

Análise da variabilidade sazonal na concentração de clorofila *a* por meio da classificação supervisionada pelo SAM

Maria de Lourdes Bueno Trindade Galo^{1,2}
Rejane Ennes Cicerelli¹

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP/FCT

¹Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas

²Departamento de Cartografia

Rua Roberto Simonsen, 305 – 19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil

mlourdes@fct.unesp.br, rejaneunesp@gmail.com

Abstract. Phytoplankton blooms are episodic events related to eutrophic conditions of the aquatic environments that can be a risk to human health and aquatic biota. Often the phytoplankton activity is monitored by the chlorophyll *a* pigment content in the water body. In order to evaluate the potential of supervised classification by spectral angle mapping (SAM) to discriminate levels of chlorophyll *a*, hyperspectral and fluorimetric data were acquired in a section of Nova Avanhandava reservoir, located in Tietê river, SP, over the course of four *in situ* surveys, occurred between December 2011 and September 2012. The classes were specified by intervals of chlorophyll *a* concentration, whose limits were based on the current legislation on water quality. The fluorimetric data were used to estimate the pigment content in each georeferenced sample unit and to identify the spectra associated with each class of concentration. The SAM endmembers were defined by the mean reflectance spectrum, estimated from the sampling elements with concentration within the range of the class. The supervised classification by SAM allowed to discriminate levels of chlorophyll *a* with only 60% of overall accuracy, but made it clear the seasonal fluctuations in the pigment concentration and the occurrence of periods of phytoplankton blooms in the study area.

Palavras-chave: Spectra analysis, phytoplankton, *in situ* fluorimetry, water quality, análise de curvas espectrais, fitoplâncton, fluorimetria *in situ*, qualidade da água.

1. Introdução

O aumento e a diversificação dos usos múltiplos da água resultaram em uma multiplicidade de impactos de diversas naturezas e magnitudes (Tundisi et al., 2007), dentre os quais a eutrofização. Uma das causas da eutrofização é o crescimento excessivo de vegetais no corpo d'água e o grupo vegetal que primeiro responde à eutrofização é o fitoplâncton, cujo crescimento excessivo, segundo Tundisi et al. (2007), está ligado aos primeiros estágios de eutrofização de um ambiente aquático.

O fitoplâncton constitui um grupo heterogêneo, composto principalmente por algas fotossintetizantes, que se distribui por grande parte dos ambientes marinhos e aquáticos continentais do mundo. Nesses ambientes, é o principal responsável pela captação da energia eletromagnética e sua transformação em energia química, por meio do processo de fotossíntese. A clorofila *a* é o pigmento primário de todos os organismos fotossintetizantes e está presente em todas as classes de algas (Wetzel, 2001). Mesmo havendo certa diversidade de pigmentos que absorvem energia solar, é na clorofila *a* que ocorrem as principais reações do processo de fotossíntese.

Mesmo reconhecendo que a clorofila *a* é um importante indicador da qualidade da água, as agências ambientais realizam o monitoramento dessa variável em um número restrito de estações de coletas de variáveis limnológicas, conforme se observa no Relatório de Qualidade das Águas Superficiais do Estado - 2013 (CETESB, 2014). Embora os métodos de coleta e análise sejam precisos, essa cobertura é insuficiente para representar a real condição dos corpos d'água do Estado, tanto espacial quanto temporalmente.

Em se tratando da análise das transformações resultantes de mudanças nas funções de forças hidrológicas, climáticas e econômicas, Novo et al. (2007) mostram que o

sensoriamento remoto é uma alternativa eficaz no estudo dos sistemas aquáticos, pois permite a aquisição de dados sinópticos sobre grandes áreas da superfície terrestre, em diferentes épocas do ano, além de possibilitar a integração espacial das conexões entre uso da terra e funcionamento do sistema aquático.

