

Avaliação da reflectância espectral da água do açude Santo Anastácio, através de técnicas de espectroscopia de campo

Fernando Bezerra Lopes¹
Ana Célia Maia Meireles¹
Eunice Maia de Andrade¹
Cláudio Clemente Faria Barbosa²
Rafaela Ferreira Caitano¹
Luiz Carlos Guerreiro Chaves¹

1 Universidade Federal do Ceará – UFC
Caixa Postal 6003, CEP: 60455-970, Fortaleza, CE, Brasil
{lopesfb, ameireles2003, rafaela_caitano, luiscarlosguerreiro}@yahoo.com.br;
eandrade@pq.cnpq.br

2 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515, CEP: 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
claudio@dpi.inpe.br

Abstract. The aim of the present work was to study the chlorophyll-a (Cl-a) concentrations in the Waters of urban area dams through spectral reflectance. The water samples and radiometric measures were performed in October 2010, in 16 random points in the Santo Anastácio dam, Campus do Pici, Fortaleza, Ceará. Mathematical analysis techniques were used to identify the characteristic spectral features of the Cl-a and the regression analysis to generate the explanatory model of the concentrations of this component. The analysis results of the reflectance factor presented characteristic features of the spectral behavior of Waters rich in Cl-a. The results showed that the first derivate permitted to accentuate information seen in the spectral curves. The highest correlation coefficients of the chlorophyll-a with the first order derivate are found in the wavelengths ranging from 550 nm ($r = 0.7677$) and 709 nm ($r = 0.9627$). The regression model relating the chlorophyll-a concentration with the first derivate in 709 nm, was adjusted with a R^2 of 0.9267. The adjusted model presented good performance of the analyzed statistical parameters. According to Willmont's index (d) and the performance index (c), the model developed for the Cl-a variable showed to be very reliable, presenting a degree of performance considered "optimum" ($c > 0.85$). The adjusted regression model showed that it is possible to infer upon the variable Cl-a, in the studied area, based on the spectral responses of this variable.

Palavras-chave: water quality, hyperspectral data, chlorophyll-a, regression model, derivative analysis, qualidade da água, dados hiperespectrais, clorofila-a, modelo de regressão, análise derivativa.

1. Introdução

A água é a substância mais abundante no planeta, embora disponível em diferentes quantidades e em diferentes lugares. Possui papel fundamental no ambiente e na vida humana, e nada pode substituí-la, pois, sem ela, a vida não pode existir. Devido ao crescimento da população mundial, às altas taxas de consumo de água, ao modelo de desenvolvimento adotado e à contaminação dos recursos hídricos pela ação antrópica, a disponibilidade hídrica torna-se cada vez mais escassa (VEGA et al., 1998).

As fontes poluidoras e a determinação do tipo e concentração de substâncias lançadas nos corpos hídricos podem ser identificadas e investigadas por meio do monitoramento. O monitoramento ambiental em grandes áreas requer um grande número de coletas para a determinação de alguns parâmetros de controle da qualidade da água (análises físico-químicas e biológicas). Esses requerimentos têm sido apontados como uma das dificuldades no desenvolvimento e avaliação deste processo, aliados aos altos custos das análises. Nos últimos anos, as técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto têm se desenvolvido, com

grandes resultados em diversas áreas: análise e monitoramento do uso da terra, agricultura, floresta, geologia e geomorfologia, planejamento municipal e regional e nos recursos hídricos.

No sensoriamento remoto dos corpos d'água buscam-se relações entre respostas no domínio espectral e características limnológicas, como composição e componentes biofísicos da água, relevantes para o monitoramento de ecossistemas aquáticos continentais (RENÓ, 2009). A variabilidade espectral na refletância de um corpo d'água é influenciada, ainda, pela profundidade local (MARITORENA et al., 1994) e pela rugosidade superficial.

