

Determinação radiométrica de biomassa macrofítica e sua correlação com valores de reflectância obtidos por sensores remotos ópticos

Leonardo Manduca Sales¹

Luiz Rogério Mantelli²

Marisa Dantas Bitencourt²

¹Universidade Metodista de São Paulo – UMESP
Av. Dom Jaime de Barros Câmara, 1000 – Planalto – CEP 09895-400
São Bernardo do Campo – SP, Brasil
leoman47@hotmail.com

² Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo – IB-USP
Rua do Matão, Trav. 14, nº 321 – Cidade Universitária – CEP 05508-090
São Paulo – SP, Brasil
luiz.mantelli@gmail.com; tencourt@ib.usp.br

Abstract. On present days, the need to study and monitor public-supply water reservoirs is urgent, chiefly those located in urban areas, where episodes of extreme eutrophication are frequently observed, examples of which are the reservoirs constituting the Billings, Guarapiranga and Paiva Castro systems. However, given the dynamics, and extension of this complex, it is essential to find alternatives that make such monitorings financially viable and allow fast access to water condition data on the system as a whole. A means to attain this objective is through the use of remote sensing data. This study aims to create a model that allows the biomass estimate of macrophyte species *Egeria densa*, based on reflectance data obtained through the analysis of optical images provided by the satellite Landsat 5/TM. In order to reach this target, a series of spectroradiometric measurements were carried out under controlled conditions at specific laboratory. The biomass of each filament used on the experiments was quantified and correlated to its respective radiometric spectrum. The statistical treatment of the data was done by the use of simple linear regression, which yielded a biomass estimating equation for the macrophyte studied, based on its reflectance values obtained through remote sensing images. Results have revealed positive correlation between these values and laboratorial biomass quantification to be as high as 95%. This is a perspective that must be considered by current environmental managers, once it presents a model that can provide quick and reliable results at extremely reduced costs.

Palavras-chave: remote sensing, reservoir, water monitoring, sensoriamento remoto, reservatório, monitoramento da água

1. Introdução

A necessidade de estudar e monitorar os reservatórios utilizados para abastecimento público é premente, sobretudo aqueles localizados em áreas urbanas, onde frequentemente são verificados episódios extremos de eutrofização como reflexo da atividade humana (Martins *et al.*, 2008).

A eutrofização é um processo natural que resulta do envelhecimento de lagos (Gomez & Korstad, 2007) e do aporte de nutrientes e dinâmica do sistema. Este fenômeno é acelerado e agravado pelo extenso e constante influxo de matéria orgânica, proveniente principalmente do esgoto doméstico, industrial e resíduos de fertilizantes agrícolas, tornando a água imprópria para consumo e provocando modificações nas concentrações de seus nutrientes, tais como fósforo e nitrogênio, o que leva ainda, como sua consequência mais visível e marcante, à proliferação descontrolada de macrófitas aquáticas (Gomez e Korstad, 2007).

As macrófitas são fundamentais para o equilíbrio ecológico de ecossistemas de ambientes aquáticos, principalmente por seu papel ativo na oxigenação da água. Dentre as várias espécies envolvidas neste processo, destaca-se *Egeria densa*, por ser encontrada em praticamente todo o mundo e por apresentar altas taxas de fotossíntese. Pertencente à família Hydrocharitaceae, é nativa da América do Sul e apresenta-se submersa e enraizada (Oliveira *et al.*, 2005), com filamentos emersos.

No Brasil, é considerada nativa da região Sudeste, dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, mas está presente em todas as regiões do país. Além das trocas gasosa com o ambiente, constitui elemento essencial de ambientes limnéticos por ser fonte de alimento e refúgio para peixes, aves e microorganismos (Carvalho *et al.*, 2005), e também para bovinos, equinos, ovinos e suínos, que entram na água para se alimentar.