A presença de pigmentos fotossintetizantes no fitoplâncton permite sua detecção por meio das propriedades ópticas específicas desses pigmentos. Devido à sua propriedade de interagir com a radiação eletromagnética (REM) provocando diferentes padrões de absorção e espalhamento, a clorofila *a* é considerada um componente opticamente ativo e, portanto é possível correlacionar sua ocorrência com medidas de reflectância obtidas por sensores ópticos. Além disso, é uma substância fluorescente que, quando irradiada em um comprimento de onda específico (excitação) tem o estado eletrônico de sua molécula alterado, voltando rapidamente ao estado fundamental, por um processo de decaimento energético radiativo, em um comprimento de onda de emissão maior que o de excitação.

A extração de informações a partir da clorofila *a* medida *in situ*, com base nas suas propriedades ópticas pode ser realizada pela identificação de feições diagnósticas em curvas de reflectância espectral ou pela aplicação de métodos de análise hiperespectral, tais como os mencionados por Chen (1992), Kruse et al. (1993), entre outros. Um desses métodos, definido como mapeamento pelo ângulo espectral (*Spectral Angle Mapping* - SAM), consiste em agrupar as curvas espectrais similares a um espectro de referência, representativo de uma propriedade de interesse, por meio de um método supervisionado.

A questão colocada como hipótese desta investigação é: variações na concentração de clorofila *a* definem feições diagnósticas que alteram a forma de curvas de reflectância espectral obtidas em ambiente aquático que apresenta variabilidade espaço-temporal na concentração dessa variável? Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi discriminar níveis de concentração de clorofila *a*, por meio da classificação pelo SAM de curvas espectrais obtidas em diferentes momentos no tempo e em elementos amostrais georreferenciados, para os quais foram realizadas simultaneamente medidas fluorimétricas da concentração de clorofila *a*.

2. Materiais e Métodos

A abordagem metodológica adotada constou da coleta de dados espectralradiométricos e fluorimétricos da concentração de clorofila *a*, em quatro levantamentos de campo, em uma área de estudos caracterizada previamente quanto à sazonalidade na atividade fotossintética. Os dados fluorimétricos foram usados para definir os intervalos de valores de concentração para as classes de interesse, estabelecidas com base na Resolução Conama 357 de 2005, que determina o limite de $30\mu\text{g L}^{-1}$ de clorofila *a* para águas doces da classe 2. As curvas espectrais geradas a partir dos dados espectralradiométricos foram tratadas e submetidas a uma classificação pelo algoritmo SAM, considerando o intervalo espectral de definição das curvas entre 400 e 900nm.

2.1 Área de Estudos

A área de estudo localiza-se no médio curso do Rio Tietê no Estado de São Paulo, Brasil, no Reservatório de Nova Avanhandava. A superfície aquática do reservatório é de 210 km², com profundidade média de 13 metros, vazão média anual de 688m³/s e tempo de residência da água variando de 32 a 119 dias (AES Tietê, 2014). Nova Avanhandava é o quinto reservatório da Cascata do Rio Tietê, constituída por seis barragens construídas entre os anos de 1960 e 1990, visando a exploração máxima do potencial de energia hidrelétrica e prática de múltiplos usos pela população.

O primeiro reservatório da cascata recebe alta carga de nutrientes de importantes centros urbanos no entorno de São Paulo e, apesar do efeito depurativo resultante da série de reservatórios, constata-se um aumento progressivo dos efeitos da eutrofização ao longo do

sistema. Além disso, a bacia apresenta cultivo extensivo, disposição de detritos urbanos e carga orgânica industrial, devido principalmente ao setor sucroalcooleiro, que tem causado aumento no transporte de nitrogênio e fósforo do meio ambiente terrestre para o aquático gerando uma série de impactos ambientais (Borba et al., 2005).

A área de estudo, com aproximadamente 8,4 km², foi restrita a uma seção do Reservatório de Nova Avanhandava, ilustrada na Figura 1 em uma composição colorida resultante da combinação das bandas espectrais 3 (vermelho), 2 (verde) e 1 (azul) do sistema orbital RapidEye. Na figura, a localização da área de estudo que tem coordenada central em E: 604.652,672m e N: 7.652.591,09m, na projeção UTM, Fuso 22 S, de acordo com o sistema de referência SIRGAS 2000, é destacada em vermelho.

