# Inferência da profundidade da zona eufótica e do coeficiente vertical de atenuação de luz na água da Represa Mauá, Rio Tibagi/PR, a partir de Imagens Multiespectrais Landsat-8/OLI

Adriana Castreghini de Freitas Pereira [1]
Paulo Henrique de Castro [2]

[1] Universidade Estadual de Londrina, Londrina - PR – UEL – Depto de Geociências
Rodovia Celso Garcia Cid / PR 445 Km 380 – Campus Universitário – Cx.Postal 6001
CEP 86051-980 Londrina, PR, Brasil
adricfp@gmail.com; adrianacfp@uel.br

[2] Programa de Pós-Graduação em Geografia - UEL
Rodovia Celso Garcia Cid / PR 445 Km 380 – Campus Universitário – Cx.Postal 6001
CEP 86051-980 Londrina, PR, Brasil
paulocastro@uel.br

**Abstract**. Scientific researches focused on the water quality use, in general, empirical models of inference on water components from others observed in field, allowing a better spatial representation of the variable, beyond reduction of costs. Environmental researchers use the Secchi depth in indirect calculation of vertical attenuation coefficient for water irradiance and in the estimation of stretching euphotic zone to classify water types on Brazilian water ecosystems. Then, the main aim of this research was to realize the inference of water euphotic zone and the vertical attenuation coefficient for water irradiance in UHE Mauá/PR Reservoir, using the Landsat-8/OLI multispectral image, in spectral bands 1 (450-510 nm); 2 (530-590 nm); 3 (640-690 nm); 4 (850-880 nm) and 5 (1570-1650 nm) and spectral data collected "in situ", and to generate an inference model of water transparence through available data. After adjustments and initial processing, the data were submitted to a correlation analysis, where there were found significant correlations 5% confidence level, not being raised the inference model. The data collected in situ sampling points, made it possible to estimate the vertical light attenuation coefficient in the water of the reservoir; classifying water as eutrophic; and estimate the depth of the photic zone, too narrow (between 2,29 m and 2,97 m). So concluded that the reservoir presents not much concentration of suspended solids and are in eutrophication.

**Palavras-chave:** remote sensing of water, euphotic zone depth, water transparency, sensoriamento remoto da água, profundidade da zona eufótica, transparência da água.

## 1. Introdução

Nas discussões atuais sobre a disponibilidade de água potável, pesquisadores e ambientalistas tem realçado as questões mais relevantes para o período pós-2015. Num horizonte de análise que se estende até 2050, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), destaca que a maior ameaça ao modo de vida e a própria existência humana é a escassez de água para consumo doméstico e agrícola e suas implicações para as mudanças climáticas, aparentemente já em curso (Elliott et al., 2014). Dentre as metas para desenvolvimento sustentável (Griggs et al. (2013)) destaca-se o alcance universal de acesso à água potável e esgoto, duas metas amplamente relacionadas, visto que a falta de saneamento básico é um dos fatores que mais contribuem para a escassez relativa de água potável, aquela escassez que não depende da quantidade de água mas de sua qualidade para consumo. As condições para o alcance dessas metas dependem da mudança do comportamento humano "Nenhuma dessas seis metas é possível sem uma mudança no campo econômico" (Griggs et al., 2013, pag. 307) e da elaboração de politicas públicas no campo dos recursos hídricos (Fracalanza et al., 2013) que incorporem medidas compensatórias e distributivas e que minimizem os efeitos perversos das desigualdades socioeconômicas.

Essas questões atuais da sociedade justificam a elaboração de pesquisas coentíficas que contribuam para um melhor aproveitamento e gerenciamento do recurso natural água de qualidade para o abastecimento da população humana.

