

## Modelo empírico para estimativa batimétrica em um rio amazônico de água clara

Édipo Henrique Cremon<sup>1</sup>  
Marcelo Pedroso Curtarelli<sup>1</sup>  
Otávio Cristiano Montanher<sup>2</sup>  
Dilce de Fátima Rossetti<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{cremon, mpedroso, rossetti}@dsr.inpe.br

<sup>2</sup>Universidade Estadual de Maringá - UEM/GEMA  
Avenida Colombo, 5790 - Bloco 024 - Bairro: Zona Sete  
CEP: 87.020-900 – Maringá – PR, Brasil  
otaviocmontanher@yahoo.com.br

**Abstract.** The improvement in the spectral and radiometric resolution of recently available Landsat data provides an attractive opportunity to estimate biophysical variables, such as bathymetry, in some Amazonian clear water rivers. The aim of this study was to evaluate data acquired by the OLI sensor aboard the Landsat-8 satellite in order to estimate bathymetric values in an Amazonian clear water river based on empirical modelling. An analysis undertaken along the Branco River by attribute selection was made in the Weka software based on surface reflectance data from bands and band ratio. The ratios between bands 2 (blue) and 4 (red) and between bands 3 (green) and 4 (red) were used in the multiple regression adjusted to the exponential model. The results obtained by this model had an overall fit with  $R^2 = 0.57$ , with better adjustments at water depth's shallower than ~3 m. The fit to the exponential model suggests saturation of the incident radiation in the water column (e.g. Beer-Lambert Law). Band 4 as the denominator in the band ratio indicates a normalization of the electromagnetic radiation (EMR) signal of the suspended sediments in relation to the EMR signal captured by blue and green bands. This result shows that the application of bathymetric data estimated from the OLI sensor in clear water rivers with characteristics similar to the Branco River, is promising only at shallow depths not require great precision for greater depths.

**Palavras-chave:** fluvial bathymetry, clean water rivers, empirical model, OLI/Landsat-8, batimetria fluvial, rios de águas claras, modelo empírico, OLI/Landsat-8.

### 1. Introdução

A batimetria de grandes sistemas fluviais, como os amazônicos, é uma informação importante para a navegação, estudos morfodinâmicos, modelagem fluvial/ecológica e análise morfoestrutural. A obtenção dessa variável em campo pode implicar em um consumo considerável de tempo e de recursos financeiros. Isto motiva o desenvolvimento de metodologia para estimativas de batimetria por sensoriamento remoto (p.e. Zani et al., 2008; Legleiter et al, 2009).

O uso de produtos de sensoriamento remoto para estimativas de batimetria depende da disponibilidade de dados de alta resolução espectral e radiométrica. O programa de satélites Landsat lançou em 2013 o novo sensor OLI (*Operational Land Imager*). Esse sensor representa melhoria espectral e, principalmente, radiométrica em relação a seus predecessores (i.e., MSS, TM e ETM+). Este fato, aliado à distribuição gratuita das imagens adquiridas por esse sensor, motivam seu uso em estimativas de variáveis biofísicas com base em modelos físicos, empíricos e semi-empíricos. Dentre esses modelos, os empíricos apresentam como vantagem a facilidade de desenvolvimento, além da produção de resultados satisfatórios quando comparados a modelos semi-empíricos e físicos. Por outro lado, modelos empíricos apresentam como limitação sua replicação. Isto porque, por serem desenvolvidos com base em análises

estatísticas, ficam restritos, na maioria dos casos, ao conjunto de dados utilizados em seu desenvolvimento.

O uso de dados de sensores ópticos visando estimativas de batimetria em rios amazônicos depende das características de suas águas. Isto porque os rios amazônicos podem ser divididos em três tipos de água, i.e., branca, preta e clara, onde predominam componentes opticamente ativos de sedimentos suspensos, matéria orgânica e clorofila, respectivamente (Sioli, 1956). A radiação solar possui maior capacidade de penetração na coluna d'água de rios de água clara, onde eventualmente chegam a atingir seus leitos, de onde parte dessa energia retorna para a coluna d'água e daí para a atmosfera. Este sinal de retorno, ao ser mensurado por sensores remotos, pode ser correlacionado com a profundidade da coluna d'água. O objetivo desse trabalho foi avaliar o sensor OLI/Landsat-8 na estimativa de batimetria em um rio de água clara da região amazônica utilizando, para isto, modelagem empírica.