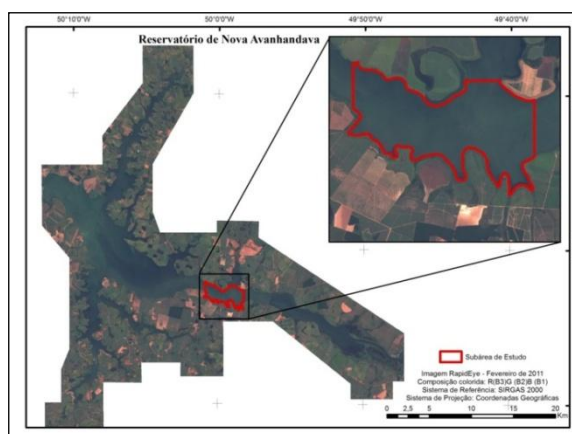


Figura 1. Reservatório de Nova Avanhandava e delimitação da área de estudo.

2.2 Levantamento de Dados *In Situ*

A aquisição de dados na área de estudos foi realizada em quatro levantamentos de campo entre dezembro de 2011 e setembro 2012, em períodos do ano que apresentaram, historicamente, comportamento distinto quanto à atividade fitoplanctônica. O delineamento amostral usado em cada levantamento foi diferente e refinado ao longo do processo, mas condições climáticas adversas e/ou problemas logísticos foram determinantes no tamanho de cada amostra. Para cada elemento amostral foram coletados dados espectrorradiométricos e fluorimétricos para estimativa de clorofila *a*. Além disso, alíquotas de água foram recolhidas e armazenadas adequadamente para posterior determinação *in vitro* da clorofila *a*. O número de unidades de amostragem consideradas efetivamente em cada levantamento de campo é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Aquisição de dados na área de estudos.

Levantamento de Campo	Data do levantamento	Período	Número de pontos	
			coletados	utilizados
1	13/12/2011	Primavera - Período chuvoso	11	06
2	15 e 16/02/2012	Verão - Fim época chuvas	30	30
3	27/03/2012	Outono - Início da seca	27	26
4	18/09/2012	Inverno - Início época chuvas	22	18

A clorofila *a* foi medida com o fluorômetro 10 AUTM (Turner Designs), que fornece valores relativos de fluorescência *in vivo* (IVF), de modo que foi necessário calibrar os valores de IVF lidos usando os dados de concentração de clorofila *a* obtidos a partir da extração em laboratório pelo método espectrofotométrico. Feito isso, construiu-se curvas de calibração relacionando os dados relativos de IVF de clorofila *a* com os dados a concentração

absoluta dessa variável, cujas equações de regressão linear e coeficientes de determinação (R^2) são apresentados na Figura 2, para cada levantamento de campo.