Nesse sentido, pesquisas científicas relacionadas com a qualidade das águas, utilizam, dentre os métodos disponíveis para análises ambientais, as análises de correlação entre as concentrações dos componentes opticamente ativos e informações espectrais de corpos d'água obtidas a partir de dados orbitais – multiespectrais e hiperespectrais; além de espectroradiometria de campo (LOBO, et al., 2016; VERPOORTE, 2014; HAMBRIGHT, 2014; GIARDINO et al., 2014; OLMANSON, et al., 2013; ROESSLER, et al., 2013; McCULLOUGH et al., 2012; NAS et al., 2008; SIMIS et al., 2005; CURRAN e NOVO, 1998; ALLEE e JOHNSON, 1999; NOVO et al., 1996; GODIN et al 1993). A construção de modelos empíricos para estimar alguns desses componentes, a partir de outros observados em campo, permite maior representatividade espacial da variável e reduz os custos de trabalho de campo, muitas vezes com a redução das análises de laboratório.

A transparência do corpo d'água é um dos parâmetros físicos observados na análise de sua qualidade. Este parâmetro pode ser obtido através da leitura da profundidade do disco de Secchi, ou seja, a partir da observação do desaparecimento de um disco branco mergulhado na água. O valor do disco de Secchi tem uma relação direta com a transparência da água e inversa à quantidade de compostos orgânicos e inorgânicos no percurso da luz e também ao coeficiente de atenuação da irradiância (Pereira Filho, 2000), ou seja, a profundidade de desaparecimento do disco de Secchi corresponde àquela profundidade na qual a radiação de 400 – 740 nm (faixa visível) refletida do disco não é mais sensível ao olho humano (Esteves, 1998). A transparência da água, além de ser uma característica física de fácil obtenção em campo, apresenta correlação com a radiação eletromagnética superficial do corpo d'água, que pode ser avaliada, tanto por medidas espectrorradiométricas tomadas "in situ", quanto pelas imagens multiespectrais tomadas por sensores instalados em plataformas orbitais.

O presente artigo faz parte de uma pesquisa maior cujo objetivo principal é realizar a construção de modelos empiricos de inferencia para alguns componentes opticamente ativos na água, por meio do sensoriamento remoto orbital. Para este artigo, traçou-se como objetivo principal a inferência da profundidade da zona eufótica e do coeficiente vertical de atenuação de luz na água de uma represa, utilizando dados coletados "in situ" e de imagens multiespectrais de média resolução espacial do Landsat-8/OLI.

## 2. Metodologia de Trabalho

Para o desenvolvimento da pesquisa, uma imagem multiespectral de média resolução espacial do satélite Landsat-8/OLI (bandas espectrais 1, 2, 3, 4 e 5 correspondentes respectivamente aos intervalos de comprimento de onda entre 450 e 510 nm; 530 e 590 nm; 640 e 690 nm; 850 e 880 nm) foi adquirida simultaneamente à realização de um levantamento de campo, no qual foi medida a Profundidade de Secchi em pontos amostrais previamente definidos.

Análises de correlação entre os dados coletados "in situ" (Profundidade de Secchi) e a imagem multiespectral, foram realizadas. Métodos de regressão linear clássica foram aplicados a fim de gerar modelos de inferência de transparência da água, estimando-se, assim, a distribuição espacial da variável em estudo, para os modelos que consideram os dados da imagem multiespectral. Por fim, foi feita a inferência da zona eufótica e do coeficiente vertical de atenuação de luz na água da UHE Mauá – Rio Tibagi/PR, a partir de pontos amostrais obtidos do modelo de inferência gerado e da coleta "in situ".

A Figura 1 apresenta a área de estudo da pesquisa, que foi a UHE Mauá, que está localizada no rio Tibagi, a montante do local denominado Salto Mauá, nos municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira, no Estado do Paraná, a cerca de 50 km de Telêmaco Borba. Sua

construção teve início no ano de 2008 e foi inaugurada em 2012. É controlada pelo CECS (Consórcio Energético Cruzeiro do Sul), com participação societária de 51% da Copel e 49% da Eletrosul. É a 6ª maior hidrelétrica em potência instalada em território paranaense, ficando atrás apenas das cinco usinas localizadas no rio Iguaçu.