De acordo com Rudorff (2007), os sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes, matéria orgânica dissolvida e as moléculas de água, em si, são os principais agentes que regem as propriedades ópticas inerentes da água e, portanto, são chamados de constituintes opticamente ativos (COAs). Os efeitos espectrais dos COAs sobre a refletância da água têm sido amplamente discutidos na literatura (GITELSON, 1992; GOODIN et al., 1993; LI et al., 2002; RUNDQUIS et al., 1996; SHU et al., 2000; THIEMANN e KAUFMANN, 2002). Neste sentido, várias pesquisas e métodos usando o sensoriamento remoto vêm sendo propostos e desenvolvidos, visando a obtenção de medidas espaciais quantitativas de variáveis como clorofila-a (Cl-a), sólidos inorgânicos em suspensão, dentre outras (NOVO, 2008; JENSEN, 2009).

Portanto, objetivou-se com este trabalho estudar as concentrações de Cl-a nas águas do açude Santo Anastácio, coletadas em outubro de 2010, através da refletância. Foram usadas técnicas de análise matemática para identificar feições espectrais características da Cl-a e, a partir da análise de regressão, gerar um modelo explicativo das concentrações desse componente.

2. Metodologia de Trabalho

A área de estudo é o açude Santo Anastácio, Ceará (Figura 1). O açude possui uma bacia hidráulica com cerca de 12,8 hectares e uma bacia hidrográfica com aproximadamente 143.400 m², inserida na área urbana do município de Fortaleza. A barragem construída é de 182 metros de comprimento.

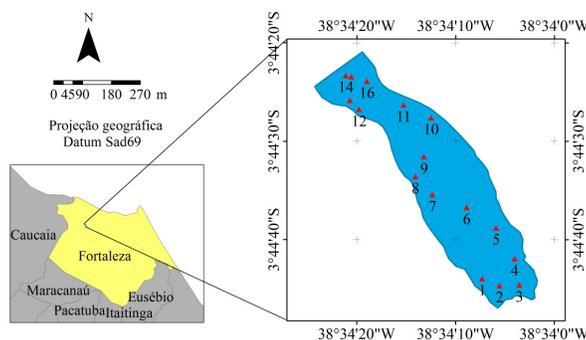


Figura 1. Localização dos pontos de coletas no açude Santo Anastácio, Ceará.

Realizou-se 16 medições da radiância espectral utilizando o espectrorradiômetro ASD *FieldSpec®3 Hi-Res*, com campo de visada (FOV) de 25°, resolução espectral de 1 nm, tempo de integração ajustado em 28 ms (milissegundos) e que abrange a faixa espectral de 350 a 2500 nm. Também foi utilizada uma placa de referência de *Spectralon*, representando uma superfície lambertiana. As medições foram realizadas no horário de 11h às 14h do dia 28 de outubro de 2010, o qual apresentou condições atmosféricas adequadas, com pouco vento e céu predominantemente livre de nuvens.

Concomitantemente, foram realizadas, nos 16 pontos, coletas de água na superfície do reservatório (Figura 1), profundidade de 30 cm, para avaliação dos parâmetros pH, Condutividade elétrica (CE), Clorofila-a (Cl-a), transparência de secchi e total de sólidos em

suspensão (TSS). Essas amostras foram analisadas conforme APHA (1998). Para os parâmetros pH, CE, transparência e TSS, foram gerados mapas temáticos, usando os softwares SURFER 13.0 e ArcMap 9.3. A interpolação foi realizada usando o método da krigagem.

Os valores de radiância, medidos pelo espectrorradiômetro, foram convertidos para o fator de reflectância pelo *software* do equipamento, isto é, a radiância dos alvos foi dividida pela radiância da placa de referência, fator que equivale a reflectância dos alvos. Isso possibilitou a análise das curvas de reflectância espectral. No momento da realização das medidas em campo, a atmosfera apresentava-se limpa, com a maior parte da radiação proveniente da componente direta. O aparelho usado para realizar as medições da radiância tinha um campo de visada de 25°, o fator de reflectância obtido é o Fator de Reflectância Direcional-Cônico.

Para o estudo detalhado das feições espectrais foi aplicada a técnica de análise derivativa, através da aproximação por diferenças finitas. A derivada de primeira ordem foi calculada utilizando a Equação 1.

$$\frac{dR_{\lambda}}{dx} \cong \frac{R_{i+1} - R_{i-1}}{2\Delta x} \quad (1)$$

em que: Δx é a separação entre duas bandas sucessivas. Sendo $\Delta x = x_j - x_k$, considera-se $x_j > x_k$ e que o intervalo entre bandas seja constante.

