

ESTIMATIVA DA BATIMETRIA DO AÇUDE DO SACO-PE COM AUXÍLIO DE DADOS ORBITAIS

JOSIMAR R. DA C. LIMA¹, RENATA A. SHINOZAKI-MENDES², ANDRÉ Q. DE ALMEIDA³

RESUMO: A batimetria de um corpo d'água pode ser medida em campo, a partir de sondas batimétricas; no entanto, é um processo oneroso e que demanda tempo. Com isso, o objetivo principal deste estudo foi ajustar modelos de estimativa de batimetria de um lago a partir de dados orbitais. O trabalho foi realizado no açude do Saco, localizado na bacia hidrográfica do Rio Pajeú, na cidade de Serra Talhada - PE. Foram ajustados modelos de regressão entre os valores batimétricos, coletados com auxílio de uma sonda, as bandas espectrais verde e infravermelho próximo do satélite Landsat 5 TM e o índice da diferença normalizada da água. A avaliação dos modelos ajustados foi realizada pela análise do coeficiente de determinação, do erro quadrado médio e da eficiência do modelo. A batimetria do açude variou entre 0,3 e 10 metros de profundidade. Os melhores ajustes foram encontrados com a utilização dos modelos potencial e exponencial, com valores de coeficiente de determinação superiores a 0,46 e de eficiência do modelo próximos da unidade. Pode-se concluir que os modelos de batimetria, ajustados a partir de dados de sensoriamento remoto, estimaram com satisfatória exatidão os valores de batimetria do açude do Saco, principalmente nas partes mais rasas do lago.

PALAVRAS-CHAVE: Landsat, NDWI, Rio Pajeú, sensoriamento remoto.

BATHYMETRY ESTIMATION OF THE SACO RESERVOIR-PE WITH THE HELP OF ORBITAL DATA

ABSTRACT: The bathymetry of a water body can be measured in the field using bathymetric probes; however this process is costly and time-consuming. Thus, the main objective of this study was to fit bathymetry estimation models of a lake from satellite data. The study was conducted in the Saco reservoir, located in the Pajeu river basin near the city of Serra Talhada – PE, Brazil. Regression models were adjusted between the bathymetry values collected with a probe, the green and near infrared spectral bands of the Landsat 5 TM satellite and the normalized difference water index. Evaluation of the adjusted models was performed by analysis of the coefficient of determination, mean squared error and model efficiency. The bathymetry of the reservoir varied between 0.3 and 10 meters deep. The best fits were found when using the power and exponential models, with coefficients of determination greater than 0.46 and model efficiency close to one. It can be concluded that the bathymetry models adjusted to the remote sensing data provided a satisfactory accuracy for estimating bathymetry values of the Saco reservoir, especially in the shallow regions of the lake.

KEYWORDS: Landsat, NDWI, Pajeú river, Remote sensing.

¹ Engenheiro de Pesca (UFRPE-UAST), Mestrando em Recursos Pesqueiros e Aquicultura pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, josimar.robson@gmail.com.

² Engenheira de Pesca (UFRPE), Prof. da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UAST), Laboratório de Biologia Pesqueira, Fazenda Saco, s/n. Serra Talhada/PE. Caixa posta 061 CEP 56903-970, renataasm@gmail.com.

³ Engenheiro Florestal (UFES), Prof. da Universidade Federal de Sergipe, Núcleo de Engenharia Agrícola Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos. Av. Marechal Rondon, s/n Jardim Rosa Elze - CEP 49100-000 - São Cristóvão/SE, andreqa@gmail.com.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 10-8-2012

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 23-4-2013

INTRODUÇÃO

No Brasil, as represas e açudes são formados principalmente pelo represamento de rios para atender a objetivos de abastecimento de água, regularização de cursos, geração de energia elétrica, irrigação, navegação e recreação, entre outros. Segundo GUIMARÃES et al. (2009), o Nordeste brasileiro é a área que tem a maior densidade de açudes construídos no País. A prática da construção de açudes, quer seja de pequeno, quer de médio porte, originou-se da necessidade precípua da população em armazenar água para os períodos de estiagem.