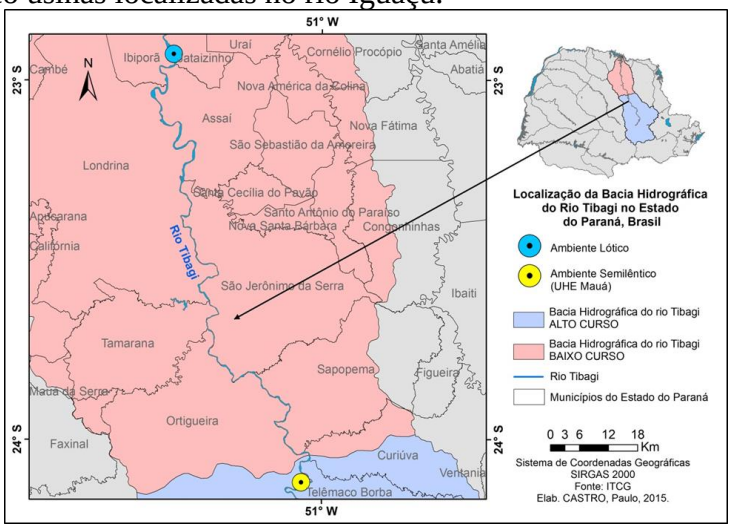


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo – UHE Mauá ao sul (em cor amarela), no contexto do trecho do rio Tibagi até as proximidades do ponto de captação da SANEPAR ao norte (em cor azul), na Bacia Hidrográfica do rio Tibagi

A coleta de dados "in situ" baseou-se em um esquema de amostragem pré-definido para distribuição dos elementos amostrais. Tal esquema considerou um número de pontos que permitisse a otimização das coletas e garantisse, ao mesmo tempo, a representatividade espacial dos parâmetros coletados para a análise da qualidade da água. Para tanto, baseou-se na variabilidade espectral do corpo d'água ao longo do tempo e na entrada dos principais afluentes no reservatório, com distribuição das amostras em faixa concêntricas (Pereira et al., 2007).

No total foram definidos 24 pontos amostrais espalhados ao longo da UHE Mauá/PR, e na entrada de tributários, garantindo uma boa representação das características limnológicas e espectrais a serem levantadas em campo. A Figura 2 mostra a UHE Mauá/PR e a posição dos 24 pontos definidos pelo esquema amostral para a coleta de dados "in situ".

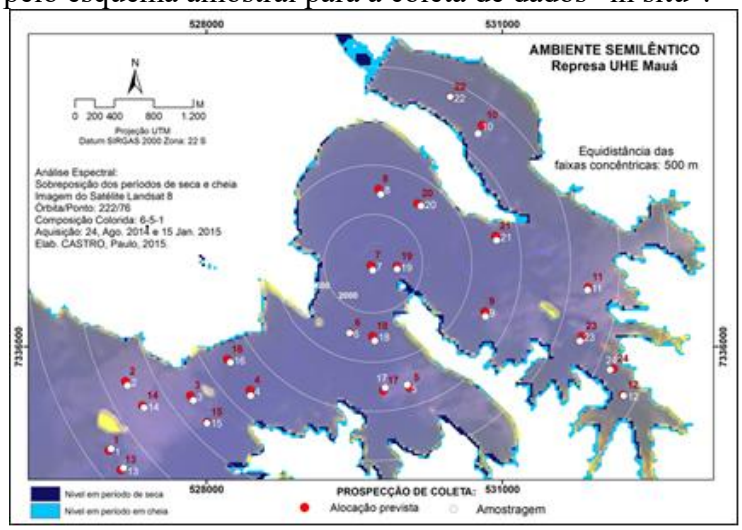


Figura 2. Mapa de modelagem amostral de pontos, utilizando imagem multiespectral do Landsat 8, no lago do reservatório da UHE Mauá, por meio de distribuição de Faixas Concêntricas

O levantamento de dados "in situ" ocorreu no dia 17 de dezembro de 2015. As condições de iluminação (nebulosidade) e vento (ondas na superfície da água) foram anotadas em planilhas de campo. Simultaneamente ao levantamento de dados em campo, foi adquirida uma imagem multiespectral de média resolução espacial do satélite Landsat-8/OLI da área de estudo, correspondente às bandas B1 – denominada *new coastal*; B2; B3; B4 e B5.

