

Cálculo da estabilidade relativa da coluna d'água e classificação por k-médias de dados MODIS do Reservatório de Itumbiara (GO) sob o efeito da passagem de frentes frias.

Gabriel Moiano Cesar¹
Milton Kampel¹
José Luís Stech¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{moiano, milton, stech}@dsr.inpe.br

Abstract. Water quality in reservoirs is influenced by weather and climate forcing that determine spatial and temporal variations in these systems. Conventional techniques for water quality monitoring usually require considerable time and resources. The synoptic view of large areas and high temporal data acquisition frequency provided by remote sensing and satellite data telemetry constitute an alternative way to estimate water quality parameters when the relations between orbital data and those parameters are properly known. This work evaluates the influence of two cold front passages on the water color of Itumbiara reservoir, Goiás, Brazil, using cluster analysis of MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and in situ water quality data acquired from an autonomous moored environmental data acquisition system (SIMA). In these case studies it was observed that after the cold front events there was an increase of the compartments (water masses) showing that these events make this environment more complex. Images of the days after these events were used to understand the evolution of the water masses. The calculated relative water column stability indicates that the largest vertical mixing in the Itumbiara reservoir is observed in the winter. It is recommended the use of more than one SIMA dataset for future works, these techniques can also be performed in other reservoirs.

Palavras-chave: frente fria, limnologia, sensoriamento remoto, análise de agrupamento, estabilidade relativa da coluna de água, cold front, limnology, remote sensing, clustering analysis, water column relative stability.

1. Introdução

As forçantes meteorológicas podem alterar a qualidade da água de reservatórios. O vento persistente em direção e intensidade pode deslocar horizontalmente águas da borda do reservatório para o seu centro ou borda oposta, causando uma circulação vertical. Esta circulação tem várias consequências para a qualidade da água, como o aumento da concentração de sólidos em suspensão e nutrientes (Stech et al., 2006).

Outro importante fator que influencia a qualidade das águas de reservatórios é a precipitação que associada à energia dos ventos, modifica a circulação de massas de água, adicionando água fria à superfície do reservatório. Isto provoca a elevação dos níveis de turbidez e de concentração de clorofila associados ao aumento da disponibilidade de nutrientes, ao aporte continental (*runoff*) e ressuspensão de sedimentos (Lima et al., 2005; Giffin e Corbett, 2003).

Como a água reflete a luz de maneira diferente de acordo com a concentração dos componentes opticamente ativos, espera-se que com eventos de precipitação e ventos persistentes haja um maior aporte de sedimentos para o corpo do reservatório, fazendo com que a reflectância responda de maneira mais acentuada na região do espectro do visível (Kampel e Novo, 2005). No caso de águas dominadas pela matéria orgânica dissolvida, quando há ressuspensão ocorre o inverso, ou seja, os valores de reflectância se apresentam mais baixos (Bricaud e Stramski, 1990).

Branco et al. (2009), constatou no Reservatório de Lajes (RJ) que quando há um resfriamento súbito da superfície ocorre desestabilização da termoclina com o aprofundamento do epilimnio e um aumento da camada de mistura. Isto pode ser

explicado pelo fato de que a troca de calor em reservatórios ocorre mais rapidamente nas camadas superficiais da água do que no fundo. Nesse caso as frentes frias causaram diminuição evidente da temperatura da superfície, provavelmente contribuindo para o fenômeno da atelomixia parcial e também, pelo aumento da camada do epilânio.

De forma similar, foi observado que a passagem de frentes frias no Reservatório de Carlos Botelho (SP), também provoca mistura das águas e quebra na estratificação térmica pelo resfriamento da superfície da coluna de água (Tundisi et al., 2004). Esses autores também mostraram que existem fortes interações entre a precipitação, vento e a sucessão sazonal de fitoplâncton. Ainda segundo esses autores, a hidrodinâmica, que é uma característica do ambiente pelágico, é fundamental para a organização espacial e temporal das comunidades fitoplanctônicas. Essas variações na turbulência estabelecem o padrão de sucessão e distribuição espacial das comunidades fitoplanctônicas (Tundisi et al., 2004).