De acordo com Barbosa (2005), a primeira derivada elimina o sinal de fundo, remove a sobreposição de feições espectrais e realça os componentes de menor intensidade que compõem o espectro da reflectância, sendo aplicada em estudos de pigmentos fotossintetizantes e sólidos suspensos. A análise derivativa permite realçar as feições espectrais características por meio da diferenciação do espectro de reflectância (GOODIN et al., 1993).

O cálculo da regressão linear foi efetuado por meio de processamento eletrônico dos dados, empregando-se o software estatístico SPSS (Statistical Package For Social Sciences) versão 16.0 (NORUSIS, 1990). Utilizando-se o SPSS, foram obtidos os valores dos coeficientes (angular e linear) da equação, o coeficiente de determinação (r^2). Com o resultado da análise referente a Cl-a, relativo ao período outubro de 2010, obteve-se equação de regressão correlacionando-se as concentrações de Cl-a com os respectivos valor da análise derivada de primeira ordem do fator de reflectância. Verificou-se, então, o grau de dependência entre as variáveis.

Para o cálculo do modelo de regressão, foram utilizados os dados das estações ímpares (Figura 1), em seguida foi feita a validação do modelo empregando-se dados referentes aos dados das estações de coleta pares (Figura 1), evitando-se com isso falhas proporcionadas pela autocorrelação dos dados, o que poderia induzir o modelo a resultados tendenciosos.

Tabela 1. Interpretação dos coeficientes de correlação e determinação de Pearson.

Escala de Pearson		
Fraca	Moderada	Forte
$0 \leq r^2 \leq 0,25$	$0,25 \leq r^2 \leq 0,81$	$0,81 \leq r^2 \leq 1,00$
$0 \leq r \leq 0,50$	$0,50 \leq r \leq 0,90$	$0,90 \leq r \leq 1,00$

Adaptado de Milton (1992)

Para avaliar estatisticamente o desempenho do modelo de estimativa de Cl-a, correlacionou-se os valores estimados com os medidos (valores não empregados na análise de regressão, dados das estações pares), tomando-se como base os indicadores estatísticos

propostos por Camargo e Sentelhas (1997), definidos da seguinte forma: precisão – coeficiente de correlação “r” (Tabela 1); exatidão – índice de Willmott “d” e de confiança ou desempenho “c” (Tabela 2).

A precisão é dada pelo coeficiente de correlação que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, ou seja, o erro aleatório. A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente, esta aproximação é dada por um índice designado concordância, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985), cujos valores variam de zero, para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita. O índice é dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \quad (2)$$

em que: *d* - é o índice de concordância de willmott; *P_i* - expressa o valor estimado da variável; *O_i* - representa o valor observado; *O*- define a média dos valores observados.

O índice de confiança ou desempenho “c” para indicar o desempenho dos métodos segundo Camargo e Sentelhas (1997), é representado pelo produto dos índices de precisão “r” e de exatidão “d”.

Tabela 2. Critérios de interpretação do índice de desempenho “c”.

Valor de “c”	Desempenho	Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo	0,51 a 0,60	Sofrível
0,76 a 0,85	Muito Bom	0,41 a 0,50	Mau
0,66 a 0,75	Bom	≤ 0,40	Péssimo
0,61 a 0,65	Mediano		

Adaptado de Camargo e Sentelhas (1997)

3. Resultados e Discussão

Na Figura 2, são apresentados os resultados da espacialização dos dados coletados no campo para as variáveis CE (Fig. 2A), pH (Fig. 2B), transparência (Fig. 2C) e TSS (Fig. 2D).