Devido à necessidade de sincronismo entre a aquisição de diferentes tipos de medidas e tomada da imagem, a definição da melhor data foi escolhida a partir do catalogo de imagens do Landsat-8/OLI, disponivel no site do USGS-USA.

**2.1 Imagem Multiespectral do satélite Landsat-8/OLI**

A imagem multiespectral do Landsat-8/OLI, correspondente às bandas B1, B2, B3 e B4, com intervalos espectrais respectivamente de 450 – 510 nm; 530 – 590 nm; 640 – 690 nm; 850 – 880 nm e 1570 – 1650 nm, foi submetida a tratamentos a fim de torná-la espacial e radiometricamente compatível com a Profundidade de Secchi tomada "in situ". Tais tratamentos foram: georreferenciamento das cenas, máscara de recorte do corpo d'água e correções radiométrica e atmosférica.

O georreferenciamento da imagem foi realizado no programa SPRING, utilizando a Transformação Afim no plano e 20 pontos de controle. O resíduo da transformação geométrica foi de 1 pixel, considerado aceitável para o trabalho.

A delimitação do reservatório foi feita no Spring, a partir da escolha de uma segmentação por crescimento de regiões usando parâmetros de similaridade igual a 20 e área de 200 pixels, após testes realizados com outros valores, pelo fato desta ser a mais apropriada para delimitar o contorno da represa, por comparação com as demais. Aplicou-se a técnica de classificação não-supervisionada Isoseg para agrupar as regiões definidas na segmentação, com valor de limiar igual a 90%. O mapeamento das classes temáticas foi realizado e a edição manual do contorno. A máscara gerada foi utilizada para o recorte dos Planos de Informação referentes às quatro bandas da imagem multiespectral.

A calibração radiométrica foi realizada com o objetivo de converter os ND's (números digitais) da imagem original em radiância espectral. Para tanto, a radiância espectral ou radiância no sensor foi calculada no *software* QGIS.

A correção atmosférica, que objetiva a conversão dos ND's (números digitais) ou valores de brilho da imagem original em reflectância aparente, foi realizada baseando-se no método empírico de Chavez (1989), denominado DOS - *Dark Object Subtraction* -utilizando para isso o *software* QGIS. Este método consiste na correção do espalhamento atmosférico no qual a interferência atmosférica é estimada diretamente a partir dos números digitais (ND) da imagem de satélite, sendo ignorada a absorção atmosférica. Para a aplicação desta técnica não há a necessidade de se obter dados sobre as condições atmosféricas na data de obtenção das imagens. No método DOS assume-se que há uma grande probabilidade de existir alvos (pixels) escuros nas imagens, como sombras ocasionadas pela topografia ou por nuvens, os quais deveriam apresentar um ND muito baixo na imagem, equivalente a cerca de 1% de reflectância (Chavez, 1989).

Realizadas as operações de pré-processamento da imagem, foi aplicada a razão de bandas aos valores extraídos nos pontos de interesse, conforme Kirk (1994), Barbosa (2005), Rundquist (1996), Hoge et al. (1987); Gitelson (1992) envolvendo as cinco bandas do Landsat-8:

| | |
|---|---|
| [(B3-B4)/(B3+B4)] | (1) |
| (B4/B3) | (2) |
| (B3/B4) | (3) |
| (B4/B5) | (4) |
| (B3/B4) | (5) |

(B4/B2) (6)
(B2/B3) (7)
(B2/B5) (8)

**3. Resultados e Discussão**

Forma analisadas as correlações entre as 5 bandas multiespectrais do Landsat-8/OLI e a Profundidade de Secchi coletada "in situ" e também entre as Razões de Bandas conforme indicado na bibliografia e o mesmo parâmetro de analise de qualidade da água.

A Figura 3 apresenta a correlação das bandas Landsat-8 e a Profundidade de Secchi.