O objetivo do presente trabalho é avaliar a influência da passagem de frentes frias na reflectância aquática e na estabilidade da coluna de água do reservatório de Itumbiara.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Dados Orbitais e *In situ*.

Os dados de satélite utilizados neste trabalho foram adquiridos como o produto MYD09 do sensor *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS-Aqua) disponíveis *online* no *Warehouse Inventory Search Tool* - WIST. Foram utilizadas 7 bandas espectrais no intervalo 459-2155 nm. As bandas 3 (459 nm – 479 nm), 4 (545 nm – 565 nm), 5 (1230 nm – 1250 nm), 6 (1628 nm – 1652 nm) e 7 (2105 nm – 2155 nm) com 500 m de resolução espacial nominal foram reamostradas para 250 m conforme as bandas 1 (620-670 nm) e 2 (841-876 nm).

O Sistema Integrado de Monitoração Ambiental (SIMA) constitui uma ferramenta útil ao gerenciamento e controle ambiental de recursos hídricos (Stech, 2006). Foram utilizados dados *in situ* medidos pela boia SIMA referentes à temperatura da água (°C) em 4 níveis de profundidades (5, 12, 20 e 39 m) para o cálculo da estabilidade da coluna de água.

2.2 Classificação Digital e Análise de agrupamento

O processamento digital de imagens proporciona uma gama de abordagens para relacionar pixels em imagens de satélite a determinadas classes temáticas do terreno (Al-Doski et al., 2013). Com a classificação não-supervisionada é possível identificar as classes dentro de um conjunto de dados supondo que sejam fornecidos o número de classes e iterações. Frequentemente, a escolha do número de classes é feita por meio de métodos de agrupamento (*clustering*) (Mills et al., 2011).

O K-médias é um dos algoritmos mais utilizados nesse tipo de classificação. Li et al (2014), considera este algoritmo como confiável apesar da necessidade da definição do número de *clusters* (grupos) a serem criados. Este número deve ser capaz de dividir os dados em grupos com diferenças mínimas entre os dados em um determinado grupo e grandes diferenças entre estes e os dados classificados em grupos diferentes. No presente trabalho utilizamos o valor *Silhouette* para testar o melhor número de grupos, de 2 a 7, no algoritmo K-médias. O valor *Silhouette* é calculado através da equação (Rousseeuw, 1987):

$$S(i) = \frac{\min((b(i,v)) - a(i))}{\max(a(i), \min(b(i,v)))}$$

Em que i é o valor de Reflectância, $S(i)$ é o valor *Silhouette*, $a(i)$ é a distância média da curva i a outras curvas do mesmo *cluster*, $b(i)$ é a distância média da curva i a curvas de *cluster* diferentes, e (v) é o número de variáveis analisadas (e.g. bandas espectrais). O valor do coeficiente *Silhouette* pode variar entre $[-1, 1]$. Valores negativos correspondem a casos em que as reflectâncias foram classificadas em grupos errados, e valores positivos e próximos de 1 indicam casos onde as reflectâncias foram agrupadas de maneira correta e distantes dos *clusters* vizinhos (Rousseeuw, 1987).

2.3 Análise espectral de massas de água sob a influência de sistemas frontais

Depois de identificados os eventos de frentes frias, foram realizadas classificações dos dados MODIS referentes aos dias anteriores e posteriores às passagens desses sistemas (± 2 dias). O algoritmo de agrupamento K-médias foi utilizado para classificar as sete bandas espectrais MODIS (MYD09) e assim, definir o número ótimo de classes espectrais em cada período. Foram gerados 30 pontos aleatórios no corpo de água do reservatório de onde foram extraídos os valores de reflectância utilizados na análise de agrupamento.