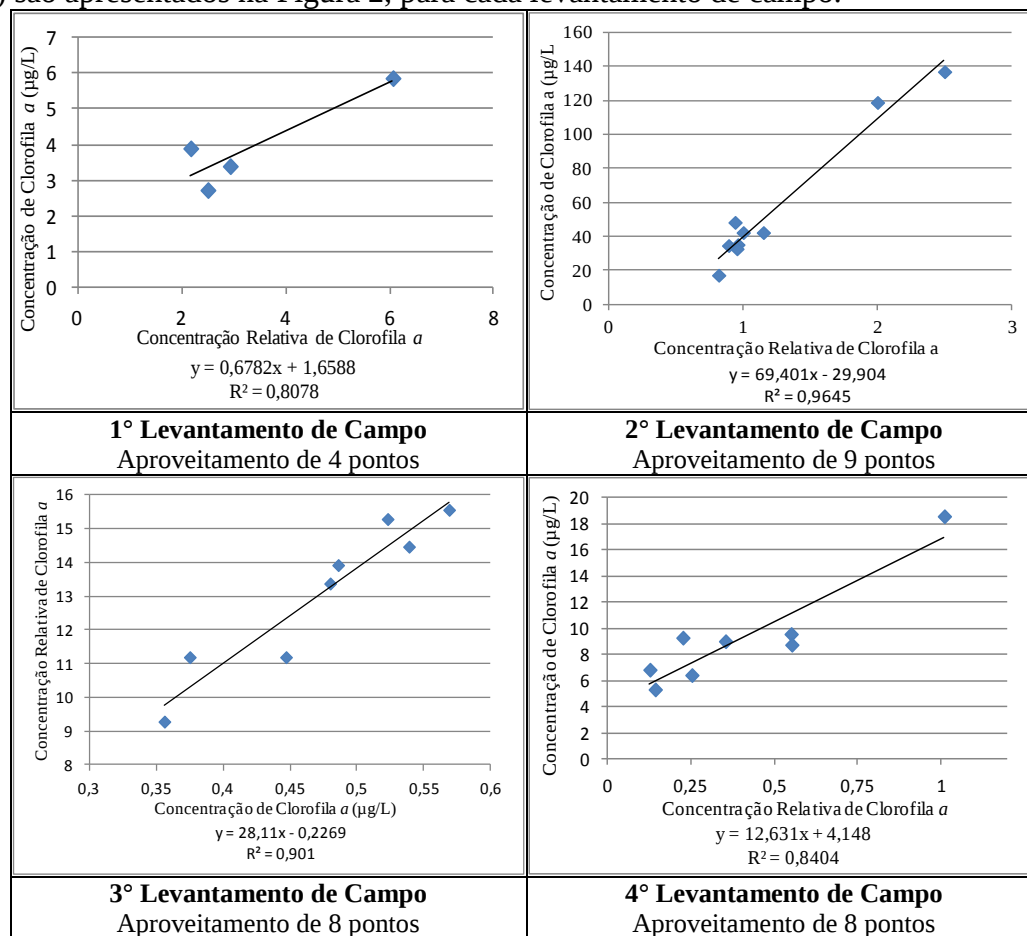


Figura 2 - Curvas de calibração para a estimativa de clorofila *a* a partir de valores relativos obtidos com o fluorômetro Turner 10-AU.

A medida espectral obtida em campo foi o fator de reflectância hemisférico cônico (FRHC), coletado com o espectrorradiômetro ASD FieldSpec HandHeld, modelo UV/VNIR operando em um intervalo espectral de 375-1075nm, configurado em 512 canais, com 1.6 nm de resolução espectral. O FRHC refere-se às medidas feitas com maiores ângulos de IFOV (*Instantaneous Field of View*) e iluminação ambiente e campo de visada instrumental constante. O protocolo de aquisição das medidas considera a razão da radiância da amostra (L_a, λ) e a radiância de uma superfície lambertiana de referência (ideal- L_r, λ), nas mesmas condições de iluminação e de observação (Schaeppman-Strub et al, 2006).

As curvas de reflectância espectrais geradas por espectrorradiometria de campo foram suavizadas e o intervalo espectral para análise foi especificado entre 400 a 900nm, a fim de reduzir o comportamento aleatório devido a ruídos. Além disso, foram descartadas as curvas espectrais que apresentaram características associadas às ocorrências de plantas aquáticas submersas.

2.3 Classificação pelo SAM

A discriminação das curvas espectrais com base em intervalos de valores de concentração de clorofila *a* foi feita por meio de uma classificação supervisionada usando o SAM. O algoritmo SAM foi desenvolvido por J. W. Boardman (Kruse et al., 1993) para mapear o grau de similaridade entre curvas espectrais geradas por sensores hiperespectrais, com curvas de referência, representativas da informação de interesse. O algoritmo determina a similaridade

espectral por meio do cálculo do ângulo formado entre um espectro teste (t) e um espectro de referência (r), tratando-os como vetores em um espaço de dimensionalidade correspondente ao número de bandas do sensor (nb). Segundo Kruse et al. (1993), o cálculo consiste em usar o arcocosseno do produto escalar dos espectros para determinar o ângulo θ :

$$\theta = \cos^{-1} \frac{t \cdot r}{\|t\| \cdot \|r\|} \quad (1)$$

o que pode ser escrito como:

$$\theta = \cos^{-1} = \frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{nb} t_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{nb} r_i^2}} \quad (2)$$

Essa medida de similaridade não é sensível a fatores de ganho, uma vez que o ângulo entre os dois vetores é invariante em relação aos comprimentos de onda (Kruse et al., 1993). Trata-se de uma abordagem de classificação supervisionada que ainda hoje tem ampla utilização na análise de dados hiperespectrais (Choo et al., 2010; Watanabe et al, 2013).