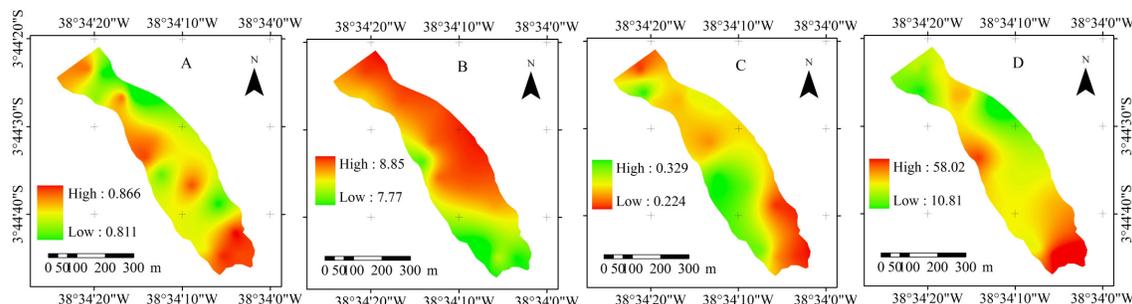


Figura 2. Espacialização das variáveis limnológicas no açude Santo Anastácio, Campus do Pici, Fortaleza, CE: (A) – CE (dS m⁻¹); (B) – pH; (C) – transparência (m); (D) – SST (mg L⁻¹).

Verifica-se que não houve grande variação com relação aos valores da CE e do pH, mas uma variação nos valores de TSS e, conseqüentemente, na transparência da água. As concentrações mais elevadas de TSS estão ligada ao fato do açude está localizado em uma bacia urbana, com grande ocupação populacional no seu em torno. De acordo com Araujo (2003), mais da metade da área da bacia é ocupada por conjuntos habitacionais, aproximadamente 100 habitantes por hectares, muito dos quais sem qualquer infra-estrutura, recebendo grande quantidade de esgoto e lixo, ricos em nutrientes e sedimentos.

Na Figura 3, apresentam-se os espectros do fator de reflectância para todos os pontos amostrados, bem como a aplicação da análise derivativa de primeira ordem para auxiliar a

identificação de feições. A análise da Figura 3A permite observar algumas feições características do comportamento espectral de águas ricas em Cl-a (RUNDQUIST, et al. 1996; GITELSON, 1992). Observa-se principalmente a baixa reflectância de 400 a 500 nm, devido à absorção destes pigmentos em 430 nm e pela forte absorção da água nesta região; máximo de reflectância na região do verde, em torno de 550 nm; mínimo de reflectância na região do vermelho, por volta de 668 nm, devido à absorção da Cl-a; e pico de reflectância em torno de 709 nm, atribuído à ambos, alto espalhamento e absorção mínima por todos os componente opticamente ativos, incluindo a água pura (GITELSON, 1992). Outro ponto identificável no espectro deste alvo é um pequeno pico de reflectância na região do infravermelho próximo (por volta de 756 nm), atribuído à extensão vibracional das moléculas da água (KIRK, 1986).

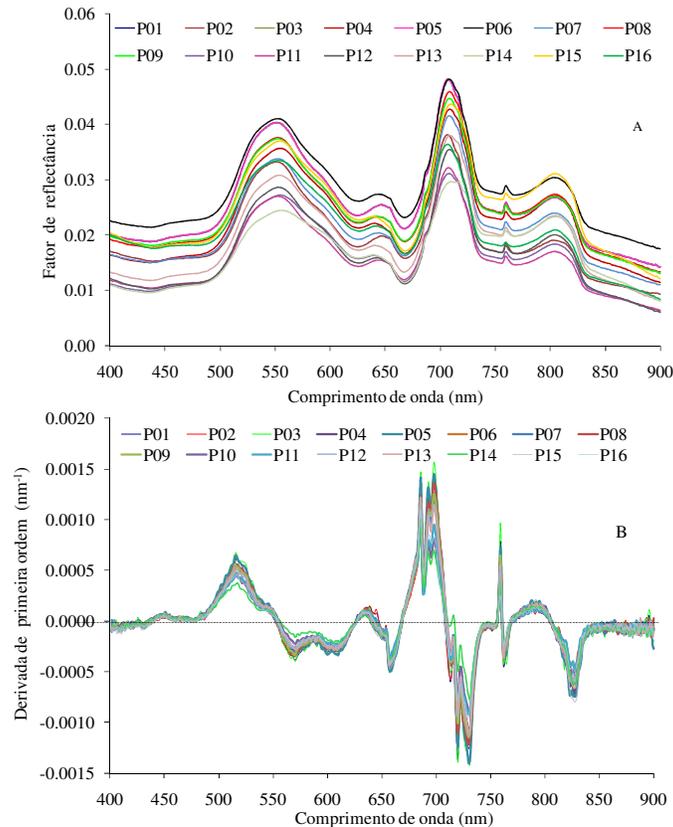


Figura 3. Espectros da água (A) e a derivada de primeira ordem (B).