2.4 Análise de estabilidade da coluna de água

A coluna de água dos reservatórios tropicais, em sua dimensão vertical, está sujeita à dinâmica de sua estabilidade e mistura que por sua vez, influenciam a qualidade da água (Branco et al., 2009). A estabilidade relativa da coluna água (*Relative Water Column Stability* – RWCS) foi calculada comparando-se as diferenças de densidade entre as camadas de superfície e fundo com a diferença de densidade entre 4° e 5°C, como sugerido por Naselli-Flores e Barone (2005):

$$RWCS = \frac{D_b - D_s}{D_4 - D_5}$$

Onde D_s e D_b são as densidades para as temperaturas de superfície e fundo, respectivamente e D_4 e D_5 são as densidades em 4° e 5°C. Esse método indica o grau de estabilidade da coluna de água como um todo.

Para verificar a resistência térmica de mistura entre as massas de água, a resistência relativa térmica - RTR (Kalff, 2002) foi calculada em 3 intervalos de profundidade – 5 a 12 m, 12 a 20 m e 20 a 39 m, entre 19/01/2010 e 18/07/2010. Este foi o período em que se obteve um conjunto consistente de dados *in situ* medidos pela boia SIMA. A RTR é calculada pela razão entre a diferença de densidade entre os limites de cada intervalo de profundidade e ($D_4 - D_5$). Esta métrica destaca a resistência termal relativa à mistura com base em diferenças de densidade entre as camadas de água em profundidades adjacentes. A análise de estabilidade da coluna de água foi realizada para o mesmo período de acordo com a disponibilidade de dados contínuos de temperatura da água coletados pelo sistema SIMA.

3. Resultados e Discussão

3.1 Classificação e Análise de Cluster

No período de estudo, foram identificados 24 passagens de frentes frias pelo reservatório de Itumbiara (Cesar, 2011). Dois eventos foram selecionados por apresentarem disponibilidade concomitante de dados *in situ* e dados MODIS para serem analisados. O primeiro caso é o da frente fria que ocorreu entre os dias 10 e 12 de junho de 2010. Neste caso, foram analisados dados orbitais dos dias 10 a 14 de junho para verificar o comportamento das massas de água depois da passagem da frente fria. A sequência de classificações obtidas pela análise K-médias ao melhor número de grupos

identificados pelo critério *Silhouette* é apresentada na Figura 1. No dia 10/06/2010, as águas do reservatório foram agrupadas em 2 grupos, sendo um formado pelo corpo principal do reservatório e outra classe formada pelos braços e pelas bordas do mesmo. Os maiores efeitos da passagem dessa frente sobre o reservatório foram identificados no dia 11/06/2010, quando ocorreram maiores valores de precipitação.