O algoritmo SAM, implementado em MATLAB, foi usado na classificação das curvas espectrais obtidas nos quatro levantamentos de campo. Os membros de referência para cada classe foram definidos pelas curvas médias, calculadas a partir de conjunto de curvas que apresentaram concentração de clorofila a nos intervalos estabelecidos com base no limite máximo ($30 \mu\text{g L}^{-1}$) admitido pela legislação em vigor (CONAMA, 2014). Além dos elementos amostrais usados para definir as curvas médias de referência para as classes de concentração de clorofila, apresentam-se na Tabela 2, as estatísticas gerais estimadas a partir dos elementos amostrais coletados em cada campanha de campo.

Tabela 2. Elementos amostrais usados na definição das curvas espectrais médias (membros de referência) das classes de concentração de clorofila a e estatísticas gerais da variável.

Concentração de clorofila a ($\mu\text{g L}^{-1}$)	Levantamento de campo			
	1 (dez/2011)	2 (fev/2012)	3 (mar/2012)	4 (set/2012)
Classe I: até $10 \mu\text{g L}^{-1}$	06	01	03	09
Classe II: entre 10 e $30 \mu\text{g L}^{-1}$	0	07	23	09
Classe III: maior que $30 \mu\text{g L}^{-1}$	0	22	0	0
Mínima	2,53	8,93	8,59	5,32
Máxima	8,64	150,96	16,04	24,35
Média	4,22	47,54	12,31	11,86
Desvio padrão	1,2	34,21	2,26	4,32

As curvas de referências das classes foram obtidas pela média aritmética dos valores espectrais de 19 elementos amostrais com concentração menor ou igual a $10 \mu\text{g L}^{-1}$ (classe I); 40 elementos com concentração entre 10 e $30 \mu\text{g L}^{-1}$ (classe II) e 21 maior que $30 \mu\text{g L}^{-1}$ (classe III). A classificação das curvas espectrais pelo SAM foi realizada considerando o intervalo de comprimento de onda entre 400 e 900nm.

3. Resultados e Discussão

3.1 Curvas espectrais de referência e classificadas pelo SAM

Na Figura 3 são mostradas as curvas espectrais médias definidas como membros de referência para as classes de concentração de clorofila a (em $\mu\text{g L}^{-1}$). No eixo das abcissas estão representados os comprimentos de onda, no intervalo de 400 a 900nm e no eixo das ordenadas os valores médios de reflectância calculados a partir do conjunto de curvas que apresentaram concentrações nos limites estabelecidos para cada classe. A Figura 4 indica as curvas espectrais classificadas pelo SAM para cada categoria.