## 2. Área de estudo

A Amazônia concentra a maioria dos grandes rios da Terra. Dentre esses rios, classificam-se como sendo de águas claras os rios: Branco, Trombetas, Guaporé, Tapajós, Xingu, Araguaia e Tocantins (Junk et al., 2011). O baixo curso do rio Branco foi escolhido para testar metodologia visando estimativa de batimetria com base no uso do sensor OLI/Landsat-8. Com vazão média de 2.875 m<sup>3</sup>/s, o rio Branco corta o Estado de Roraima de norte a sul, sendo o principal afluente do rio Negro. Esse rio drena áreas representadas por rochas do embasamento cristalino pré-cambriano do Escudo das Guianas, além de depósitos sedimentares acumulados nas bacias do Tacutu e Solimões. O trecho situado entre a cidade de Caracará e a foz do rio Branco vem sendo continuamente utilizado para navegação comercial (AHIMOC, 1996).

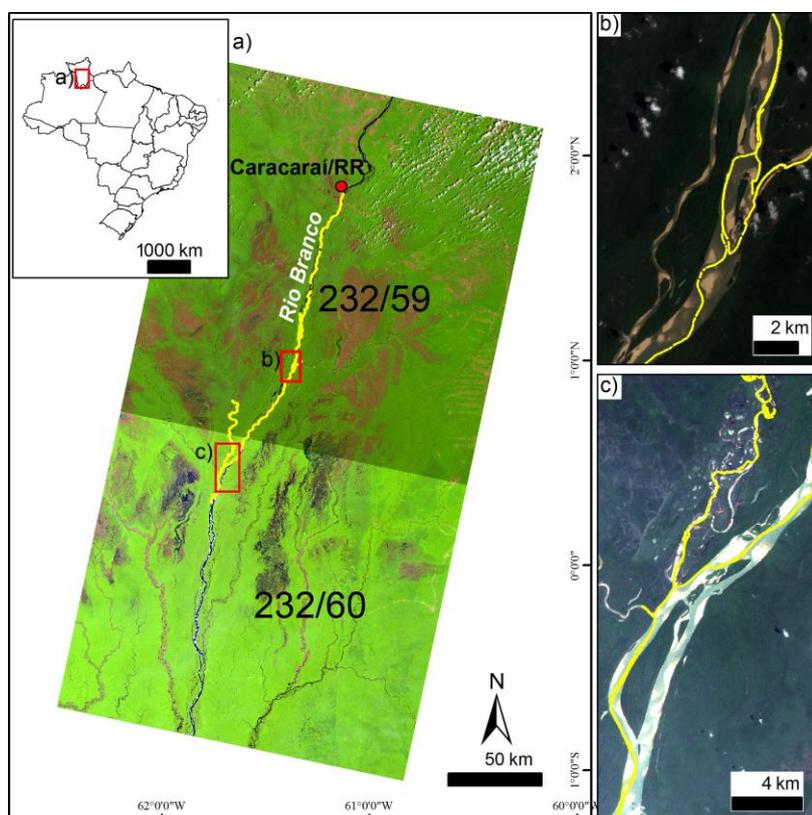


Figura 1 – a) Localização da área de estudo no Estado de Roraima, norte do Brasil; a) Órbitas/pontos do sensor OLI/Landsat-8 (R6G5B4) adquiridos no dia 19/02/2014 e utilizados neste trabalho; b) e c) detalhes dos trechos utilizados na aquisição de dados batimétricos (amarelo) ao longo do rio Branco (R4G3B2) (ver localização das figuras b) e c) em a).

### 3. Materiais e métodos

Para este estudo, utilizou-se um ecobatímetro modelo Lowrance LMS-525c DF acoplado na parte traseira de um barco de pequeno porte (Figura 2). Este aparelho foi operado em dupla frequência, i.e., 50 e 200 kHz, em combinação com um GPS LGC-2000, a fim de coletar dados de profundidade com as respectivas coordenadas geográficas.