Diversos estudos ainda atestam a importância de *Egeria densa* como responsável pela criação de condições ideais para a proliferação de crustáceos e moluscos, além de contribuir para a proteção do solo das margens contra erosão (Nascimento *et al.*, 2008). É uma espécie de alta sobrevivência devido à sua boa capacidade adaptativa, e dispersa-se através de módulos vegetativos (fragmentação do caule) de tamanho pequeno, o que garante baixo custo energético e altas taxas de regeneração (Oliveira *et al.*, 2005), tornando extremamente difícil seu controle.

Segundo Simenstad *et al.* (2000), por sua característica invasora agressiva, quando em condições de abundância de nutrientes, elimina ou reduz sensivelmente a quantidade das espécies nativas das localidades onde se instala. Isso acaba modificando drasticamente a dinâmica do ecossistema local, podendo, por exemplo, alterar gradativamente a característica do ambiente de lótico para lético, devido à formação de densa biomassa. No caso dos reservatórios, sistemas já modificados (Lopes *et al.*, 2008), essa situação tende a agravar-se. (Bini *et al.*, 2005). Essa característica torna praticamente impossível a recuperação total do ecossistema, de modo a assemelhar-se de sua forma original, anterior à infestação.

Ainda, a morte e posterior decomposição das plantas modifica as condições de oxigenação da água, sendo prejudicial, sobretudo, para certas espécies de peixes. Sua presença extensiva e o aumento de sua biomassa caracterizam-se como indicadores de corpos d'água eutrofizados (Cook, 1993), e requerem constante monitoramento.

Por estas razões, o controle e manejo de sua disseminação é extremamente importante, representando grave problema e grande desafio para gestores de reservatórios no mundo todo (Becker *et al.*, 2007), sobretudo aqueles utilizados para a geração de energia e abastecimento, localizados próximos a áreas urbanas, e que sofrem, conseqüentemente, com a ação antrópica e têm a poluição como seu principal problema.

Os sistemas Billings, Guarapiranga e Paiva Castro, que abastecem a região metropolitana de São Paulo, se encaixam perfeitamente na descrição realizada no parágrafo anterior. O avanço populacional desta região, iniciado intensamente nos anos 70, gerou e continua

gerando problemas ambientais crescentes, comprometendo a qualidade e a quantidade da água destes reservatórios. Os problemas decorrentes dessa ocupação, como erosão, assoreamento dos terrenos, poluição do solo e das águas, remoção da cobertura vegetal para construção de habitações e o próprio aumento na retirada de água do reservatório vêm se agravando desde então. Ainda, dada a dinâmica e extensão destes sistemas, seu gerenciamento por técnicas de campo tradicionais é tarefa longa e dispendiosa, além de pouco eficiente. É preciso, então, buscar alternativas que viabilizem financeiramente tais monitoramentos e permitam acesso rápido às condições de qualidade da água nos sistemas como um todo.

Uma maneira de se obter esse resultado é através da utilização de dados gerados por Sensoriamento Remoto (Ribeiro *et al*, 2008), que permite uma avaliação da qualidade da água de uma dada área pela análise de dados de reflectância gerados por macrófitas, os quais possibilitam uma estimativa de sua biomassa.

O objetivo deste trabalho foi criar um modelo que permita a estimativa da biomassa da espécie de macrófita *Egeria densa*, com base em dados de reflectância obtidos através da análise de imagens ópticas do sensor Landsat 5/TM, de modo a tornar possível a substituição da metodologia tradicional realizada através de medidas em campo, e agilizar o processamento de dados e informações advindas dele, tornando mais eficiente e barato o gerenciamento de reservatórios urbanos.

2. Metodologia

As medidas radiométricas, necessárias para modelagem da biomassa, foram realizadas em laboratório específico, sob condições controladas de iluminação, fornecida por uma lâmpada halógena de 1000 watts, posicionada a aproximadamente 1 metro da amostra e previamente aquecida.

A aquisição inicial dos espectros de reflectância foi realizada em três etapas (métodos de medição), através da leitura de aproximadamente 20 filamentos de *Egeria densa*, de aproximadamente 30 cm cada, coletados no reservatório da Represa Guarapiranga.