A derivada de primeira ordem realçou uma feição em 690 nm, descrita na literatura (RUNDQUIST et. al 1996), como uma importante feição (Figura 3B) para estimativa de Cl-a em águas superficiais com alta concentração deste pigmento. Pela Figura 3B pode-se observar que todas as curvas espectrais apresentaram o mesmo comportamento na análise derivativa, variando apenas em intensidade.

Na Figura 4 tem-se a correlação entre a concentração de Cl-a com sua respectiva resposta espectral da derivada de primeira ordem em cada ponto amostrado. Os maiores coeficientes de correlação da Cl-a se encontram nos comprimentos de 550 nm ($r = 0,7677$) e 709 nm ($r = 0,9627$). Estes valores estão de acordo com a literatura, dado que o comprimento de onda próximo a 700 nm tem sido utilizado por vários pesquisadores para correlacionarem com concentrações de clorofila. Os comprimentos de onda em 705, 706 e 708 nm foram observados e utilizados por Shu et al. (2000), Li et al. (2002) e Thiemann e Kaufmann (2002). De acordo com Gitelson (1992), avaliando a relação de magnitude e posição da concentração

de clorofila, o pico do espectro da radiação em torno de 700 nm apresenta uma estreita correlação com a concentração de clorofila.

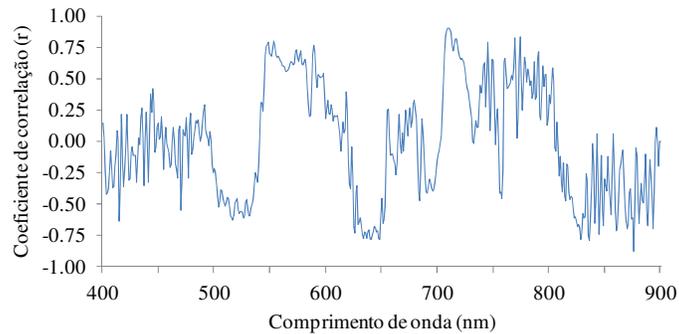


Figura 4. Correlograma mostrando derivada de primeira ordem e concentração de clorofila-a.

Dessa forma, a partir das respostas espectrais obtidas, ajustou-se um modelo de regressão relacionando a concentração de Cl-a com derivada de primeira ordem em 709 nm (Figura 5A).

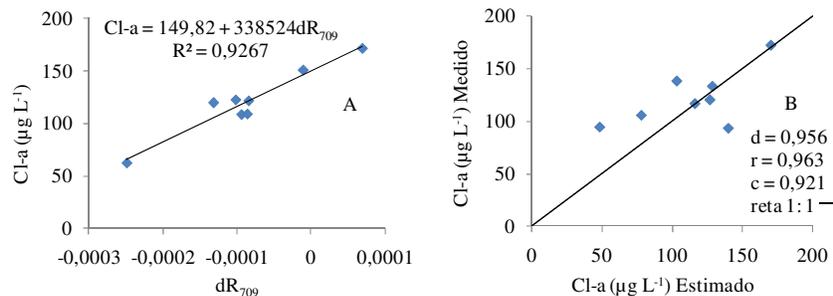


Figura 5. Modelo empírico para estimar a concentração de Cl-a (A) e teste de exatidão do modelo para a estimativa de Cl-a (B) para o açude Santo Anastácio.