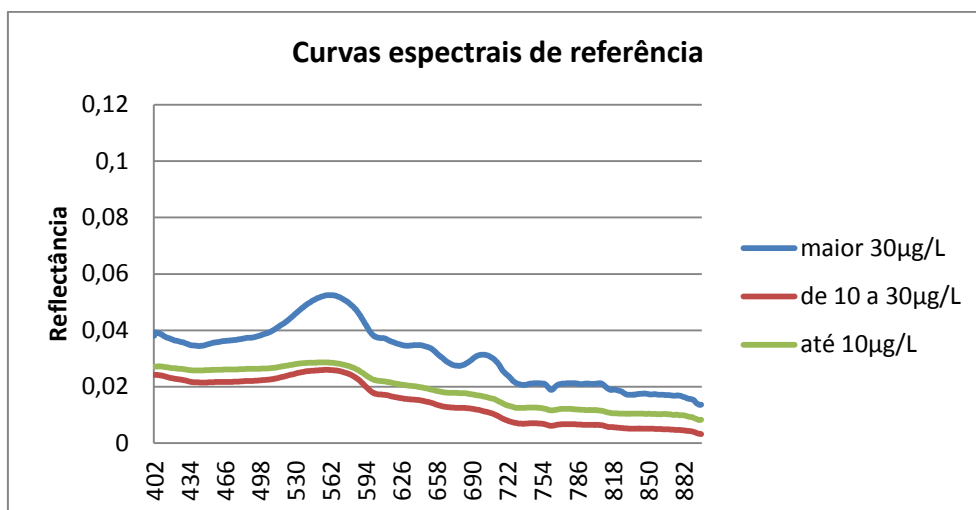


Figura 3. Curvas de reflectância médias usados como membro de referência para as classes de concentração de clorofila *a*. No eixo das abcissas são especificados os comprimentos de onda no intervalo entre 400 a 900nm.

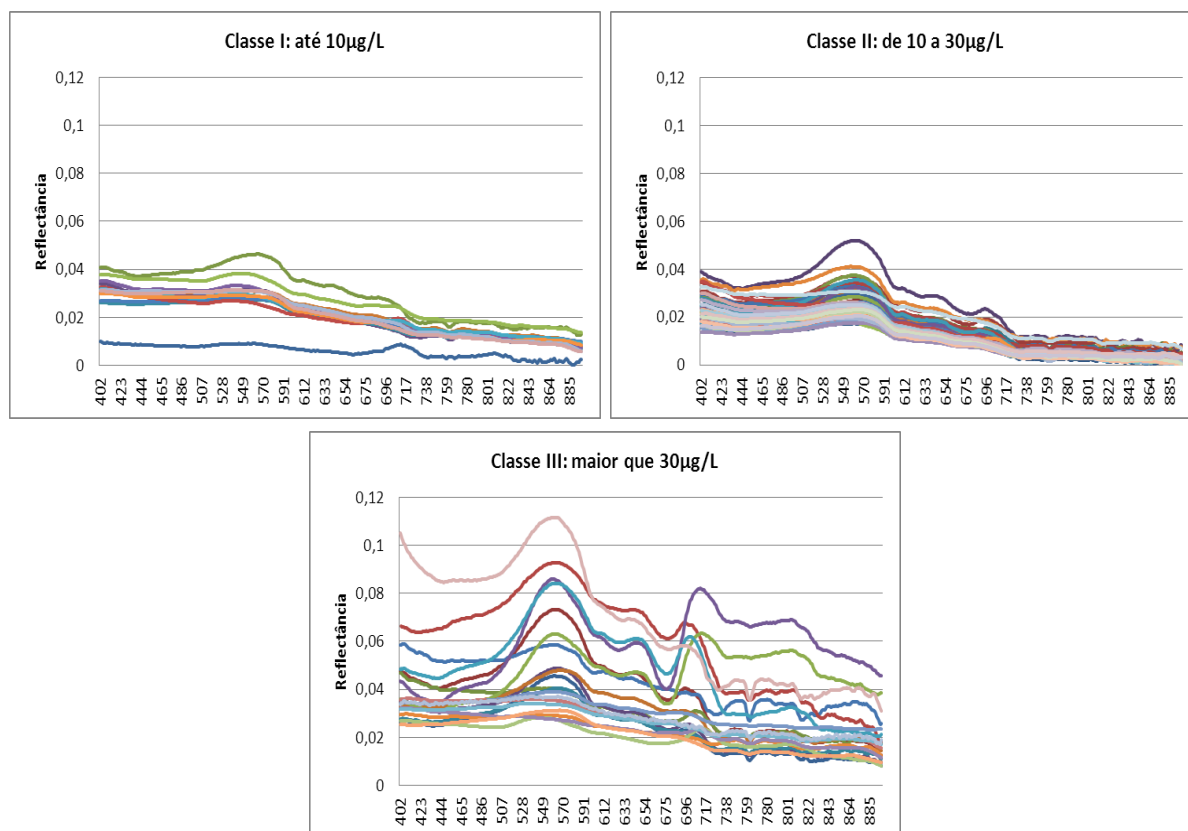


Figura 4. Curvas de espectrais associadas a cada intervalo de concentração de clorofila *a* pela classificação SAM.