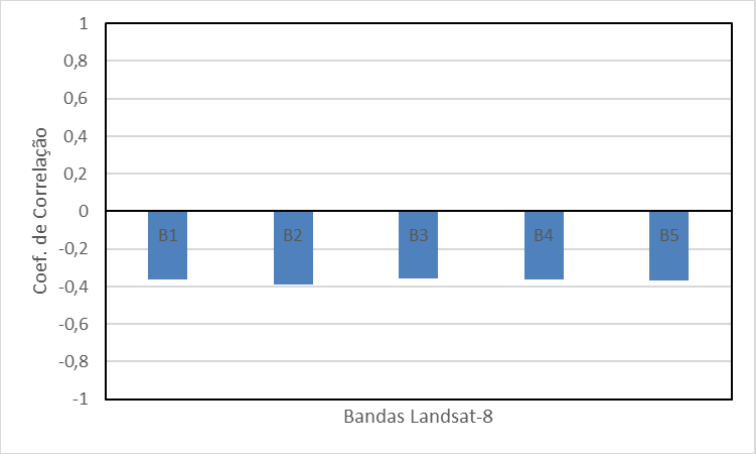


Figura 3. Coeficiente de Correlação entre a Profundidade de Secchi e as Bandas Multiespectrais do Landsat-8/OLI

Observa-se na Figura 3 que não houve correlação significativa a 5% para nenhuma das variáveis analisadas. Nem mesmo a banda 1 que surge no Landsat-8/OLI como apropriada para analise de água (new coastal), alcançou o objetvo esperado para o trabalho.

A Figura 4 apresenta a correlação entre as Razões de Bandas testadas conforme indicação da bibliografia e a Profundidade de Secchi coletada "in situ".

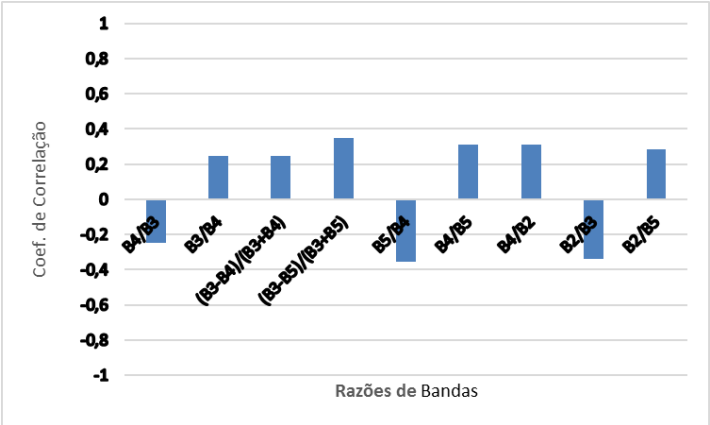


Figura 4. Coeficiente de Correlação entre razões de bandas aplicadas à Imagem Multiespectral Landsat-8/OLI

Observa-se da analise da Figura 4 que, aqui tambem não foram encontradas correlações significativas a 5% de confiança para os dados analisados. O maior valor de correlação foi de 0,35, muito baixo para uma analise estatística robusta.

Diante dos resultados insatisfatórios obtivos nas analises de correlação, o modelo empirico de inferencia almejado no inicio da construção do artigo não se realizou, passando-se então para o calculo do coeficiente de atenuação da luz na água da UHE Mauá, a partir dos dados de Proundidade de Secchi coletados "in situ", pretendendo-se verificar a profundidade de sua zona eufotica.

Autores como Poole & Atkins são citados por Esteves (1998) como precursores no cálculo do coeficiente vertical de atenuação a partir da Profundidade do disco de Secchi medido "in situ". De acordo com sua proposta, a Profundidade de Secchi é o inverso do coeficiente de atenuação vertical, sendo a relação (9) definida para esse fim:

$$k = \left( \frac{1,7}{Zds} \right) \qquad (9)$$

onde: Zds = Profundidade de Secchi;
1,7 = constante calculada por Poole e Atkins

O cálculo de k foi realizado para os valores de Profundidade de Secchi medidos "in situ" para os 24 pontos coletados, cuja média resultou em um valor de Profundidade de Secchi = 0,92 m e k =1,85. Comparando esse valor obtido com os estudos de Esteves (1998), verifica-se que a constante k para a represa UHE Mauá aproxima-se do tipo de ambiente "eutrófico", o que já era esperado, uma vez que houve a construção e inicio das operações da UHE Mauá.