A primeira etapa consistiu na medição dos filamentos imersos em água, numa tina de 20cm de diâmetro e 30cm de altura (tina alta). Na segunda etapa a macrófita foi medida tina de vidro de 35 cm de diâmetro por 10 cm de altura (tina baixa), também imersa em água. Para finalizar, na terceira etapa os filamentos foram medidos fora d'água, sobre superfície escura, conforme ilustrado na Figura 1, a seguir, que também ilustra, com detalhes, a montagem dos equipamentos durante as medições.

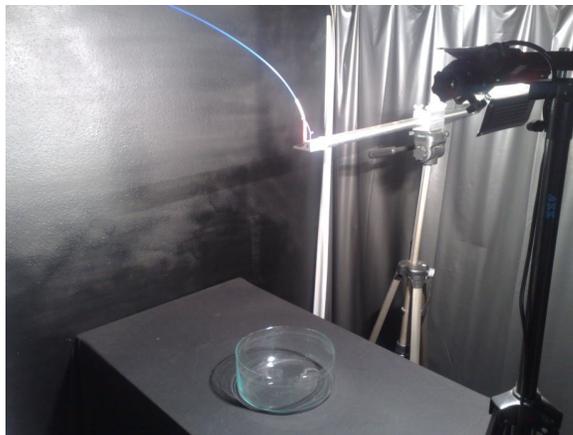


Figura 1. Detalhe de montagem da fibra óptica e braço metálico e fonte de iluminação, a aproximadamente 1m da tina de vidro.

Para as três etapas, as leituras foram efetuadas de forma sucessiva, utilizando-se o espectroradiômetro *Ocean Optics*[®], modelo USB2000, ligado ao computador e a uma fibra óptica posicionada a cerca de 50 cm acima da tina d'água contendo os filamentos, de modo que sua área de visada correspondesse à área circular da tina e pudesse captar toda a energia refletida pelos filamentos. Após cada medição, um filamento era retirado e o volume correspondente em água era adicionado ao recipiente, até o nível inicial, gerando um novo espectro de reflectância que era lido e registrado. Ao final, obteve-se uma série de 20 assinaturas espectrais.

Após as medições radiométricas os filamentos foram colocados para secagem em estufa, e posteriormente pesados até estabilização de seu peso, correspondente à massa seca.

Os dados obtidos foram submetidos a tratamento estatístico, através de regressão linear simples, de modo a relacionar os valores de biomassa aos valores de reflectância fornecidos por imagens de sensoriamento remoto óptico. Esse procedimento também permitiu identificar qual das etapas abordadas de medição forneceu o melhor ajuste para o modelo desejado.

Para isso, os dados de reflectância obtidos em laboratório foram segmentados de acordo com o intervalo correspondente às bandas 1, 2, 3 e 4 do sensor *Thematic Mapper (TM)*, instalado na plataforma Landsat 5 (Tabela 1). Em seguida, foi calculada a reflectância média dos intervalos estudados, para cada assinatura espectral obtida. Essas médias foram utilizadas como variável independente na análise de regressão. A variável dependente, nesse caso, corresponde ao valor de biomassa.

Tabela 1. Comprimentos de onda das bandas espectrais 1, 2, 3 e 4 da plataforma Landsat 5/TM

Landsat 5/TM	Comprimento de Onda (λ) - nm
Banda 1	450 – 520
Banda 2	520 – 600
Banda 3	630 – 690
Banda 4	760 – 900

Após a determinação da banda que promovesse o melhor ajuste, procedeu-se com o refinamento do modelo, através da realização de novas séries de medição, conforme descrito anteriormente. Ao final, um total de 63 amostras foram utilizadas na análise estatística e geração do modelo de determinação de biomassa com base em dados obtidos por sensores remotos ópticos.

3. Resultados e Discussão

As leituras radiométricas de *Egeria densa*, após cada retirada de filamento, não revelaram grandes diferenças de comportamento espectral, uma vez que uma única espécie de macrófita foi estudada (Aparício, 2007).