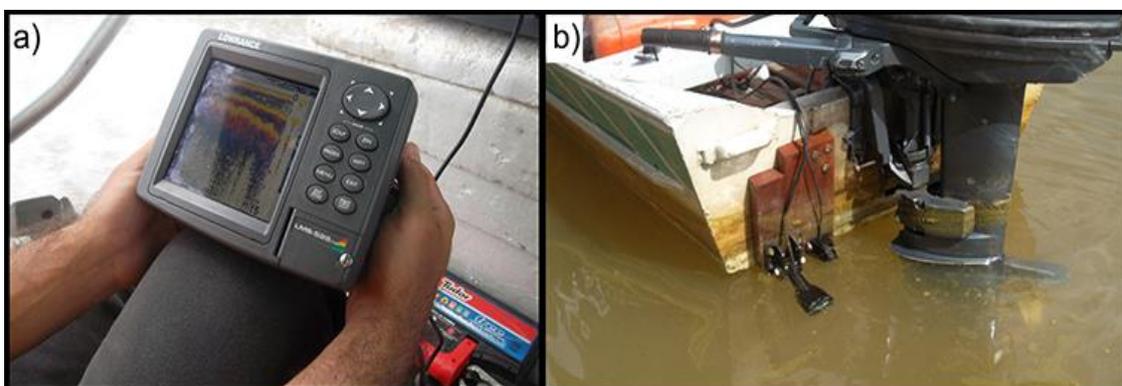


Figura 2 –Ecobatímetro Lowrance LMS-525c DF utilizado neste trabalho ilustrando: a) visor do modelo; e b) acoplamento na parte traseira do barco.

A campanha de campo para coleta de dados batimétricos foi realizada no período de seca do rio Branco entre 19/02/2014 e 23/02/2014. Em 19/02/2014, houve passagem do sensor OLI/Landsat-8 nas órbitas/pontos 232/59 e 232/60 (Figura 1), a qual gerou os dados de estimativa de batimetria que foram utilizados para correlação com os dados de profundidade do canal obtidos com o ecobatímetro. Para dados coletados em campo em datas que divergiram da data de imageamento, foi feita a normalização da profundidade de acordo com nível hidrométrico fornecido pela Agência Nacional de Águas (ANA) na estação de Caracará/RR para a data de passagem do sensor OLI.

Como utilizou-se mais de uma órbita/ponto para elaborar o modelo empírico, foram considerados valores físicos de reflectância de superfície das imagens OLI/Landsat-8, por estes serem valores normalizados. Para isso, a imagem original teve os valores de nível digital de suas bandas convertidos para radiância no topo da atmosfera. Com base no modelo de transferência radiativa MODTRAN no módulo FLAASH do aplicativo Envi 5, a radiância foi convertida para reflectância de superfície. Os parâmetros utilizados para correção atmosférica foram o modelo atmosférico tropical, modelo de aerossol rural e visibilidade inicial 50 km em condições específicas para corpos d'água (*over water*).

Para a análise estatística entre os dados batimétricos e a reflectância das bandas foram utilizados modelos de regressão simples e análise de razões entre (Legleiter et al, 2009; Ogashawara et al, 2014). Esses dados foram analisados em conjunto com a seleção de atributos pelo algoritmo “Bestfirst” do aplicativo de mineração de dados Weka (Hall et al., 2009). Para este procedimento, foram coletados mais de 120.000 pontos batimétricos. Devido à limitação computacional do aplicativo utilizado, foi feita seleção aleatória de 750 pontos dentre todos os dados observados, com espaçamentos superiores a 100 m, a fim de garantir a independência espacial na construção do modelo empírico. Com base nos resultados obtidos por esses métodos, foram escolhidos os melhores parâmetros para a estimativa da batimetria por regressão múltipla.

### 4. Resultados e discussões

Pela análise gráfica de correlação bidimensional colorida de colinearidade de dados (Figura 3), é possível observar que os melhores resultados foram obtidos pelas razões das bandas 2 e 4 (b2/b4), bem como das bandas 3 e 4 (b3/b4).