A associação das curvas espectrais obtidas nos quatro levantamentos espectrorradiométricos a um dos membros de referencia (curvas médias) por meio da classificação supervisionada pelo SAM resultou em 14 curvas espectrais inseridas na classe I (até $10\mu\text{g L}^{-1}$) 44 classificadas como II (entre 10 e $30\mu\text{g L}^{-1}$) e 21 definidas com classe III (maior que $30\mu\text{g L}^{-1}$), sendo essa última classe a que definiu maiores variações em magnitude e forma das curvas associadas (Figura 3). Tal resultado é justificável, haja vista que os dados espectrorradiométricos usados para definir as curvas médias de referencia para a classe III

foram todos adquiridos no segundo levantamento de campo (fevereiro/2012), aquele no qual se obteve as maiores concentrações da variável e o maior desvio padrão (Tabela 2).

As curvas de referência das classes II e III apresentaram similaridades na sua configuração e uma provável causa desse comportamento é a ocorrência de elementos amostrais com concentrações de clorofila muito próximas do limiar entre essas duas classes (por exemplo, 23% dos elementos amostrais tiveram concentração de clorofila *a* entre 9 e 11 $\mu\text{g L}^{-1}$).

Para expressar os erros e concordâncias no processo de classificação realizado pelo SAM, no contexto deste estudo, elaborou-se a matriz de confusão mostrada na Tabela 3. As linhas da matriz expressam o resultado da classificação, enquanto que as colunas indicam os elementos amostrais que definiram concentração de clorofila *a* nos intervalos especificados para as classes. Linhas e colunas finais mostram a totalização por classe e os erros de co-omissão e omissão, respectivamente.

Tabela 3. Matriz de confusão da classificação pelo SAM.

Classificação SAM	Concentração de clorofila <i>a</i> medida por fluorimetria			
	Até 10 $\mu\text{g L}^{-1}$	De 10-30 $\mu\text{g L}^{-1}$	Maior 30 $\mu\text{g L}^{-1}$	Total
Até 10 $\mu\text{g L}^{-1}$	7	6	1	14
De 10-30 $\mu\text{g L}^{-1}$	6	30	9	45
Maior 30 $\mu\text{g L}^{-1}$	5	4	12	21
Total	18	40	22	80

Mesmo com os equívocos identificados principalmente nas classes extremas (erros de omissão de 0,61 e 0,45 e erros de co-omissão de 0,50 e 0,43, respectivamente para as classes I e III), provável influência da utilização de curvas médias como membros de referência para as classes, uma informação relevante fornecida pela classificação SAM foi a indicação dos períodos do ano em que ocorre maior atividade fotossintética. Nesse sentido, foi elaborada a Tabela 4 para especificar o número de elementos amostrais enquadrados pelo SAM nas faixas de concentração de clorofila *a*, para as quatro épocas dos levantamentos de campo.

Tabela 4. Elementos amostrais alocados a cada faixa de concentração de clorofila *a*, discriminados para cada levantamento de campo.

	1 (dez/2011)	2 (fev/2012)	3 (mar/2012)	4 (set/2012)	TOTAL
Até 10 $\mu\text{g L}^{-1}$	2	1	1	10	14
De 10-30 $\mu\text{g L}^{-1}$	3	17	25	-	45
Maior 30 $\mu\text{g L}^{-1}$	1	12	-	8	21
TOTAL	6	30	26	18	80

A predominância de curvas espectrais classificadas no intervalo entre 10 a 30 $\mu\text{g L}^{-1}$ é consistente com o que mostra a Tabela 2: a concentração de clorofila *a* medida por fluorimetria *in situ* para 39 dos 80 elementos amostrais estava nesse intervalo, confirmando que se trata de um corpo aquático com moderada atividade fitoplanctônica. Isso ocorreu apenas em algumas épocas do ano, pois a Tabela 4 mostra claramente um número considerável de elementos amostrais na classe II (concentração de clorofila *a* superior ao limite determinado pelo Conama), principalmente no mês de fevereiro/2012, no qual foi detectado não apenas alto teor do pigmento em alguns pontos, mas também uma concentração média de 47,54 $\mu\text{g L}^{-1}$ (Tabela 4), indicadora de intensa atividade fitoplanctônica.