Contudo, ocorreu grande variação de intensidade das leituras (assinaturas espectrais), evidenciada pelas curvas do gráfico representado na Figura 2, relacionado às medições iniciais, realizadas para determinação de qual banda espectral forneceria o melhor ajuste, conforme descrito anteriormente. Observou-se, ainda, que estas variações não eram uniformes, mas podiam ser correlacionadas à biomassa dos filamentos retirados.

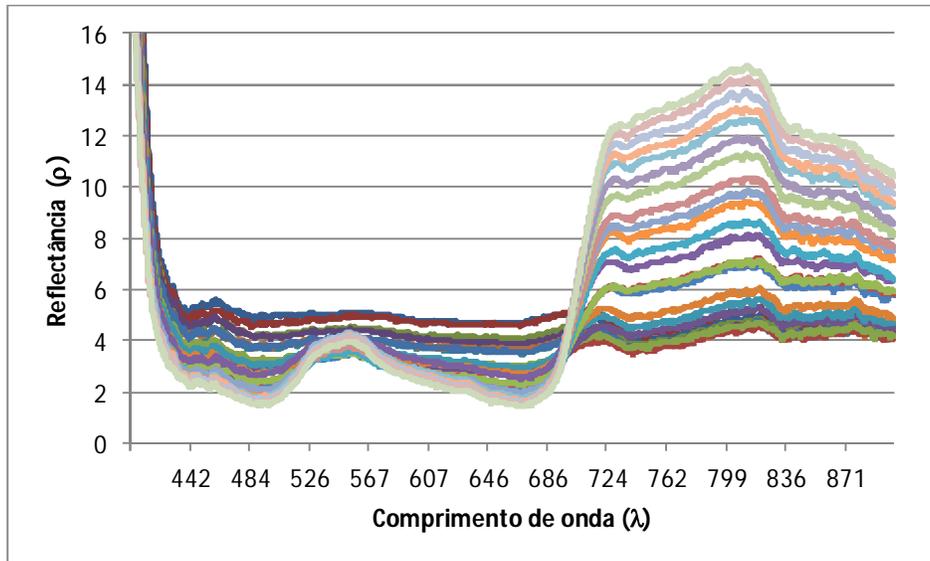


Figura 2. Variação de intensidade nas assinaturas espectrais obtidas na segunda etapa de medição radiométrica (tina baixa)

Com relação aos filamentos utilizados, esses apresentaram variações quanto ao tamanho, a forma e a idade. Essas diferenças estão relacionadas à aleatoriedade na coleta dos exemplares estudados.

Também é importante comentar que as porções mais profundas dos filamentos coletados apresentaram-se com uma coloração amarronzada e menos verde, devido à menor quantidade de clorofila e conseqüentes menores taxas de fotossíntese pela menor radiação recebida. Todavia, a quantidade de clorofila presente em cada filamento foi suficiente para produzir valores de reflectância que pudessem ser lidos pelo espectralradiômetro e correlacionados à biomassa do respectivo filamento.

O tratamento estatístico dos dados através da regressão linear simples permitiu a obtenção de uma equação estimadora da biomassa da espécie estudada, com base em valores de reflectância obtidos nas imagens de sensoriamento remoto.

Embora os valores de R^2 não tenham sido expressivos para as bandas 1, 2 e 3, uma correlação bastante positiva foi encontrada para a banda 4, com $R^2 = 0,9522$ (Tabela 2). A Figura 3 apresenta os gráficos de dispersão dos dados para as bandas 1, 2, 3 (Figura 3A) e 4 (Figura 3B).

Tabela 2. Valores de R^2 encontrados para as bandas 1, 2, 3 e 4 em cada uma das etapas de medição realizadas.