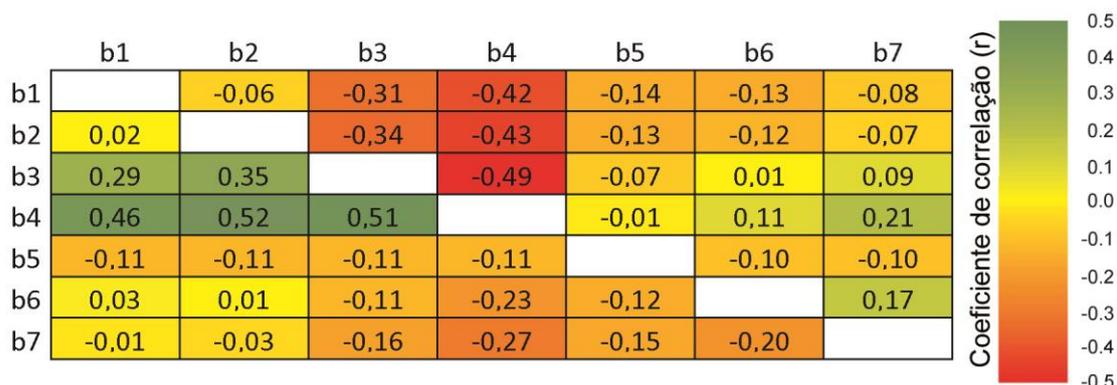


Figura 3 – Gráfico de correlação bidimensional entre as razões de banda do sensor OLI/Landsat-8 e a profundidade do rio Branco.

A análise de seleção por atributos no aplicativo Weka com o algoritmo “*Bestfirst*” fornece quais bandas ou razões de bandas são mais úteis na estimativa da batimetria, com menor colinearidade entre si. Por esse método, constatou-se que as razões entre as bandas 2 (azul) e 4 (vermelho) e entre as bandas 3 (verde) e 4 (vermelho) foram as mais precisas para estimativa da profundidade. Tal resultado coaduna-se com os dados pela correção bidimensional (Figura 3), já que tais razões apresentam os maiores coeficientes de correlação.

Baseado nessas razões de banda foi aplicada uma regressão múltipla com essas duas variáveis (Equação 1), cujo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 0,57.

$$\text{Profundidade (m)} = e^{2.6901 * b2/b4 + 2.8721 * b3/b4 - 4.1759} \quad (1)$$

A comparação entre os dados reais e estimados mostra que há uma saturação da estimativa em torno de 3 m de profundidade (Figura 4). Isso pode ser interpretado pela penetração da radiação na coluna d’água, cuja equação exponencial ajustada aos dados reflete tal característica, assim como constatado pela Lei de Beer-Lambert (Serway, 1983).

A REM (radiação eletromagnética) penetra corpos d’água com maior facilidade em porções de menor comprimento de onda do espectro visível, como nas bandas do azul e do verde. Por sua vez, na faixa espectral do vermelho, a água possui um coeficiente de absorção maior que nos demais espectros. Por outro lado, sedimentos suspensos também possuem coeficiente de espalhamento maior, o que torna esta faixa espectral mais sensível a esse componente. O fato das razões entre as bandas do azul e verde pela banda do vermelho mostrarem o melhor ajuste entre todas as outras razões indica que pode ter ocorrido uma normalização do sinal proveniente dos sedimentos suspensos em relação ao sinal proveniente do leito do rio.

Uma observação interessante advinda do presente estudo foi que a banda 1 não se mostrou a melhor estimadora de profundidade. Isso contradiz o que tem sido considerado na literatura (ver <http://landsat.gsfc.nasa.gov>), i.e., que quanto menor o comprimento de onda, maior é a penetração da REM na coluna d’água, e consequentemente melhores são as estimativas de profundidade. Isso ocorre devido ao fato de que essa banda é sensível tanto à presença de aerossóis atmosféricos quanto à profundidade. Embora os dados não sejam conclusivos, algumas hipóteses podem ser levantadas para explicar isto, como por exemplo, o fato de que, apesar de ser um rio de água clara, o rio Branco possui uma certa contribuição de afluentes de águas pretas, ricos em matéria orgânica. A matéria orgânica dissolvida na água possui a capacidade de absorver a REM de forma mais intensa quanto menor o comprimento de onda (Kirk, 2011). Portanto, é possível que a matéria orgânica possa estar contribuindo para a baixa capacidade preditiva da banda 1. Uma outra hipótese é que, apesar da transmitância da REM por meio da água ser maior quanto menor o comprimento de onda, o que favorece a estimativa

batimétrica, a reflectância da areia aumenta de forma significativa do azul para o vermelho. Isto sugere que, apesar do sinal que atinge o leito do rio ser proporcionalmente maior no azul do que no vermelho, o sinal de retorno acaba sendo maior para comprimentos de onda maiores, já que a areia possui um coeficiente de absorção maior para o azul. Isto ocorre mesmo considerando o desconto da proporção de REM absorvida em sua trajetória de volta pela água. Esta hipótese deve ser considerada para a área de estudo, tendo em vista que o substrato do rio Branco é dominado por sedimentos arenosos.