Uma ferramenta de grande importância para o conhecimento das características morfométricas de lagos e açudes é a elaboração de cartas batimétricas, que possibilitam maior entendimento da estrutura e do funcionamento dos ambientes aquáticos. Esses mapas constituem importante subsídio para a realização de estudos sobre evolução de assoreamento, qualidade da água, ictiofauna, entre outros. O conjunto dessas informações torna-se de grande valia no direcionamento de ações de conservação de corpos d'água (RESCK et al., 2007). Entretanto, levantamentos batimétricos realizados de forma tradicional, com uso de ecobatímetro, apresentam custo elevado e demandam tempo. Além disso, na maioria das vezes, estes levantamentos não compreendem regiões com pouca profundidade, devido à dificuldade de navegação.

Uma alternativa que vem sendo utilizada na estimativa da batimetria de lagos, rios e estuários, é o uso de dados orbitais em conjunto com técnicas de sensoriamento remoto (FLENER et al., 2012). Os modelos mais simples de estimativa de profundidade a partir de dados orbitais utilizam apenas uma banda do espectro-eletromagnético e assumem que as características físico-químicas no perfil da lâmina d'água são constantes. Outro tipo de modelo simples e que vem sendo bastante utilizado na estimativa batimétrica, é ajustado a partir da relação empírica existente entre os valores medidos de batimetria e as bandas espectrais da região do espectro eletromagnético (FONSTAD et al., 2005; CARBONNEAU et al., 2006; LESSER & MOBLEY, 2007; LEGLEITER & KYRIAKIDIS, 2008; LEGLEITER & ROBERTS, 2009 a; LEGLEITER et al., 2009 b). No Brasil, KRUNG & NOERENBERG (2006) ajustaram modelos de regressão de estimativa de batimetria a partir de dados do satélite Landsat 7, encontrando boa relação entre os dados medidos e estimados. Em outro trabalho, RIBEIRO et al. (2005) ajustaram modelos de batimetria a partir de dados orbitais do satélite de alta resolução espacial IKONOS, também encontrando alta correlação entre os valores de batimetria medido e estimado. Entretanto, apesar de apresentarem bons resultados, os modelos de batimetria ajustados a partir de dados orbitais apresentam algumas limitações, como a utilização em lagos de grande profundidade (GAO, 2009).

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo principal ajustar modelos de estimativa batimétrica a partir de dados orbitais do satélite Landsat 5, no açude do Saco-PE, e avaliar seu potencial de predição por meio da comparação com dados obtidos *in loco*.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no açude do Saco, localizado (07° 59' 31" S e 038° 17' 54" W) na cidade de Serra Talhada-PE, na bacia hidrográfica do Rio Pajeú (Figura 1). A área e o volume do açude são de aproximadamente 500 hectares e 36 milhões de metros cúbicos.

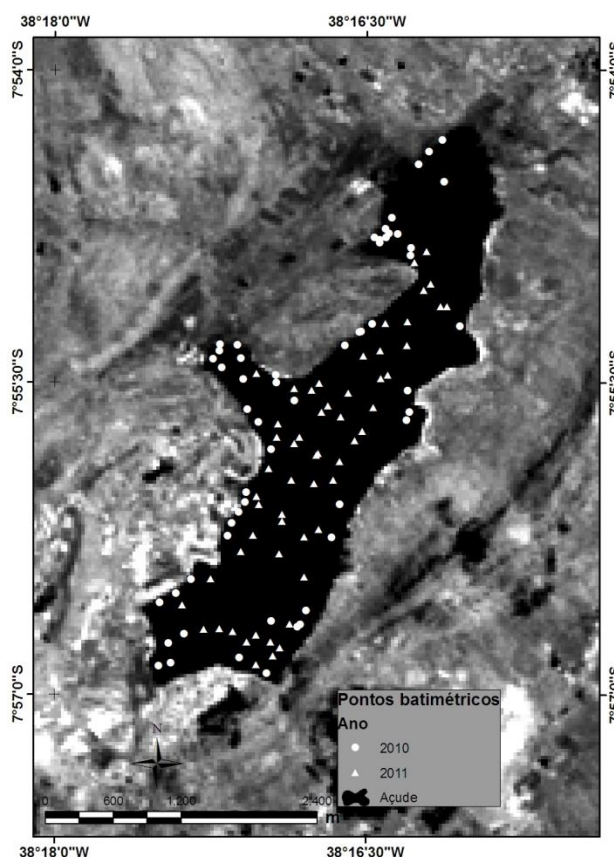


FIGURA 1. Localização do açude do Saco e dos pontos batimétricos coletados nos anos de 2010 e 2011. **Location of the Saco reservoir and bathymetric points collected in the years 2010 and 2011.**

Os valores de batimetria foram obtidos em duas campanhas de campo, nos dias 29 de setembro de 2010 e 18 de março de 2011, totalizando 112 pontos. Os dados batimétricos foram aferidos com o auxílio de um barco e um ecobatímetro, modelo Garmin fishfinder 90. Os pontos amostrados foram georreferenciados por um Sistema de Posicionamento Global (GPS) de navegação da marca Garmin, modelo 12XL.