Na Figura 5B é apresentado o grau de relacionamento entre as concentrações medidas e as estimadas a partir do modelo desenvolvido para a Cl-a. Essa comparação é de extrema importância para fornecer suporte para a avaliação da acurácia do modelo. Um grau de relacionamento perfeito é encontrado sempre quando os pares de pontos (estimados e medidos) coincidem com a reta 1:1. Nessa situação têm-se os valores simulados pelo modelo exatamente iguais aos observados em laboratório representando uma condição teórica. Percebe-se, pelo índice de Willmontt (d) e pelo índice de desempenho (c) que o modelo desenvolvido para a variável Cl-a mostrou-se bastante confiável, indicando que esse parâmetro pode ser estimado a partir da derivada de primeira ordem do fator de reflectância no comprimento de onda de 709 nm fazendo uso do modelo desenvolvido para as águas do açude Santo Anastácio com elevado grau de confiabilidade.

Pelos índices aplicados, verifica-se que o modelo ajustado apresenta coeficiente de correlação (r) e índice de Willmontt (d) iguais a 0,921 e 0,956, respectivamente, proporcionando um grau de desempenho considerado “ótimo” ($c > 0,85$), conforme descrito na Tabela 2 (CAMARGO; SENTELHAS, 1997). Observa-se que, o modelo analisado, apresenta uma tendência em subestimar os valores para concentrações de Cl-a menores que $100 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 5B).

A espacialização da concentração de Cl-a medida em laboratório, usada para validar o modelo de regressão para o açude Santo Anastácio, e o resultado gerado utilizando o modelo (Figura 5A), podem ser observadas nas Figuras 6A e 6B, respectivamente. Já a Figura 6C apresenta a diferença entre a concentração de Cl-a medida em laboratório e a estimada,

usando o modelo de regressão. A interpolação foi realizada usando o método da krigagem no software SURFER 13.0. Os mapas temáticos foram gerados no software ArcMap 9.3, Figura 6.

Na Figura 6A, observa-se que o açude apresenta alta concentração de Cl-a variando de 93,32 a 171,24 ($\mu\text{g L}^{-1}$). Isso ocorre em virtude deste reservatório ter sido submetido a efeitos antrópicos, tais como: a ocupação desordenada, uso inadequado do solo e ao lançamento de resíduos sólidos e efluentes sem qualquer tratamento prévio, que acabam constituindo-se em fonte de contaminação das reservas hídricas e uma ameaça à saúde pública, levando o reservatório a um estado avançado de eutrofização (ARAÚJO, 2003).

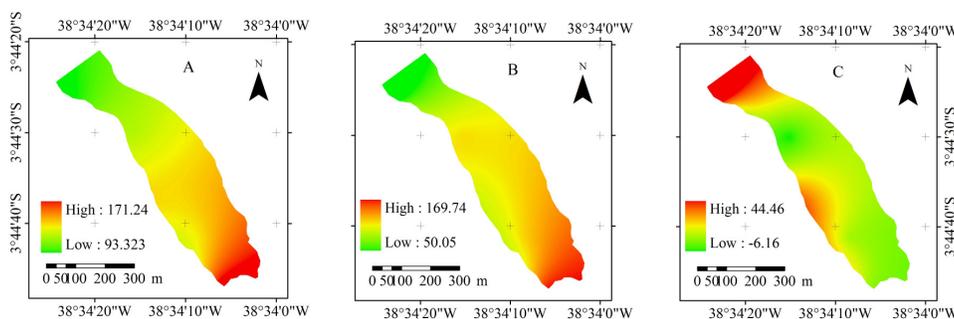


Figura 6. Concentração de Cl-a ($\mu\text{g L}^{-1}$): medida em laboratório (A); estimada usando o modelo da Figura 5B (B) e diferença entre as concentrações medidas e estimadas.

Observa-se que o modelo de regressão (Figura 5A), apresenta um bom desempenho para a estimativa da concentração de Cl-a (Figura 6B). Porém, o modelo apresenta uma tendência em subestimar os valores para concentrações de Cl-a mais baixas (Figura 6C). Verifica-se ainda que o modelo, para a grande parte da superfície do açude, apresenta valores estimados pelo modelo próximos aos valores medidos em laboratório para as concentrações de Cl-a.