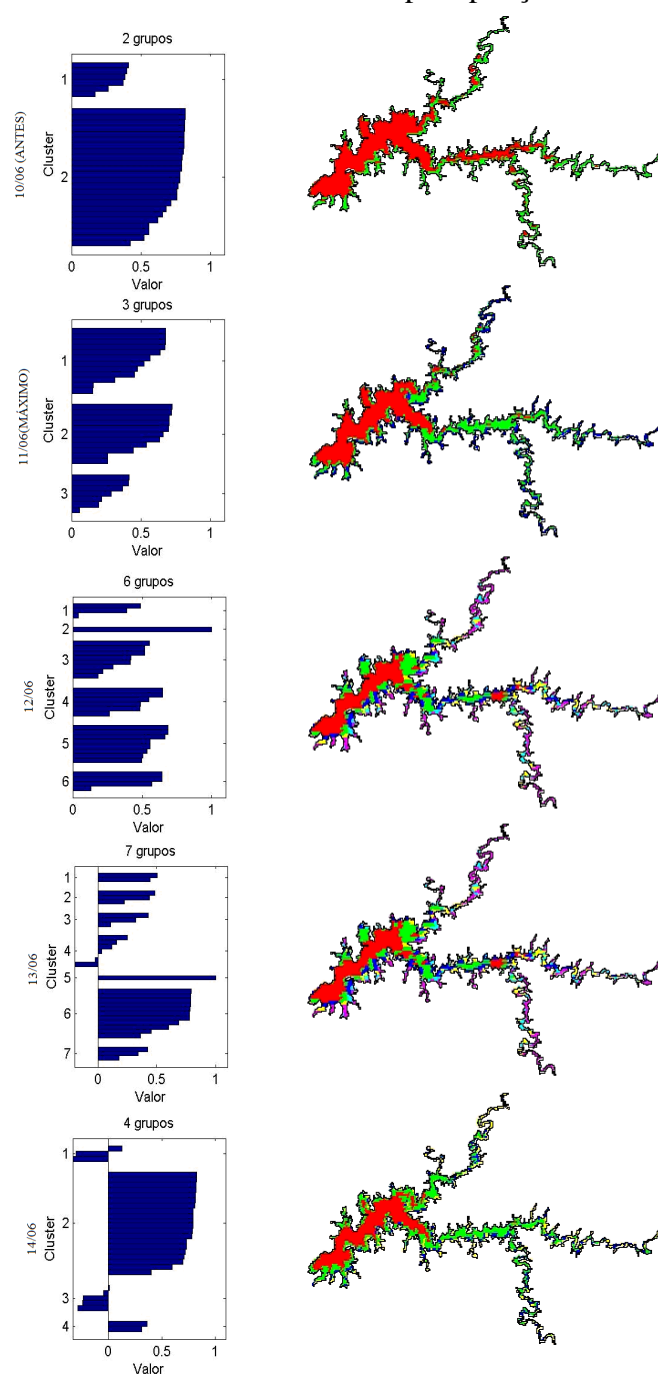


Figura 1 - Sequência de agrupamentos K-médias das reflectância MODIS no reservatório de Itumbiara (GO) entre 10-14/06/2010. Depois da passagem da frente fria (11/06/2010) há aumento do número de grupos indicando maior heterogeneidade das águas. Em 14/06/2010 o padrão inicial começa a se reestabelecer.

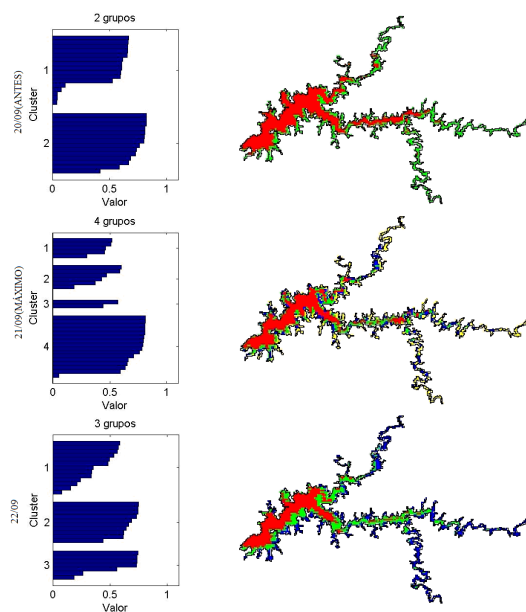


Figura 2 - Sequência de agrupamentos K-médias das reflectância MODIS no reservatório de Itumbiara (GO) entre 20-22/09/2010. Depois da passagem da frente fria (21/09/2010) há aumento do número de grupos indicando maior heterogeneidade das águas. Em 22/09/2010 o padrão inicial começa a se reestabelecer.

Nos dias 12 e 13/06/2010 observa-se que o comportamento espectral do reservatório tornou-se mais heterogêneo já que com a análise de *cluster* as reflectâncias foram agrupadas, respectivamente, em 6 e 7 grupos. No dia 14/06/2010, nota-se que as águas começam a voltar ao padrão inicial observado no dia 10/06/2010, mas ainda compartimentado em 4 grupos. Entretanto, é possível identificar 2 classes principais ou mais homogêneas englobando o corpo principal ou os braços dos rios e bordas.