Foram utilizadas duas imagens do sensor Thematic Mapper (TM) a bordo do satélite Landsat 5 (ponto 65 e órbita 216), com resolução espacial de 30 metros. As imagens selecionadas datam de 06 de outubro de 2010 e 31 de março de 2011, correspondentes às medidas em campo da batimetria do açude do Saco.

Na fase de pré-processamento, as imagens de satélite foram georreferenciadas por meio de interpolador de primeiro grau de alocação de vizinho mais próximo. A projeção final foi UTM/WGS84, zona 24 Sul. O Erro Quadrático Médio (EQM) encontrado para todas as imagens foi inferior a 10 metros. Para cada banda espectral, foi realizada a correção atmosférica, onde os níveis digitais foram convertidos em radiância espectral, segundo a metodologia de subtração do objeto escuro (CHAVES, 1989) e posteriormente convertidos em Reflectância (ρ). Os valores de elevação e azimute do Sol, necessários para converter a radiância em reflectância, foram obtidos diretamente das imagens utilizadas (Tabela 1). De acordo com RODRIGUES et al. (2009), o pré-processamento das imagens possibilita a melhoria da qualidade dos dados orbitais.

TABELA 1. Parâmetros das imagens Landsat 5 TM utilizadas no estudo. **Parameters of Landsat 5 TM images used in the study.**

Data imagem	Elevação	Azimute do sol
06/10/2010	63,0201	86,795
31/03/2011	57,0187	71,1752

Utilizaram-se duas bandas do satélite Landsat 5; a banda 2 (G), correspondente à região verde do espectro-eletromagnético do visível e a banda 4 (IVP), correspondendo à região do infravermelho próximo. A partir destas bandas, foi estimado o Índice da Diferença Normalizada da Água (NDWI), dado pela equação a seguir (McFeeters, 1996):

$$NDWI = (\rho G - \rho IVP) (\rho G + \rho IVP)^{-1} \tag{1}$$

em que: ρ é a reflectância do pixel de cada banda, como descrito anteriormente.

Para os 112 pontos de batimetria medidos em campo, foram associados os valores das respectivas bandas da imagem e do NDWI. A associação foi feita pelas coordenadas coletadas em campo com o GPS e os respectivos valores de coordenadas na imagem.

Os modelos de estimativa batimétrica foram ajustados através da análise de correlação entre a batimetria medida em campo e os valores das bandas G, IVP e do NDWI. Foram utilizados modelos de regressão do tipo exponencial e potencial. Os modelos foram avaliados utilizando o teste t de student ao nível de 1% de significância. A análise dos resíduos foi realizada para avaliar se existe tendência no resíduo.

O poder de predição dos modelos ajustados foi avaliado por meio do coeficiente de determinação (r^2), da raiz do erro quadrático médio (RMSE) e da eficiência do modelo (EF). Sendo o RMSE definido como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \tag{2}$$

em que: P_i e O_i são os valores preditos e observados, respectivamente, e N é o número de dados avaliados.

A EF é definida como:

$$EF = 1 - \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \tag{3}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos de regressão ajustados e seu comportamento, representado pelas curvas desenhadas, são demonstrados na Figura 2. Na Tabela 2, podem-se observar os resultados estatísticos da avaliação realizada entre os valores de batimetria medidos em campo e os estimados pelos modelos.