A Profundidade de Secchi também é utilizada para a avaliação da extensão da zona eufótica, conforme Esteves (1998); Bukata (1995) e Kirk (1994). Para tanto, o valor da Profundidade de Secchi é multiplicado pela constante 2,7. O valor obtido a partir desse cálculo é admitido pelos autores como sendo aproximadamente 1% da radiação superficial do corpo d'água.

A fim de analisar o comportamento da zona eufótica na UHE Mauá, apresenta-se na Tabela 2 o cálculo desta para os 24 pontos amostrados "in situ", a partir da constante de multiplicação igual a 2,7.

Tabela 2. Estimativa da extensão da zona eufótica a partir da profundidade de secchi

| PONTOS | DADOS ESTIMADOS "IN SITU" | |
|---|---|---|
| | Prof. de Secchi (m) | Extensão da Zona Eufótica (m) |
| 1 | 0,85 | 2,29 |
| 2 | 0,90 | 2,43 |
| 3 | 0,90 | 2,43 |
| 4 | 0,95 | 2,56 |
| 5 | 0,95 | 2,56 |
| 6 | 0,95 | 2,56 |
| 7 | 0,85 | 2,29 |
| 8 | 1,10 | 2,97 |
| 9 | 1,00 | 2,51 |
| 10 | 0,93 | 2,43 |
| 11 | 0,85 | 2,43 |
| 12 | 0,85 | 2,56 |
| 13 | 0,90 | 2,56 |
| 14 | 0,90 | 2,70 |
| 15 | 0,95 | 2,43 |
| 16 | 0,95 | 2,43 |
| 17 | 1,00 | 2,29 |
| 18 | 0,90 | 2,70 |
| 19 | 0,90 | 2,43 |
| 20 | 0,85 | 2,43 |
| 21 | 1,00 | 2,43 |
| 22 | 0,90 | 2,70 |
| 23 | 0,90 | 2,29 |
| 24 | 0,90 | 2,29 |

Analisando a Tabela 2 verifica-se, para os dados medidos “in situ”, que o valor mínimo da profundidade da zona eufótica é igual a 2,29 m (P1, P7, P17, P23 e P24) e o valor máximo corresponde à 2,97 m (P8). Esses valores indicam uma zona eufótica muito estreita para a represa UHE Mauá e com pouca concentração de sólidos em suspensão na água, o que a torna clara e quase transparente.

A classificação do corpo d´água como eutrófico e os valores muito estreitos da zona eufótica indicam que deve ocorrer acumulação de sedimentos no fundo da represa; elevado enriquecimento de nutrientes, com crescimento planctônico e áreas cobertas com plantas aquaticas.

## 4. Conclusões

O objetivo principal da pesquisa foi atingido, tendo sido possível a inferência da profundidade da zona eufótica e do coeficiente de atenuação vertical de luz na água da represa UHE Mauá/PR. Ambos os resultados permitiram classificar o corpo d’água estudado como tipo de água eutrófico, praticamente transparente na superfície, com pouca concentração de sólidos em suspensão na água.

O objetivo específico que tratou da possivel geração do modelo empirico de inferencia da profundidade de sechi não foi alcançado, uma vez que as analises de correlação entre as bandas e a profundidade de secchi, bem como entre as razões de bandas e a profundidade de secchi não foram significativas ao nível de confiança de 5%.

Como este artigo faz parte de uma pesquisa maior, onde procura-se estimar outros componentes opticamente ativos na água da represa, através de sensoriamento remoto e analises de regressão estatistica, espera-se encontrar essas correlações e consequentemente modelos de inferência, a medida que a pesquisa caminha.

## Referências Bibliográficas

BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento Remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície de Curuai/Rio Amazonas.** São José dos Campos, 2005. 281 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - INPE.

BUKATA, R. P. J. KOONDRATYEV, K.Y.; POZOZDNYAKOV, D.V. **Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters.** Boca Taton: CRC, 1995. 362p.

CHAVEZ, Jr., P.S. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.55, p.1285-1294, 1989.

CURRAN, P.J.; NOVO, E.M.M. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review**. Journal of Coastal Research**, v.4, n.3, p.351-368, 1988.