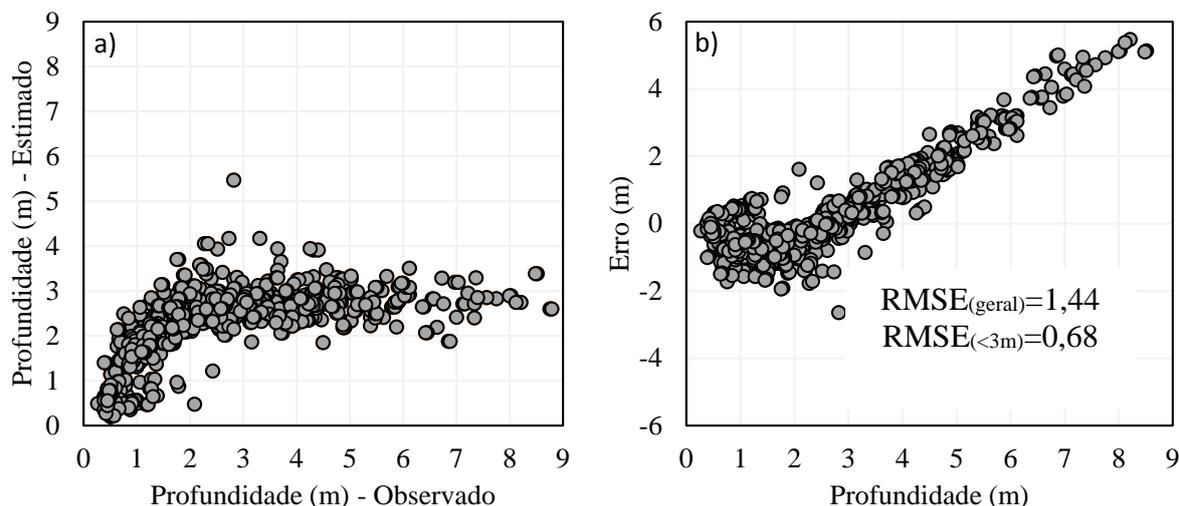


Figura 4 – a) Relação entre os dados de profundidade observados e estimados pelo modelo empírico utilizado no presente estudo; b) Erro em função da profundidade.

Os resultados de dados de batimetria gerados pelo modelo empírico aplicado às cenas OLI/Landsat-8 e sua comparação com os dados coletados em campo com o ecobatímetro são apresentados na Figura 5, bem como a análise de erro em função da profundidade. De modo geral, os valores de batimetria medidos ao longo do canal do rio Branco são compatíveis com esses valores estimados pelo sensor OLI/Landsat-8. Mas, esta conclusão é válida apenas para profundidades de lâmina d'água até ~3 m. Para profundidades maiores, valores discrepantes de até 6 m foram observados (Figura 4-b).