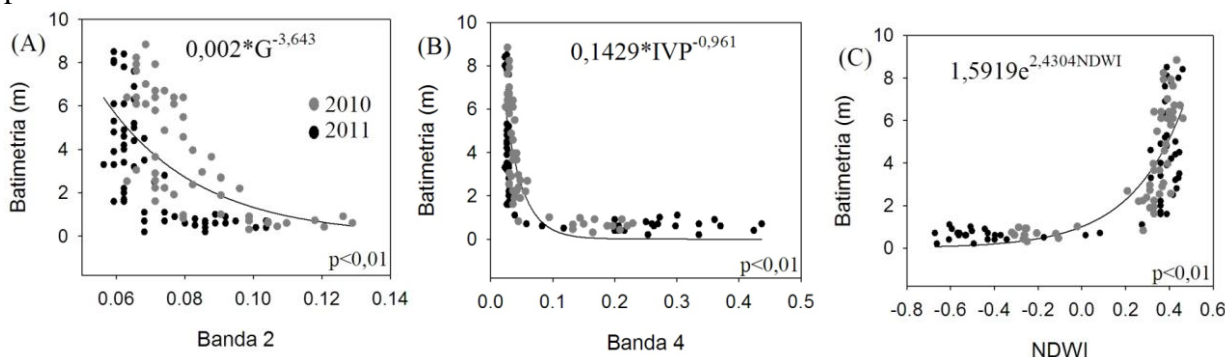


FIGURA 2. Diagrama de dispersão entre os valores medidos de batimetria, a banda espectral do verde - G (A), do infravermelho próximo - IVP (B) e do NDWI (C) derivado do satélite Landsat 5, para a área do açude do Saco. **Dispersion diagram for the measured bathymetric values with the green spectral band - G (A), the near infrared - IVP (B) and NDWI (C) derived from the Landsat 5 satellite for the region of the Saco reservoir.**

Os valores de batimetria medidos em campo estiveram entre 0,3 e 10,0 metros, o que evidencia uma grande variação de profundidade na área do açude. Os valores de reflectância das bandas utilizadas do satélite Landsat 5 estiveram entre 0,06 – 0,12 (banda verde) e 0,05 – 0,4 (banda do infravermelho próximo) micrômetros, já os valores do NDWI, a variação foi entre -0,70 e 0,50.

TABELA 2. Resumo estatístico entre os valores de batimetria medido e estimado pelos modelos ajustados a partir de dados orbitais do satélite Landsat 5. **Statistical summary of the bathymetry values measured and estimated by adjusted models from from Landsat 5 satellite data.**

Informação	Nº observações	r ²	RMSE	EF	p-valor
Banda 2	112	0,46	5,87	0,30	<0,01
Banda 4	112	0,75	4,59	0,57	<0,01
NDWI	112	0,74	4,68	0,56	<0,01

Considerando as bandas individuais do satélite, o melhor modelo ajustado foi o potencial, com r² igual a 0,46 e 0,75, para as bandas do G e do IVP, respectivamente (Tabela 2). Para o NDWI, o melhor modelo ajustado foi o exponencial (r² = 0,75).

KRUNG & NOERENBERG (2006), em estudo realizado na região de estuário no litoral do Paraná, Brasil, encontraram um r² de 0,746 bem próximo do valor observado para o Açude do Saco.

Em relação aos dados orbitais, foi observado que todos variaram em função dos valores de batimetria. Para as bandas utilizadas, quanto maior a profundidade do açude, menores foram os valores de ρ : já para o NDWI, quanto maior a profundidade do açude, maiores foram os valores do índice (Figura 2). O mesmo comportamento foi encontrado por KRUNG & NOERENBERG (2006), que relacionaram o NDWI derivado de imagens do satélite Landsat 7 com valores de batimetria da região de estuário, localizado no litoral no Paraná. Isso expressa uma relação negativa entre a profundidade e as bandas do satélite e uma relação positiva entre a profundidade e o NDWI.

A maior dispersão dos valores de batimetria foi observada na relação com a banda 2 (Figura 1A), diferente do ocorrido na banda 4 e no IDWI (Figuras 2B e 2C). Este comportamento encontra-se dentro do esperado, visto que, na região do espectro correspondente à banda 2 (verde), a radiação eletromagnética pode vir a interagir com algas ou qualquer outro tipo de cobertura vegetal existente sobre lâmina d'água ou em suspensão, sendo uma parte absorvida e outra refletida com diferentes intensidades. Este resultado pode ser comprovado nos valores menos adequados do RSME e EF encontrados no modelo ajustado com a banda verde da região do visível do espectro eletromagnético (Tabela 2).

