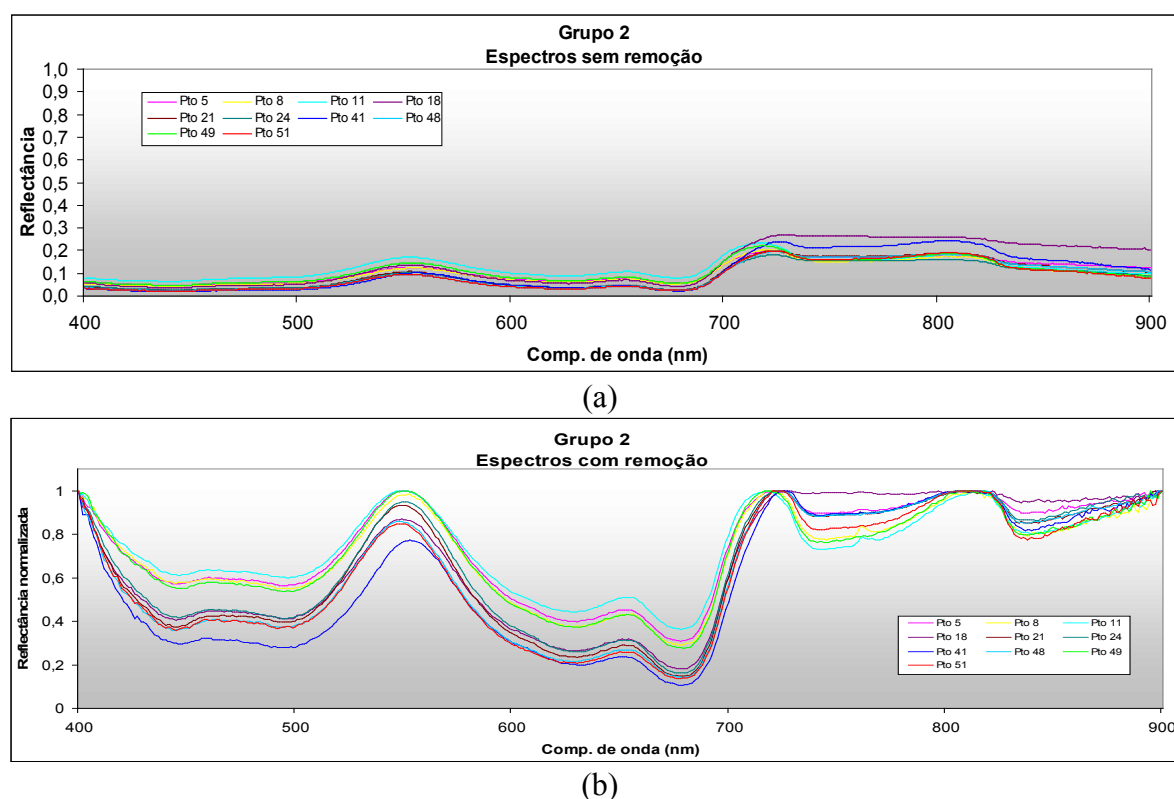
**Tabela 2** – Comprimentos de onda com as maiores correlações por intervalo.

Todos		Chl a			Chl c		
Intervalo		$\lambda$ (nm)	r	R <sup>2</sup>	$\lambda$ (nm)	r	R <sup>2</sup>
400-472 nm	Sem remoção	400	0,34	0,12	400	0,31	0,09
	Com remoção	423	-0,39	0,15	423	-0,38	0,14
Vermelho (630- 700 nm)	Sem remoção	700	0,34	0,12	700	0,31	0,10
	Com remoção	698	-0,40	0,16	698	-0,39	0,15
Azul (450- 480 nm)	Sem remoção	476	0,16	0,03	476	0,14	0,02
	Com remoção	479	-0,26	0,07	469	0,24	0,06
630-720 nm	Sem remoção	720	0,52	0,27	720	0,49	0,24
	Com remoção	711	-0,77	<b>0,59</b>	711	-0,74	<b>0,55</b>
400- 900 nm	Sem remoção	900	0,83	<b>0,69</b>	900	0,80	<b>0,64</b>
	Com remoção	547	-0,83	<b>0,69</b>	547	-0,79	<b>0,63</b>

## 4.2 Grupo 2

Na **Figura 4** observam-se as curvas espectrais referentes aos pontos do grupo 2. Esse grupo possui a segunda maior concentração de clorofilas a e c, caracterizando a grande amplitude das bandas de absorção e reflexão.