4. Conclusões

A primeira derivada mostrou-se uma ferramenta importante na análise dos dados estudados, acentuando informações vistas nas curvas espectrais. O modelo de regressão ajustado mostrou que é possível inferir sobre a variável Cl-a, na área de estudo, com base nas suas respostas espectrais. Outros levantamentos e análises devem ser realizados a fim de conhecer melhor os intervalos espectrais que mais se correlacionam com as variáveis limnológicas. A correlação entre os dados de Cl-a e refletância pode ser considerada muito boa, baseada nos parâmetros estatísticos analisados. Porém, o modelo apresentado possui valor ilustrativo e não conclusivo, já que seriam necessárias análises mais aprofundadas com quantidades maiores de amostras de diferentes datas e localidades. Os resultados podem, no entanto, servir de ponto de partida para estudos posteriores. O açude apresenta alta concentração de Cl-a. O reservatório está em estado avançado de eutrofização.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem aos professores Helena Becker (Depto de Química) e Raimundo Nonato Conceição (Enga. de Pesca) da UFC pelo apoio nas análises e coleta dos dados. Ao CNPq, CAPES e INCTSAL pelo apoio financeiro à pesquisa.

6. Referências

- APHA. **Standard methods for the examination of water and waste-water**. 16. ed. Washington: A. P. H. A.; A. W. W. A. and W. P. C. F., 1985. 128 p.
- ARAÚJO. J.C. Assoreamento em reservatórios do Semiárido: modelagem e validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.2, p.39-56, 2003.

- BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água no sistema planície de Curuai/Rio Amazonas. 2005. 281f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- GITELSON, A. A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 17, p. 3367-3373, 1992.
- GOODIN, D. G.; HAN, L.; FRASER, R. N.; RUNDQUIST, C.; STEBBINS, W. A.; SCHALLES, J. F. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, n.4, p. 505-510, 1993.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2 ed. por (pesquisadores do INPE): José Carlos N. Epiphanyo (coordenador); Antonio R. Formaggio; Athos R. Santos; Bernardo F. T. Rudorff; Cláudia M. Almeida; Lênio S. Galvão. São José dos Campos: Parêntese. 2009. 672 p.
- KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. Cambridge: Cambridge University Press. 401 p. 1986.
- LI, S.; WU, Q.; WANG, X.; PIAO, X.; DAI, Y. Correlation between reflectance spectra and contents of chlorophyll-a in Chaohu Lake. **Journal of Lake Sciences**, 14, 2002. p. 228-234.
- MARITORENA, S.; Morel, A.; GENTILI, B. Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: Influence of water depth and bottom albedo. **Limnol. Oceanogr.**, v.39, p. 1689-1703, 1994.
- MILTON, J. S. **Statistical methods in the biological and health sciences**. 2ed. New York: McGraw-Hill, 1992. 526p.
- NORUSIS, M.J. **SPSS Base System User's Guide**. Chicago, 1990. 520 p.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3. ed. São Paulo: Ed. Blucher, 2008. p. 363.
- RENÓ, V. F.; MORAES, L. E. S.; SAITO, E. A.; NASCIMENTO, R. F. F.; LOBO, L. F.; SAMIZAVA, T. M.; Novo, E.M.L.M. Caracterização espectral das águas da Planície do Rio Paraná a partir de imagens Landsat TM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal, Brasil. **Anais...** São José dos campos: INPE, 2009. p. 4821-4828.
- RUDORFF, C.M.; NOVO, E.M. L. M.; GALVÃO, L. S.; FILHO, W. P. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 37, n.2, p. 279-290, 2007.
- RUNDQUIST, D. C. LUOHENG, H. SCHALLES, J. F., PEAKE, J. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for first derivative near 690 nm. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 62, n.2, p. 195-200, 1996.
- SHU, X., YIN, Q.; KUANG, D., 2000, Relationship between algal chlorophyll concentration and spectral reflectance of inland water. **Journal of Remote Sensing**, 4, pp. 41-45.
- THIEMANN, S.; KAUFMANN, H., 2002, Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data a semiempirical multisensor and multitemporal approach for the Mecklenburg Lake District, Germany. **Remote Sensing of Environment**, 81, pp. 228-237.
- VEGA, M. PARDO, R.; BARRADO, E; DEBAN, L.. Assesment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. **Water Research**, v.32, n.12, p.3581-3592, 1998.
- WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; ROWE, C.M.; O'DONNELL, J. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, n.C5, p.8995-9005, 1985.