O comportamento da curva ajustada a partir da banda 4 (Figura 2B), com os maiores valores de profundidade associados com os menores valores de ρ , é decorrência da completa absorção da radiação na região do infravermelho próximo por parte da água, a partir de um determinado valor de profundidade. Comportamento semelhante ao encontrado por FLENER et al. (2012), no Rio Tana, na Lapônia, ao testar diferentes modelos de estimativa batimétrica com dados de sensoriamento remoto. Em relação ao NDWI, nota-se também que, a partir de determinada profundidade, os valores do índice não variaram, estando sempre próximos de 0,4. Em ambos os casos (B4 e NDWI), ocorreu saturação dos valores refletidos, ou seja, a partir de determinada profundidade (>1,5 m), os valores de reflectância da banda do infravermelho próximo e do NDWI não foram sensíveis à variação de profundidade no lago. Já para os menores valores de profundidade do lago (<1,5 m), tanto para a banda 4, como para o NDWI, a grande variação dos valores refletidos pode estar associada com a alta reflectância das feições do solo no comprimento de onda na região do infravermelho próximo.

Na Figura 3, são apresentados os mapas de batimetria do açude do Saco, gerados a partir dos modelos de regressão ajustados com os dados orbitais do satélite Landsat 5. Podem-se notar

diferenças na variação da batimetria do açude, de acordo com o modelo utilizado, porém o sentido da variação foi sempre o mesmo, aumentando a profundidade da borda para o interior. A batimetria estimada com os modelos ajustados a partir da banda 2 e do NDWI, tiveram as menores variações de profundidade, estando entre 0,15 e 7,00 metros. Apenas o modelo ajustado a partir da banda 4 apresentou valores de batimetria próximos aos 10 metros.

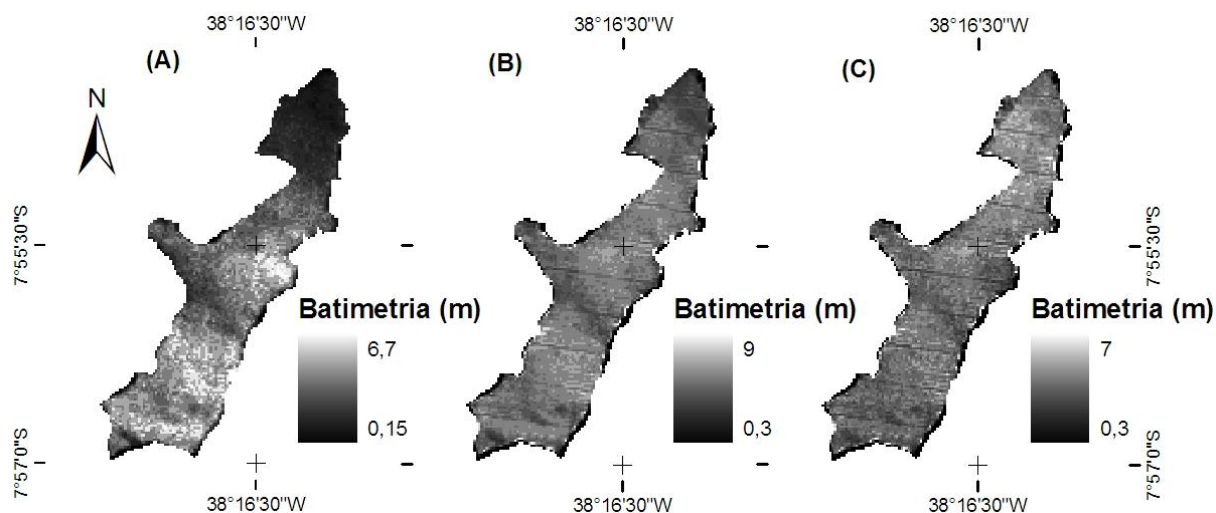


FIGURA 3. Batimetria estimada para o açude do Saco a partir dos modelos ajustados entre os valores medidos de batimetria e as bandas espectrais do verde (A), infravermelho próximo (B) e do NDWI (C) derivado do satélite Landsat 5. **Estimated bathymetry for the Saco reservoir based on adjusted models between measured bathymetry values and the green (A), near infrared (B) and NDWI spectral bands (C) derived from the Landsat 5 satellite.**

Assim como em outros trabalhos (RIBEIRO et al., 2005), a metodologia mostrou-se limitada na estimação de batimetria para as regiões mais profundas do açude (> 5 m), em consequência do reflexo do fundo do lago, afetando a absorção da radiação eletromagnética pela água. Possivelmente, antes desta profundidade, a resposta espectral da coluna de água prevalece sobre o reflexo do fundo.

CONCLUSÕES

Os modelos de regressão ajustados indicaram significativa relação entre os valores de batimetria e os dados orbitais derivados do satélite Landsat 5, apresentando boas avaliações dos resultados encontrados.