O segundo estudo de caso foi identificado em 21 de setembro de 2010. No dia 20/09/2010 anterior à passagem da frente fria, o reservatório pode ser compartimentado em duas regiões, sendo uma formada pelo corpo principal e outra formada pelos braços dos rios e por toda a região que contorna o reservatório. Em 21/09/2010 as reflectâncias foram agrupadas em 4 classes mostrando uma maior heterogeneidade das massas de água após a passagem da frente fria. Um dia depois da passagem da frente, o reservatório foi dividido em 3 grupos, sendo um formado pelas águas do corpo principal do reservatório e outros dois formados pelas áreas de entorno e pelos braços dos rio (Figura 2).

Ainda que o número de estudos de caso apresentados aqui seja de apenas dois, observa-se um padrão de comportamento no qual depois da passagem da frente fria as águas se tornam espectralmente mais heterogêneas, sendo possível compartimentar o reservatório em um número relativamente maior de regiões opticamente diferenciáveis. Nota-se também, uma maior influência das águas dos rios nesses eventos. Geralmente, a passagem das frentes frias está associada a um aumento da pluviosidade, maior aporte de sedimentos e também, escoamento da água da superfície do entorno para dentro dos rios (Giffin e Corbett, 2003). A região do corpo principal do reservatório manteve-se mais estável. Contudo, é possível identificar que nas margens do reservatório houve maior confusão entre as classes agrupadas o que pode estar associado com a menor profundidade dessas regiões e com efeitos de borda.

3.2 Estabilidade Relativa da Coluna Água

Como esse método indica o grau de estabilidade da coluna de água como um todo, as águas do reservatório de Itumbiara na área próxima à barragem (local da boia SIMA) se mantiveram estratificadas em quase todo o período analisado (Figura 3). A estabilidade foi quebrada no período de inverno, principalmente entre os dias 21 e 23/06/2010 quando houve uma súbita diminuição da estabilidade relativa e mistura completa da coluna de água.

No verão em regiões tropicais os níveis de água dos reservatórios estão geralmente mais elevados acompanhando a época de maiores precipitações (Cesar, 2011). Nessa estação observam-se estratificações duradouras que se mantêm por mais longos períodos. Este comportamento da coluna de água é resultante da pouca variação diária da temperatura do ar, implicando em reduzidas perdas de calor para a atmosfera pelo ecossistema aquático mesmo de madrugada (Alacântara et al., 2010). De acordo com Esteves (1988), outro fator que dificulta a desestratificação diária nesse período é a maior profundidade da coluna d'água. Burin (2011) explica que em ambientes mais profundos, existe menos influência do vento, fazendo com que os corpos de água permaneçam estratificados a maior parte do ano, desestratificando somente no inverno. Branco et al., (2009) observaram a mistura da coluna de água somente no período de inverno. Entretanto, é constatado que a montante da barragem as profundidades são maiores (40m) e a coluna de água não se mistura completamente, pois os eventos meteorológicos não são capazes de perturbar a estabilidade vertical. Alcântara (2010) classificou o reservatório de Itumbiara como monomítico, ou seja, apresenta um único período de mistura durante o ano. Com a observação de dados *in situ*, aquele autor nota que de junho a setembro há mistura da coluna de água e de outubro a maio as águas se mantêm estratificadas. Aquele autor ainda observou que as passagens de frentes frias também atuam na perda de calor armazenado na coluna de água, assim como na sua desestabilização, promovendo processos de mistura convectiva.

Apesar do conjunto de dados utilizados no presente trabalho ser relativamente curto ou limitado, esse padrão de mistura no período de inverno também foi observado nesse trabalho. Deve-se ressaltar que no período de inverno é quando ocorre o maior número de passagem de frentes frias (Cesar, 2011). Na Figura 4, tem-se uma série temporal do perfil vertical da coluna d'água do reservatório de Itumbiara entre janeiro de 2010 e julho de 2010. Nota-se que nos meses de inverno, em algumas ocasiões a coluna d'água apresenta-se bem misturada em relação aos outros períodos da série estudada.