	Tina Alta	Tina Baixa	Fora d'água
Banda 1	$R^2 = 0,6743$	$R^2 = 0,8282$	$R^2 = 0,7955$
Banda 2	$R^2 = 0,1716$	$R^2 = 0,2768$	$R^2 = 0,2316$
Banda 3	$R^2 = 0,2632$	$R^2 = 0,8153$	$R^2 = 0,5066$
Banda 4	$R^2 = 0,5645$	$R^2 = 0,9522$	$R^2 = 0,9054$

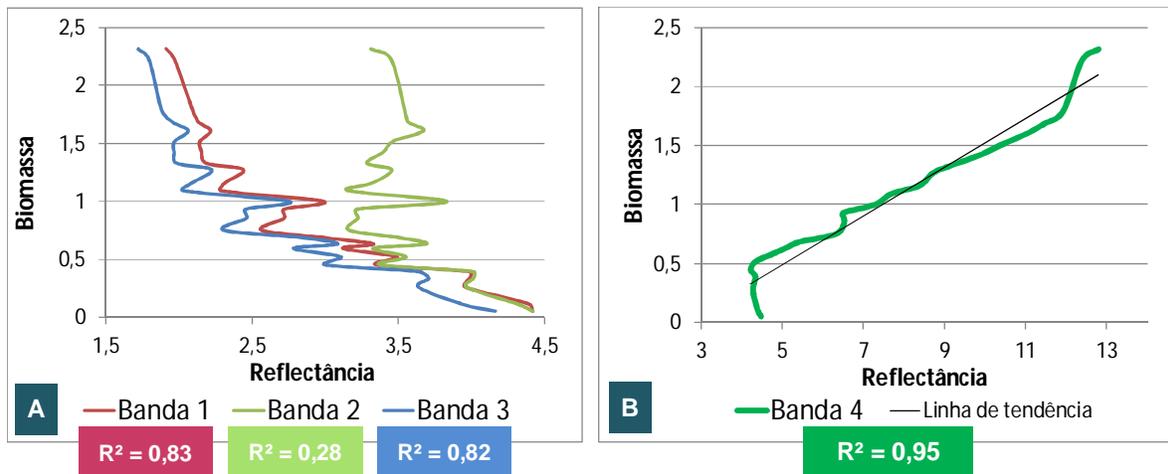


Figura 3. Regressão linear simples entre os valores de biomassa e os valores de reflectância equivalentes às bandas 1, 2, 3 (Fig. A) e 4 (Fig. B). Notar que o melhor ajuste, dado por R^2 , ocorre na Banda 4.

O resultado final das medições realizadas após o refinamento do modelo e inclusão de novas amostras, totalizando 63 medições, pode ser apreciado através do gráfico apresentado na Figura 4.

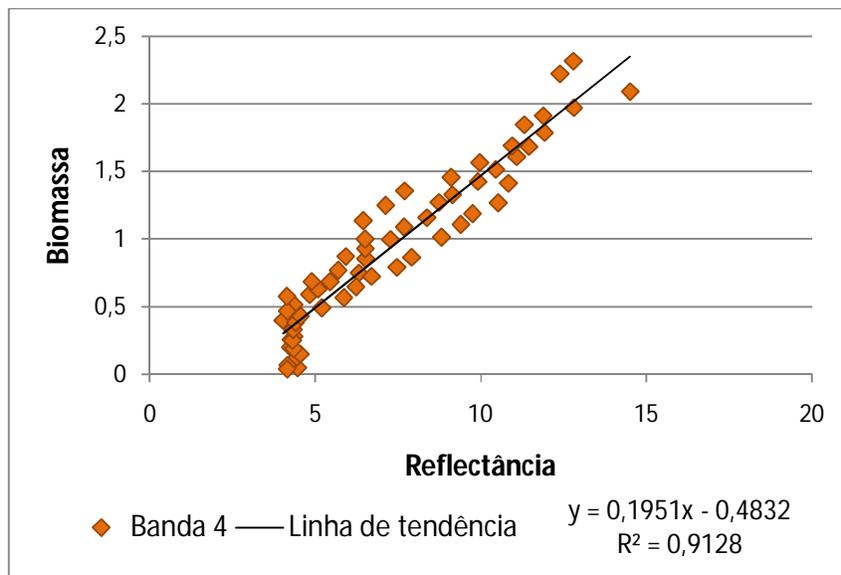


Figura 4. Dispersão de pontos referente às 63 amostras analisadas para elaboração do modelo final. Notar a diminuição no valor de R^2 .