3. Conclusões

Considerando as dificuldades em definir membros de referência para as classes, principalmente em se tratando limites de intervalos bastante rígidos e um número considerável de medidas concentração muito próximas desses limiares, a classificação supervisionada pelo SAM conseguiu discriminar níveis de concentração de clorofila *a* com uma acurácia global maior que 60%. Os resultados mostram o potencial do algoritmo na identificação de situações de maior atividade fotossintética em um corpo d'água continental.

Especificamente na situação analisada, a predominância de elementos amostrais com concentração de clorofila *a* menor que $30\mu\text{g L}^{-1}$ confirmam que as águas da seção estudada do reservatório de Nova Avanhandava se enquadram adequadamente na classe 2 do Conama, porém a ocorrência de altas concentrações de clorofila *a* em um número significativo de elementos amostrais, principalmente no mês de fevereiro de 2012, indicam períodos de florescimento de fitoplâncton no reservatório. Como há indícios da ocorrência de cianobactérias entre os grupos de algas presentes, o monitoramento sazonal do corpo aquático por meio de dados espectrorradiométricos e a classificação supervisionada das curvas espectrais pelo SAM, pode ser alternativa interessante para a identificação de possíveis episódios de florescimento de algas e indicação da necessidade de análises mais detalhadas.

Referências Bibliográficas

AES TIÊTE Nova Avanhandava. Disponível em:

<<http://www.aestiete.com.br/usinas/Paginas/Usinas.aspx>>. Acesso em 15.out.2014.

Borba, M. P.; Otero, P.; Pinheiro, C. H. R. Rede Paulista de Educação Ambiental. **Orientação para educação ambiental nas bacias hidrográficas do Estado de São Paulo: origem e caminhos**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo. 2005.

CETESB. Qualidade das águas Superficiais no Estado de São Paulo 2013. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/35-publicacoes/-relatorios>>. Acesso em: 20.out. 2014.

Chen, Z. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration, **Remote Sensing Environment**, v.40, p.46-59, 1992.

Cho, M. A., Debba, P.; Mathieu, R.; Naidoo, L.; Aardt, J.; Asner, G. P. Improving Discrimination of Savanna Tree Species Through a Multiple-Endmember Spectral Angle Mapper Approach: Canopy-Level Analysis. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.48, n.11, p.4133-4172, 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução N°357, de 17 de março de 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>> Acesso em: 15.out.2014.

Kruse, F. A.; Lefkoff, A. B.; Boardman, J. W.; Heidebrecht, K. B.; Shapiro, A. T.; Barloon, P. 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, p.145-163, 1993.

Novo, E. M. L. M.; Barbosa C. C.; Freitas, R. M. Sistemas Aquáticos Continentais. In: Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E.; Ceballos, J. C. (Org.). **O sensor MODIS e suas aplicações no Brasil**. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007.

Schaepman-Strub, G.; Schaepman, M. E.; Painter, T. H.; Dangel, S.; Martonchik, L. V. Reflectance quantities in optical remote sensing - definitions and case studies. **Remote Sensing of Environment**, v.103, p.27–42, 2006.

Tundisi, J. G.; Matsumura-Tundisi, T.; ABE, D. S. Climate Monitoring before and during limnological studies: a needed integration. **Brazilian Journal of Biology**, v.67, n.4, p.795-796, 2007.

Watanabe, F. S. Y.; Imai, N. N.; Alcântara, E. H.; Rotta, L. H. S.; Utsumi A. Signal Classification of Submerged Aquatic Vegetation Based on the Hemispherical-Conical Reflectance Factor Spectrum Shape in the Yellow and Red Regions, **Remote Sensing**, v.5, p.1856-1874, 2013.

Wetzel, R. G. **Limnology: Lake and River Ecosystems**. San Diego: Academic Press, 2001. 1006 pp.