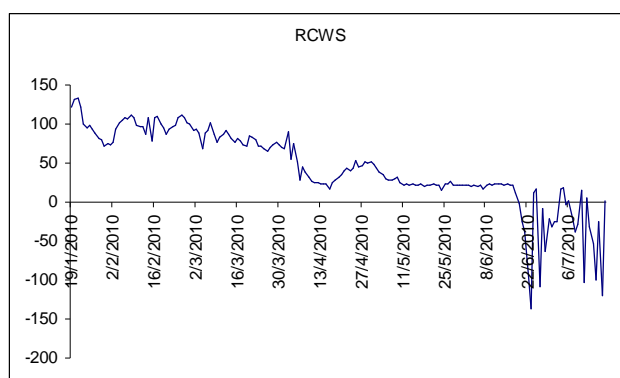


Figura 3 - Série temporal da Estabilidade Relativa da Coluna D'água (RWCS) calculada com dados medidos pela boia SIMA próximo à barragem do reservatório de Itumbiara (GO), entre janeiro e julho de 2010. Observa-se que no inverno existe quebra da estabilidade relativa da coluna d'água.

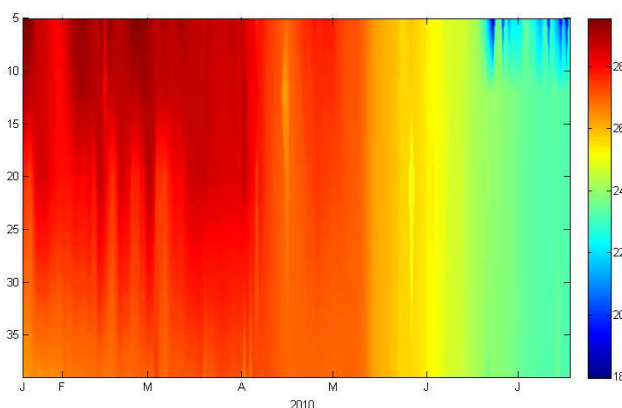


Figura 4 - Variação temporal da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) na coluna de água do reservatório de Itumbiara (GO) medida pela boia SIMA no período entre janeiro e julho de 2010.

4. Conclusões

A metodologia apresentada nesse trabalho pode ser aplicada em outros períodos, assim como, em outros reservatórios. Algumas técnicas convencionais utilizadas em estudos limnológicos possuem limitações em relação à aquisição espacial e temporal de informações. Dados de sensoriamento remoto são úteis para o manejo da qualidade dos recursos hídricos e para o entendimento de padrões sazonais.

Com a aplicação da análise de agrupamento das reflectâncias de sensoriamento remoto observou-se um comportamento onde as massas de água opticamente diferenciáveis em superfície se mostraram mais heterogêneas espectralmente, aumentando o número de compartimentos no reservatório estudado. O cálculo da estabilidade relativa da coluna de água permitiu identificar padrões de mistura vertical ao longo do período estudado, sendo que, no período de inverno, foram registrados os menores valores de estabilidade.

Para um melhor entendimento dos padrões sazonais e de qualidade da água do reservatório sugere-se a instalação de mais sistemas autônomos de aquisição de dados ou a realização de campanhas de campo mais frequentes, de modo a dar mais consistência espacial e temporal aos resultados gerados.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de Mestrado. Os autores agradecem à FAPESP (Projeto: 2007/08103-2) pelo auxílio financeiro.

Referências Bibliográficas

- Alcântara, E. H.; Bonnet, M. P.; Assireu, A. T.; Stech, J. L.; Novo, E. M. L. M.; Lorenzetti, J. A. On the water thermal response to the passage of cold fronts: initial results for Itumbiara reservoir (Brazil). **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 7, p. 9437-9465, 2010.
- Al-Doski, S. B. Mansor, H. Z. M. Shafri, Image Classification In Remote Sensing, **Journal Of Environment And Earth Science**, v. 3, p. 141-147, 2013.
- Branco, C. W. C.; Kozlowsky-Suzuki, B.; Sousa-Filho, I. F.; Guarino, A. W. S.; Rocha, R. J. Impact of climate on the vertical water column structure of Lajes Reservoir (Brazil): A tropical reservoir case. **Lakes & Reservoirs: Research & Management**, v. 14, n. 3, p. 175-191, 2009.