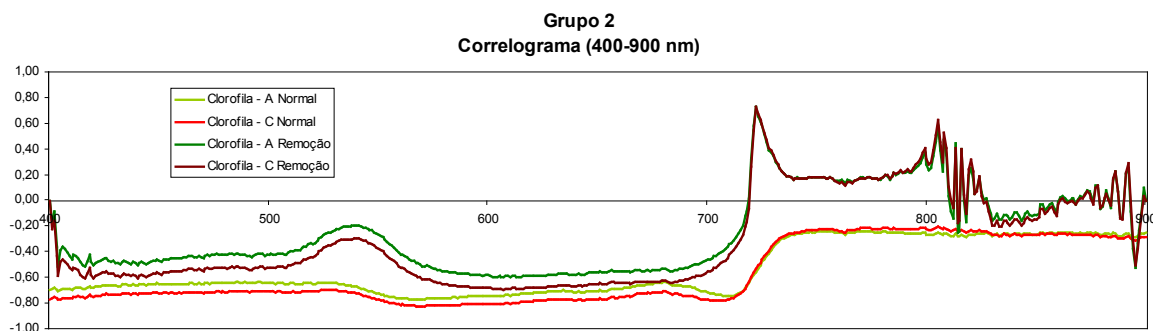
No infravermelho próximo, os picos apresentam amplitudes semelhantes, indicando a presença de substância húmica.



**Figura 4.** (a) Espectro de todos os pontos amostrais, (b) Espectros - grupo 2, após RC.

Na **Figura 5**, observa-se que as curvas sem remoção possuem valores negativos e alta correlação ao longo do visível, alcançando um máximo na região do verde (-0,82). Os baixos valores no infravermelho, indicam a presença de outros COAs influenciando na correlação.

Já as curvas com remoção apresentam altas correlações negativas referentes às bandas de absorção do azul e do vermelho. Há inversão dos sinais na região do infravermelho.



**Figura 5** – Correlograma do grupo 2, correspondente ao intervalo de 400-900 nm.

Em geral, as correlações do espectro sem RC são maiores que aquelas com RC. As maiores correlações estão nos comprimentos de onda de reflectância das clorofilas a e c (Tabela 3).

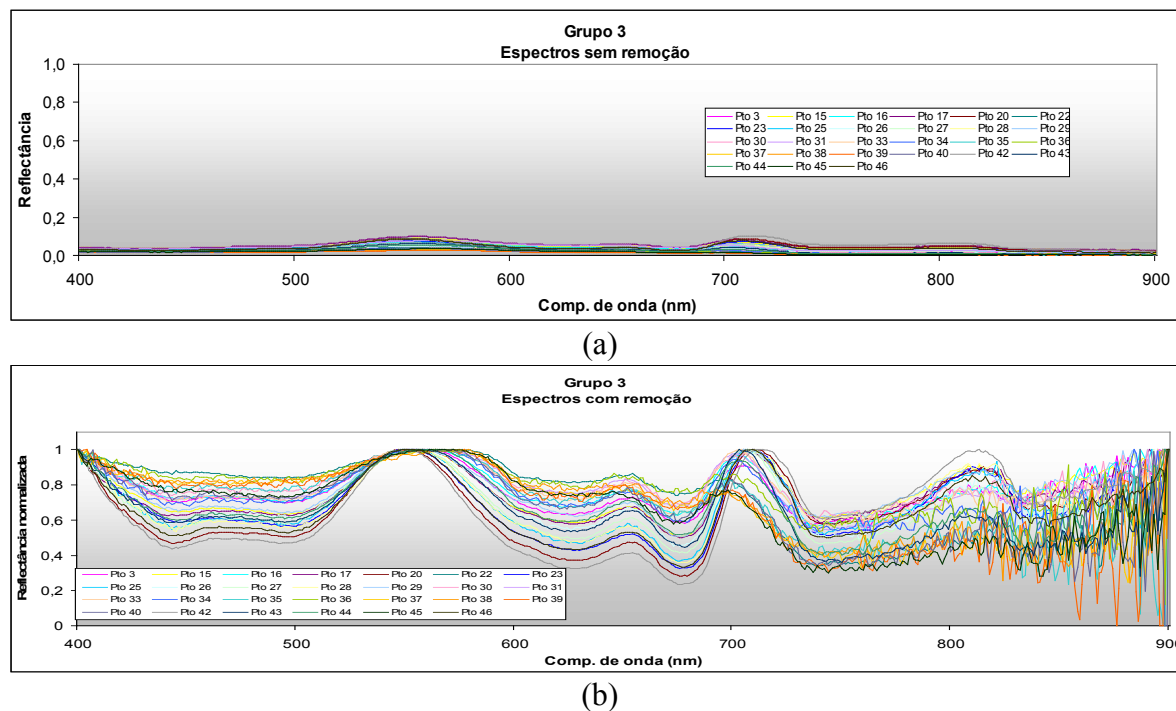
**Tabela 3** – Comprimentos de onda com as maiores correlações por intervalo.