Note que, após a inserção de novos dados para cálculo do modelo final, houve uma diminuição do valor de R^2 que, nesse caso, é igual a 0,9128. Contudo, essa diminuição não invalida, de forma alguma, o resultados encontrados. O aumento do erro pode estar relacionado às diferentes séries de medições realizadas, bem como à variações inerentes aos filamentos de macrófita utilizados.

Como base na equação da reta gerada para os dados de reflectância correspondentes à banda 4, definiu-se o modelo de determinação de biomassa da macrófita *Egeria densa* como sendo (Eq.1):

$$y = 0,1951x - 0,4832 \quad \text{Eq.1}$$

O valor de $R^2 = 0,9128$ significa que, estatisticamente, é possível dizer que a variação de biomassa pode ser 91% explicada pelos dados de reflectância. Essa é uma característica comum em estudos de vegetação, dada a alta reflectância desta na faixa do infravermelho próximo (Ashraf *et al.*, 2007).

Além da análise dos dados por regressão linear simples, também seria possível explorar a análise por regressão múltipla, considerando no modelo, dados de duas bandas para geração da equação da reta. Contudo, essa abordagem requer um número maior de amostras e está sendo abordada em outros estudos da linha de pesquisa.

Com relação às interferências inerentes aos métodos propostos, embora fatores como partículas em suspensão e taxas de turbidez da água pudessem ser vistos como obstáculos à validade do modelo, outros estudos mostram que tais variáveis não influenciam significativamente a capacidade do satélite Landsat 5/TM em detectar macrófitas (Nelson *et al.*, 2006).

Ainda que maiores correlações entre valores de biomassa obtidos em campo e aqueles fornecidos por valores espectrais tenham sido observadas quando consideradas plantas flutuantes e folhas emersas em lagos, que chega a 98%, contra apenas 61% se consideradas as porções submersas somente, a correlação de dados correspondentes às leituras das porções submersas, conjugados aqueles das emersas, atinge altos 73% (Nelson *et al.*, 2006).

Segundo Nelson *et al.* (2006), outro fator que não pode deixar de ser levado em consideração quando se trata de imagens de satélite, e que geralmente constitui variável importante, são as diferenças atmosféricas. Essas são estatisticamente irrelevantes em detecção de macrófitas aquáticas em lagos, o que permite a inclusão de áreas maiores e de localizações diversas em estudos desta natureza.

Contudo, é muito importante ressaltar que, a aplicação dos modelos depende de um processamento de imagem cuidadoso, principalmente no que diz respeito à correção das imagens Landsat 5 conforme descrito por Chander, 2009.

Vários estudos têm atestado que as técnicas de sensoriamento remoto constituem ferramenta valiosa em estimativas de presença e quantidade de macrófitas em regiões de lagos (Nelson, 2006; Valta-Hulkkonen, 2003), mas que ainda há muito a ser feito, principalmente no que diz respeito ao aperfeiçoamento de técnicas de calibragem das leituras de satélite e suas limitações. Nelson (2006) sugere que imagens com melhor resolução do que as fornecidas pela série Landsat possam ser usadas para uma melhor detecção da presença de macrófitas, mas estas apresentam um custo mais elevado, o que dificulta o monitoramento de grandes áreas.

4. Conclusão

O modelo apresentado neste estudo constitui valiosa ferramenta para a avaliação da biomassa de *Egeria densa* em reservatórios urbanos. Essa é uma característica conferida pela grande relação encontrada entre as informações que podem ser obtidas através das imagens do satélite Landsat 5/TM, os dados de reflectância lidos em laboratório e as medidas de biomassa, obtidas após a secagem dos filamentos da macrófita.

Com base nas informações obtidas, conclui-se que o modelo criado deve ser levado em consideração como importante ferramenta no gerenciamento de reservatórios urbanos,

sobretudo no controle de seus níveis de eutrofização e na avaliação da proliferação da macrófita.

Há, ainda, a necessidade de se estender este modelo para outras macrófitas, para que seja possível o monitoramento de áreas afetadas por diferentes espécies, bem como a avaliação da influência do fator profundidade do corpo d'água na limitação do método.