Bricaud, A.; D. Stramski. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and non algal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling area and the Sargasso Sea. **Limnol. Oceanogr.** v. 35, p. 562-582, 1990.

Burin, R. **Variabilidade da qualidade da água e do estado trófico do reservatório do Vacacaí Mirim.** 2011. 120f. (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

Cesar, G. M. 2011. **Caracterização da influência de sistemas frontais sobre a qualidade da água do reservatório de Itumbiara, GO,** utilizando dados de sensoriamento remoto e dados in situ. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 81 p.

Esteves, F. A. **Fundamentos de limnologia.** Rio de Janeiro: Interciência: FINEP, 1988. 575 p., il.

Giffin, D.; Corbett, D. R. Evaluation of sediment dynamics in coastal systems via short-lived radioisotopes. **Journal of Marine Systems.** v. 42, p. 83– 96, 2003.

Kalff J., 2002. **Limnology: Inland Water Ecosystems.** Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Kampel, M.; Novo, E.M.L.M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: Souza, R.B. (Org) **Oceanografia por Satélites.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005, cap. 12, p. 180-196.

Li, M.; Zang, S.; Zhang, B.; Li, S.; Wu, C. A Review of Remote Sensing Image Classification Techniques: The Role of Spatio-Contextual Information. **European Journal of Remote Sensing,** v. 47, p. 389-411, 2014.

Lima, I. B. T.; J. L. Stech; Mazzi, E. A.; Ramos, F. M.; E. M. L. Novo; Lorenzetti, J. A.; Rosa, R. R.; Barbosa, C. C.; Ometto, J. P.; A. T. Assireu. Linking telemetric climatic-limnologic data and online CH4 and CO2 flux dynamics. In: SANTOS, M. A.; ROSA, L. P (Ed.). **Global warming and hydroelectric reservoirs.** Rio de Janeiro: COPPE, 2005. p. 67-69.

Mills, R. T.; Hoffman, F. M.; Kumar, J.; Hargrove, W. W. Cluster analysis-based approaches for geospatiotemporal data mining of massive data sets for identification of forest threats. **Procedia Computer Science** v. 4, p. 1612–1621. 2011.

Moller, G. S. F.; Novo, E. M. L. M.; Kampel, M. Caracterização espectral, físico-química e bio-óptica das águas sob a influência do Rio Amazonas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 6587-6594. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-15943-PRE/10553). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.11.50>>. Acesso em: 06 maio. 2011.

Flores, L. ; Barone, R. Water-Level Fluctuations in Mediterranean Reservoirs: Setting a Dewatering Threshold as a Management Tool to Improve Water Quality. **Hydrobiologia** v. 548. p. 85-99. 2005.

Rabelo, E. **Avaliação de técnicas de visualização para mineração de dados.** 2007. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

Rousseeuw, P.J. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of Computational and Applied Mathematics,** v. 20: p. 53-65. 1987.

Stech, J. L., Lima, I. B. T., Novo, E. M. L. M., Silva, C. M., Assireu, A. T., Lorenzetti, J. A., Carvalho, J. C., Barbosa, C. C. F., Rosa, R. R.: Telemetric monitoring system for meteorological and limnological data acquisition, **Verh. Internat. Verein. Limnol.,** v. 29, p. 1747–1750, 2006.

Tundisi J.G.; Matsumura-Tundisi T.; Arantes Junior J.D.; Tundisi J.E.M.; Manzini N.F.I.; Ducrot R. The response of Carlos Botelho (Lobo, Broa) reservoir to the passage of cold fronts as reflected by physical, chemical, and biological variables. **Braz. J. Biol.,** v. 64, n. 1, p. 177-186, 2004.