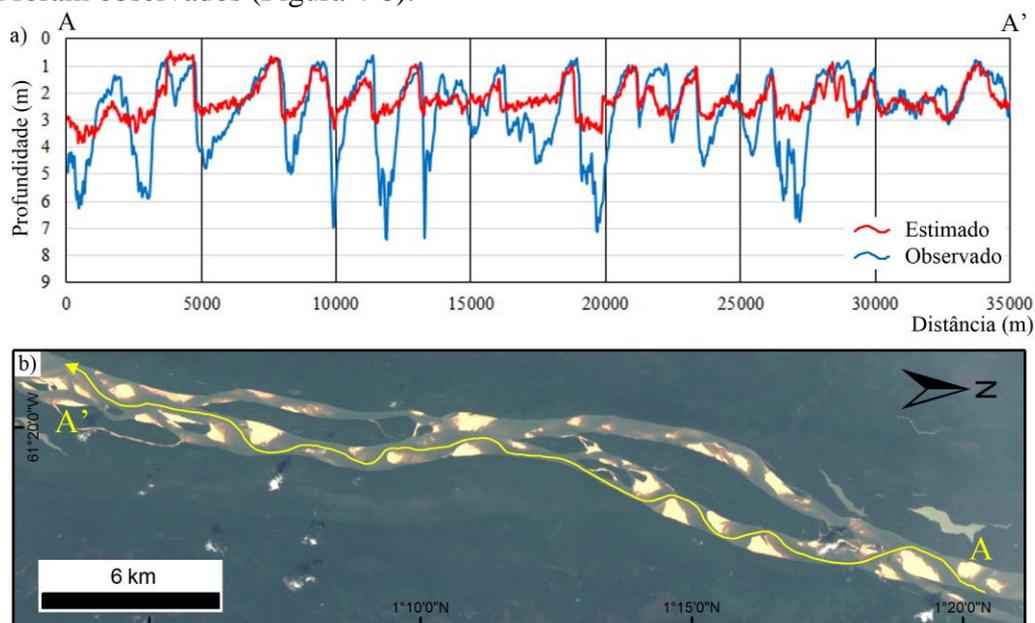


Figura 5 – Exemplo de perfis batimétricos derivados do ecobatímetro (observado) e estimados pelo sensor OLI/Landsat-8.

## 5. Considerações finais

O modelo empírico para estimativa de batimetria para um rio amazônico de água clara obteve bom ajuste para profundidades até ~3 m. As razões de bandas utilizadas na regressão múltipla ajustada por modelo exponencial refletiram o comportamento espectral para estimativa da batimetria, bem como a saturação da radiação na penetração da coluna d'água. A banda do vermelho como denominador nas duas razões de bandas utilizadas no modelo deve-se possivelmente a uma normalização da resposta espectral de sedimentos suspensos para a estimativa da batimetria.

A aplicação do sensor OLI/Landsat-8 para estimativa da profundidade de rios de água clara mostra-se promissora, mesmo com a limitação da saturação da resposta espectral em determinadas profundidades. O modelo construído não pode ser replicado para outras datas devido à variação de componentes opticamente ativos no rio Branco ao longo do tempo. Para a construção de um modelo empírico independente da data de imageamento seriam necessários dados e imagens em diferentes condições de profundidade e componentes opticamente ativos na construção de um modelo geral para o rio Branco ou para outros rios amazônicos de água clara.

## Referências Bibliográficas

AHIMOC. **Estudo das condições de navegabilidade do rio Branco, entre a cidade de Caracará (rr) e sua foz no rio Negro**. São Paulo: Administração das Hidrovias da Amazônia Ocidental, 1996. 31 p. (Contrato 005/96 - 65704.06)

Hall, M.; Frank, E.; Holmes, G.; Pfahringer, B.; Reutemann, P.; Witten, I. H. The WEKA Data Mining Software: An Update. **SIGKDD Explorations**, v. 11, n. 1, 2009.

Junk, W.; Piedade, M. T. F.; Schöngart, J.; Cohn-Haft, M.; Adeney, J. M.; Wittmann, F. A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands. **Wetlands**, v. 31, n. 4, p. 623-640, 2011.

Kirk, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press. 2011. 662 p.

Landsat Science. Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em 09.nov.2014.

Legleiter, C. J.; Roberts, D. A.; Lawrence, R. L. Spectrally based remote sensing of river bathymetry. **Earth Surf. Process. Landforms**, v. 34, p. 1039-1059, 2009.

Ogashawara, I.; Curtarelli, M.P.; Souza, A.F.; Augusto-Silva, P.B.; Alcântara, E.H.; Stech, J.L. Interactive Correlation Environment (ICE) - A Statistical Web Tool for Data Collinearity Analysis. **Remote Sensing**, v. 6(4), p. 3059-3074, 2014.

Serwey, R. A. **Physics for Scientists and Engineers**. CBS, p. 132-133, 1983.

Sioli, H. Über Natur und Mensch im brasilianischen Amazonasgebiet. **Erdkunde**, v. 10(2), p. 89-109, 1956.

Zani, H.; Assine, M. L.; Silva, A. Batimetria fluvial estimada com dados orbitais: estudo de caso no alto curso do rio Paraguai com sensor ASTER. **Geociências**, v. 27(4), p. 555-565, 2008.