Grupo 2		Chl a			Chl c		
Intervalo		$\lambda$ (nm)	r	R <sup>2</sup>	$\lambda$ (nm)	r	R <sup>2</sup>
400-472 nm	Sem remoção	404	-0,71	<b>0,50</b>	404	-0,77	<b>0,60</b>
	Com remoção	440	-0,59	0,34	440	-0,67	0,45
Vermelho (630- 700 nm)	Sem remoção	643	-0,72	<b>0,51</b>	643	-0,78	<b>0,61</b>
	Com remoção	643	-0,66	0,44	644	-0,74	<b>0,55</b>
Azul (450- 480 nm)	Sem remoção	451	-0,66	0,43	451	-0,73	<b>0,53</b>
	Com remoção	475	-0,74	<b>0,55</b>	475	-0,75	<b>0,56</b>
630-720 nm	Sem remoção	710	-0,75	<b>0,56</b>	704	-0,78	<b>0,61</b>
	Com remoção	684	-0,57	0,32	684	-0,66	0,43
400- 900 nm	Sem remoção	570	-0,77	<b>0,60</b>	570	-0,83	<b>0,68</b>
	Com remoção	722	0,73	<b>0,53</b>	722	0,73	<b>0,53</b>

### 4.3. Grupo 3

Esse grupo possui a menor concentração de clorofilas a e c, com exceção do grupo 5, caracterizando uma menor amplitude das bandas de absorção e reflexão.

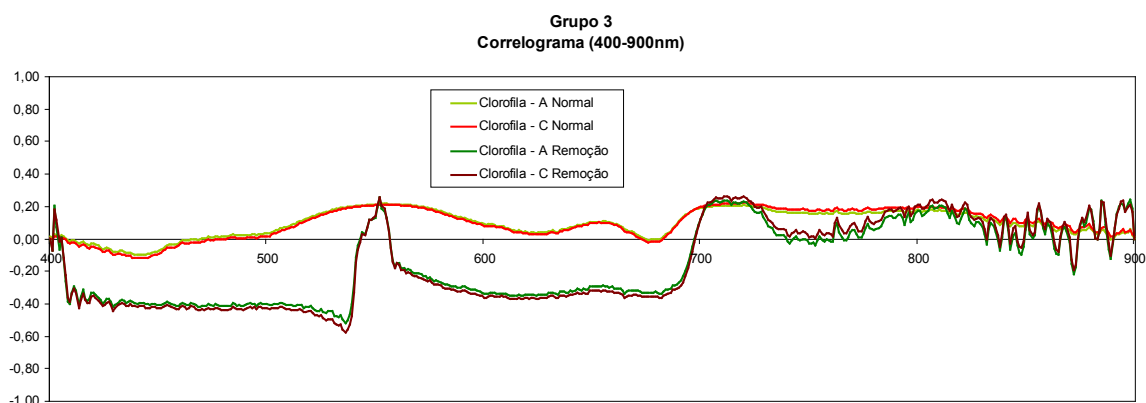
Assim como no grupo 2, observam-se, nos espectros com RC, feições de absorção no azul e vermelho e de reflexão no verde e infravermelho próximo (Figura 6).



**Figura 6** - (a) Espectros de todos os pontos amostrais, (b) Espectros-grupo3, com RC.

Na **Figura 7**, as curvas sem remoção apresentam uma amplitude de correlação pouco significativa. Observa-se que as curvas com remoção apresentam uma inversão brusca na região do verde, sendo ocasionada pela baixa concentração do fitoplâncton, que se torna uma partícula espalhadora à medida que se distancia do pico de reflexão.