ELLIOTT, J. et al. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. **PNAS,** 2014, v.111, n.9, 3239-3244. (www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1222474110).

ESTEVES, F.A. **Fundamentos de limnologia.** Rio de Janeiro: Interciência/Finep. 2.ed. 575p. 1998.

FRACALANZA, A.N., JACOB, A.M., EÇA, R.F. Justiça Ambiental e práticas de governaça da água: (re) introduzindo questões de igualdade na agenda. **Ambiente & Sociedade,** São Paulo, 2013. v. XVI, n.1, p.19-38.

FREITAS PEREIRA, Adriana Castreghini. Reservoir Water-Transparency Mapping by Means of Multispectral Ikonos Imagery. **In: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography.**1 ed. New York Dordrecht London : **Springer Berlin Heidelberg**, 2014, v.1, p. 285-301.

GIARDINO, C. BRESCIANI, M., CAZZANIGA, I., SCHENK, K., RIEGER, P., BRAGA, F., MATTA, E., BRANDO, V.E. Evaluation of Multi-Resolution Satellite Sensors for Assessing Water Quality and Bottom Depth of Lake Garda**. Sensors**, 14, 24116-24131, 2014. ISSN: 1424-8220.

GITELSON, 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.

GRIGGS, D. et al. **Nature**, 2013. v.495.

HAMBRIGHT, K.D., XIAO, X., DZIALOWSKI, A.R. Remote Sensing of WQ and harmful algae in OK Lakes. **Remote Sensing of Environment** (2014), 2, 100-120.

HOGE, E. F., WRIGHT, C. W., & SWIFT, R. N. Radiance ratio algorithm wavelengths for remote oceanic chlorophyll determination**. Applied Optics**, v. 26, n. 11, p. 2082−2094, 1987.

KIRK, J.T.O. **Light & Photosynthesis in aquatic ecosystems.** Cambridge University Press, 509p., 1994.

LOBO, F.L., COSTA, M.P., NOVO, E.M. Time-series analysis of Landsat-MSS/TM/OLI images over Amazonian waters impacted by gold mining activities. Remote Sensing of Environment (2016), 157, 170-184.

NOVO, E.M.L.M.; BRAGA, C.Z.F.; TUNDISI, J.G. Use of TM/Landsat data to retrieve the optically active water constituints from a eutrophic tropical reservoir. **Proceedings of ISPRS Commission VII Simposium: Resource and Environmental Monitoring**, Rio de Janeiro, sept. 20-30, 1994, INPE, Vol.30, Part76, 1994, p.258-262.

OLMANSON, L., BREZONIK, P.I., BAUER, M.E. Airborne hyperspectral remote sensing to assess spatial distribution of water quality characteristics in large rivers: The Mississippi River and its tributaries in Minnesota. **Remote Sensing of Environment** (2013), 130, 254-265. ISSN:

PEREIRA, A.C.F.; GALO, M.L.B.T.; VELINI, E.; NOVO, E.M.L.M. 2007. Amostragem em corpos d'água: Definição de elementos amostrais, posicionamento e coleta de dados "in situ". In: II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. 2007, Presidente Prudente. **Anais do II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas,** 2007, p.866-874.

PEREIRA FILHO, W. **Influência dos diferentes tipos de uso da terra em bacias hidrográficas sobre sistemas aquáticos da margem esquerda do Reservatório de Tucuruí – Pará.** São Paulo, 2000. 130 p. Tese (Doutorado em Geografia) – USP.

RUNDQUIST, D. C.; LUOHENG, H.; SCHALLES, J. F.; PEAKE, J. S. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for first derivative of reflectance near 690 nm. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 62, n. 2, p. 195-200, 1996.

SIMIS, S.G.H., PETERS, S.W.M., GONS, H.J. Remote sensing of the cyanobacterial pigment phycocyanin in turbid inland water. **Limnology and Oceanography**, 2005, 50(1), 237-245.

VERPOORTE, C., KUSTER, T., SEEKELL, D.A., TRANVIK, L.J. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. **AGU Publications, Geophysical Research Letters** (2014), 41, 6396-6402.