Os melhores modelos de estimativa batimétrica foram os ajustados a partir da banda do infravermelho próximo e do índice da diferença normalizada da água, estimando de forma confiável os valores de profundidade do açude.

REFERÊNCIAS

- CARBONNEAU, P. E.; LANE, S. N.; BERGERO, N. Feature based image processing methods applied to bathymetric measurements from airborne remote sensing in fluvial environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, Sussex, v.31, p.1.413–1.423, 2006. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.1341/pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2012.
- CHAVEZ, P.S. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Bethesda, v.55, p.1.285-1.294, 1989.
- FLENER, C.; LOTSARI, E.; ALHO, P.; KAYHKO, A. comparison of empirical and theoretical remote sensing based bathymetry models in river environments. *River Research and Applications*,

- Chichester, v.28, p.118 – 133, 2012. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rra.1441/pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2012.
- FONSTAD, M. A.; MARCUS, W. A. Remote sensing of stream depths with hydraulically assisted bathymetry (HAB) models. *Geomorphology*, Amsterdam, v.72, p.320–339, 2005. Disponível em: <http://www.geog.uoregon.edu/amarcus/Publications/Fonstad-Marcus_Geomorphology_2005.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2012.
- GAO, J. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress In Physical Geography*, London, v.33, p.103–116, 2009. Disponível em: <http://www.spaceimaging.com/CorpSite/assets/docs/technical-papers/2009/Gao_2009.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2012.
- GUIMARÃES, C. L.; RIBEIRO, C. N.; VIEIRA, L. J. S. Levantamento batimétrico do Açude Paraíso São Francisco – PB. *Revista Verde*, Mossoró, v.4, p.1–7, jan./mar. 2009. Disponível em: <<http://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/viewFile/141/141>>. Acesso em: 28 abr. 2012.
- KRUNG, L. A.; NOERNBERG, M. A. O sensoriamento remoto como ferramenta para determinação de batimetria de baixios na baía das Laranjeiras, Paranaguá – PR. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, n.25, p.101-105, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=s0102-261x2007000500010&script=sci_arttext>. Acesso em: 28 abr. 2012.
- LEGLEITER, C. J.; KYRIAKIDIS, P. C. Spatial prediction of river channel topography by kriging. *Earth Surface Processes and Landforms*, Sussex, v.33, p.841–867, 2008. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.1579/pdf>>. Acesso em: 11 maio 2012.
- LEGLEITER, C.; ROBERTS, D. A. A forward image model for passive optical remote sensing of river bathymetry. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.113, p.1.025–1.045, 2009. Disponível em: <http://www.geog.ucsb.edu/viper/viper_pubs/legleiter&roberts09.pdf>. Acesso em: 10 maio 2012.
- LEGLEITER, C.; ROBERTS, D.; LAWRENCE, R. Spectrally based remote sensing of river bathymetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, Sussex, v.34, p.1.039–1.059, mar./abril 2009. Disponível em: <http://remotesensing.montana.edu/pdfs/legleiter_et_al_2009.pdf>. Acesso em: 10 maio 2012.
- LESSER, M. P.; MOBLEY, C. D. Bathymetry, water optical properties, and benthic classification of coral reefs using hyperspectral remote sensing imagery. *Coral Reefs*, Berlin, v.26, p.819–829, 2007.
- MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, Basingstoke, v.17, n.7, p.1.425–1.432, 1996. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431169608948714>>. Acesso em: 10 maio 2012.
- RESK, R. P.; BEZERRA-NETO, J.F.; COELHO, R.M.P. Nova batimetria e avaliação de parâmetros morfométricos da Lagoa da Pampulha (Belo Horizonte, Brasil). *Revista Geografias*, Belo Horizonte, v.5, p.24–37, 2007.
- RIBEIRO, S. R. A.; TEDESCO, A.; KRUEGER, C. P.; CENTEN, J. A. Extração de profundidades mediante redes neurais artificiais e modelo de regressão usando dados de levantamento GPS e de imagem IKONOSII – estudo comparativo. *Engevista*, Rio de Janeiro, v.7, n 1, p.73-82, abr. 2005.
- RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M.; TEIXEIRA, A. S.; SILVA, B. B. Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões Semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.29, n.3, p.452-465, jul./set. 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162009000300012&script=sci_arttext>. Acesso em: 20 maio 2012.