Os baixos valores no infravermelho, indicam a presença de outros COAs, influenciando na correlação.



**Figura 7** – Correlograma do grupo 3, correspondente ao intervalo de 400-900 nm.

O grupo 3 apresentou as menores correlações (**Tabela 4**). Entretanto, a técnica de RC apresentou as maiores diferenças positivas entre as correlações dos pigmentos com os espectros sem e com RC, o que pode estar relacionado ao fato de o grupo 3 possuir as menores concentrações de clorofilas em relação aos demais grupos analisados.

**Tabela 4** – Comprimentos de onda com as maiores correlações por intervalo.

Grupo 3		Chl a			Chl c		
		Intervalo	$\lambda$ (nm)	r	R <sup>2</sup>	$\lambda$ (nm)	r
400-472 nm	Sem remoção	442	-0,10	0,01	444	-0,12	0,01
	Com remoção	471	-0,69	0,48	471	-0,66	0,43
Vermelho (630- 700 nm)	Sem remoção	700	0,19	0,04	700	0,20	0,04
	Com remoção	673	-0,34	0,12	664	-0,37	0,14
Azul (450- 480 nm)	Sem remoção	450	-0,07	0,01	450	-0,09	0,01
	Com remoção	473	0,30	0,09	452	-0,30	0,09
630-720 nm	Sem remoção	720	0,21	0,04	720	0,22	0,05
	Com remoção	673	-0,33	0,11	673	-0,36	0,13
400- 900 nm	Sem remoção	555	0,22	0,05	720	0,22	0,05
	Com remoção	536	-0,52	0,27	536	-0,58	0,33

## 5. Conclusão

Os intervalos espectrais apresentaram altas correlações para os comprimentos de onda referentes às feições de absorção e reflectância das clorofilas a e c, para os espectros com e sem RC.

Verificou-se que, a exemplo do grupo 3, quanto menor for a concentração de clorofila, mais eficiente será a técnica de RC, a qual aumentou significativamente as correlações.

As altas correlações encontradas para todos os espectros contendo os comprimentos de onda entre 690-900 nm, não estão relacionadas exclusivamente à variação da concentração dos pigmentos, mas, possivelmente, à concentração de material orgânico dissolvido, que aumenta a amplitude da reflectância nesta faixa do espectro. Neste intervalo de comprimentos de onda observou-se, para os espectros com RC, uma inversão dos sinais de correlação, mostrando que nesta região do espectro a absorção por clorofila é praticamente desprezível, em concordância com Mantovani (1993).

Para os três grupos estudados, as maiores correlações estão presentes no intervalo de 400-900 nm. Estas são associadas aos comprimentos de onda referentes às bandas de maior reflexão dos pigmentos de clorofila. Este fato indica uma maior sensibilidade das bandas de maior reflexão para as variações nas concentrações de clorofilas.

O grupo 2 foi o que apresentou as correlações mais significativas dos três conjuntos testados. Cabe destacar que os espectros sem remoção obtiveram maiores correlações do que os espectros removidos neste grupo.

## 6. Agradecimentos

À FAPESP (Processo 04/15901-4) e à CAPES (Processo 177305-4). Ao Enner Herenio de Alcântara e ao Conrado M. Rudorff.

## 7. Referências Bibliográficas

Guimarães Junior, C.; Leopoldo, P. R. Caracterização limnológica do reservatório de Ibitinga – SP: Parâmetros físicos. *Energia na Agricultura*, v. 11, n. 4. 1996.

Kruse, F. A.; Lefkoff, A. B.; Boardman, J. W.; Heidebrecht, K. B.; Shapiro, A. T. P.; Barloon, J.; Goetz, A. F. H. The spectral image processing system (SIPS) – interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, v. 44, n. 2-3, p. 145-163, 1993.

Luzia, P.A. **Limnologia e grau de trofia dos reservatórios em cascata do rio Tietê (médio e baixo Tietê, SP)**, São Carlos – SP (Dissertação de Mestrado), p. 101, 2004.

Mantovani, J. E. **Comportamento espectral da água: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e de matéria inorgânica particulada**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1993.