Referências bibliográficas

Aparício, C. Análise da resposta espectral de espécies de macrófitas, 2007, 163 p. Tese (Doutorado em Ecologia de Ecossistemas terrestres e Aquáticos). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

Ashraf, S., Brabyn, L., Hicks, B.J. **Remote Sensing of freshwater habitats for large rivers and lakes of the Waikato region using sub-pixel classification**. Hamilton, New Zealand: Environment Waikato.Cber.Center of Biodiversity and Ecology Research. Contract Report 63. New Zealand, 2007. 81 p.

Becker, R.; Dettke, G. A.; Montanher, D. R. Anatomia De Espécies Dos Gêneros *Egeria* Planch. E *Hydrilla* Rich. (Hydrocharitaceae). **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, supl. 1, p. 360-362, 2007.

Bini, L. M.; Oliveira, L. G.; Souza, D. C.; Carvalho, P.; Pinto, M. P. Patterns of the aquatic macrophyte cover in Cachoeira Dourada Reservoir (GO-MG). **Brazilian Journal of Biology**, v. 65, n.1, p. 19-24, 2005.

Carvalho, F.T.; Velini, E.D.; Cavenaghi, A.L.; Negrisoni, E. Castro, R.M. Influência da turbidez da Água do Rio Tietê na ocorrência de plantas aquáticas. *Planta Daninha*, v. 23, n .2.p. 359-362, 2005.

Chander, G., Markham, B., Helder, D. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 893-903, 2009.

Cook, C. D. K.; Urmi-König, K.. A revision of the genus *Egeria* (Hydrocharitaceae). **Aquatic Botany**, v. 19, p. 73-96. 1984.

Gomez, C. K.; Korstad, J. Monitoring of anthropogenic groundwater and aquatic macrophytes as indicators of cultural eutrophication of Manistee Lake. Au Sable Institute of Environmental Studies, Michigan, USA. 2007

Lopes, J.P.; Dantas, L. C.; Cerqueira, E. Influência da profundidade dos lagos no Complexo Hidrelétrico de Paulo Afonso, BA, e sua limitação ao cultivo de peixes. **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**, v. 3, n. 2, p. 106-116, 2008.

Martins, D.; Costa, N.V.; Domingos, V.D.; Rodrigues, A.C.P.; Carvalho, F.T. Efeito do período de exposição a concentrações de diquat no controle de plantas *Egeria densa*, *Egeria najas*, *E ceratophyllum demersum*. **Planta Daninha**, v. 26, n. 4, p. 865-874, 2008.

Nascimento, P.R.F.; Pereira, S.M.B., Sampaio, E.V.S.B. Biomassa de *Egeria Densa* nos reservatórios da Hidroelétrica de Paulo Afonso-Bahia. **Planta Daninha**, v. 26, n. 3, p. 481-486, 2008.

Nelson, S.A.C., Cheruvellil, K., Soranno, P.A. Satellite remote sensing of freshwater macrophytes and the influence of water clarity. **Aquatic Botany**, v. 85, p. 289-298, 2006.

Oliveira, N.M.B.; Sampaio, E.V.S.B.; Pereira, S.M.B.; Moura Junior, A.M. Capacidade de Regeneração de *Egeria Densa* dos Reservatórios de Paulo Afonso, BA. **Planta daninha**, v. 23, n. 2, p. 7-13, 2005.

Ribeiro, H. M. C.; Almeida, A. C.; Rocha, B. R. P.; Krusche, A. V. Water Quality Monitoring In Large Reservoirs Using Remote Sensing And Neural Networks. **Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) Latin America Transactions**, v. 6, n. 5, 2008.

Valta-Hulkkonen, K.; Partanen, S.; Kanninen A. Remote sensing as a tool in aquatic macrophyte mapping of a eutrophic lake: A comparison between visual and digital classification. **Proceedings of the 9th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science**, 4 -6.6.2003, Espoo, Finland, p. 79-90, 2003.